



فصل نامه تخصصی مهندسی مخابرات جنوب

صاحب امتیاز : دانشگاه آزاد اسلامی واحد بوشهر

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

اعضای هیئت تحریریه:

دکتر محمد ناصر مقدسی	استاد	دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات تهران
دکتر همایون عریضی	استاد	دانشگاه علم و صنعت
دکتر سراج الدین کاتبی	استاد	دانشگاه شیراز
دکتر ابراهیم عبیری	استاد	دانشگاه صنعتی شیراز
دکتر کریم محمدی	استاد	دانشگاه علم و صنعت
دکتر عبدالرضا نبوی	استاد	دانشگاه تربیت مدرس تهران
دکتر مسعود دوستی	دانشیار	دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات تهران
دکتر علیرضا بهراد	استاد	دانشگاه شاهد
دکتر محمد مردانه	استاد	دانشگاه صنعتی شیراز
دکتر غضنفر شاهقلیان	استاد	دانشگاه آزاد اسلامی واحد نجف آباد
دکتر رمضانعلی صادقزاده	استاد	دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی
دکتر اسماعیل نجفی اقدم	استاد	دانشگاه صنعتی سهند تبریز
دکتر بال ویردی	استاد	دانشگاه متروپولیتن لندن
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..... مبذل خازن به دیجیتال دقیق با بهبود اثرات غیرخطی.....
آرش احمد پور؛ مهدی فلاح کاظمی
- ۱۱..... بهبود کارایی و قابلیت اطمینان در سیستم مانیتورینگ داده‌های لرزه نگاری مبتنی بر اینترنت اشیاء با اعمال افزونگی در سنسورها و کنترلرها.....
ایمان زنگنه ؛ امیر مسعود بیدگلی؛ اردشیر دولتی
- ۳۳..... بهینه‌سازی پیش‌بینی تابش خورشیدی بر اساس بستر اینترنت اشیاء در نیروگاه فتوولتائیک.....
ندا اشرفی خوزانی؛ مریم محمودی؛ شبنم نصر اصفهانی
- ۴۵..... بهره‌گیری از نقشه‌ی بازگشتی متقاطع لیدهای سینه‌ای، برای تشخیص محل مسیرهای فرعی در بیماران دارای نشانگان ولف-پارکینسون-وایت.....
سکینه یحیی‌زاده ساروی؛ نادر جعفرنیا دابانلو؛ علی مطیع نصرآبادی؛ علیرضا قربانی شریف
- ۶۵..... آنتن دوقطبی متعامد دارای المان‌های پارازیتیک ترنج شکل با قابلیت قطبش دایروی و کاربرد در سیستم موقعیت‌یاب جهانی.....
امیر سیاه چشم
- ۸۱..... مدیریت تقاضا در یک ریزشبکه متصل به شبکه با استفاده از کنترل مدل پیش‌بین.....
مسعود بنیانی ؛ محمد مهدی قنبریان ؛ محسن سیماب

Vol. 13/ No. 52/Summer 2024

Research Article

A High Accuracy Capacitance-to-Digital Converter with Improving Nonidealities Effects

Arash Ahmadpour, Assistant Professor ^{1*}  | Mehdi Fallah Kazemi, Assistant Professor² 

¹Department of Electrical Engineering, Lahijan Branch, Islamic Azad University, Lahijan, Iran, ar.amp@iau.ac.ir

²Department of Electrical Engineering, Lahijan Branch, Islamic Azad University, Lahijan, Iran, me.fallah@iau.ac.ir

Correspondence

Arash Ahmadpour, Assistant Professor of Electrical Engineering, Lahijan Branch, Islamic Azad University, Lahijan, Iran, ar.amp@iau.ac.ir

Received: 11 October 2023

Revised: 9 November 2023

Accepted: 26 November 2023

Abstract

This paper presents a high-precision capacitance-to-digital converter (CDC) based on period-modulation (PM) for grounded capacitive sensors. In this work, with a symmetrical design, the performance of the proposed capacitance to digital converter is significantly improved by applying zoom-in and three signal auto-calibration techniques. The dominant nonidealities of the CDC circuit are located at the three asymmetrical phases of the auto-calibration pathes. These effects are investigated here which are mainly caused by charge injection of switches and associated parasitic effects. These nonidealities are reduced by utilizing dummy switches at asymmetrical paths of the applied auto-calibration. The proposed interface is designed as an integrated circuit using a standard 0.18 μ m CMOS technology. A worst-case capacitance error less than 0.2fF for a 10pF sensor capacitor with maximum variation of 200fF, and parasitic capacitance of up to 20pF is obtained. The CDC achieves an absolute capacitance resolution of 0.479fF across a 10pF sensor capacitance with a 200fF variation, corresponding to an energy efficiency of 6.94pJ/step. The achieved latency is 128 μ s and the CDC consumes 170 μ A from a 2V power supply.

Keywords: Capacitive-to-voltage converter (CVC), Zoom-in technique, Grounded capacitive sensor, Dummy switch.

Highlights

- A novel structure of symmetrical capacitance to digital converter.
- Achieving low noise level and high accuracy.
- Improving non-linear effects using circuit techniques.

Citation: A. Ahmadpour, and M. Fallah Kazemi, "A High Accuracy Capacitance-to-Digital Converter with Improving Nonidealities Effects," *Journal of Southern Communication Engineering*, vol. 13, no. 52, pp. 1–10, 2024, doi: 10.30495/jce.2023.1998573.1231, [in Persian].

مقاله پژوهشی

مبدل خازن به دیجیتال دقیق با بهبود اثرات غیر خطی

آرش احمدپور*^۱ | مهدی فلاح کاظمی^۲^۱ استادیار گروه مهندسی برق، دانشکده فنی و مهندسی، واحد لاهیجان، دانشگاه آزاد اسلامی، لاهیجان، ایران، ar.amp@iau.ac.ir^۲ استادیار گروه مهندسی برق، دانشکده فنی و مهندسی، واحد لاهیجان، دانشگاه آزاد اسلامی، لاهیجان، ایران، me.fallah@iau.ac.ir

نویسنده مسئول

^۳ استادیار گروه مهندسی برق، دانشکده فنی و مهندسی، واحد لاهیجان، دانشگاه آزاد اسلامی، لاهیجان، ایران، ar.amp@iau.ac.ir

چکیده:

این مقاله یک مبدل خازن به دیجیتال با دقت بالا (CDC) بر اساس مدولاسیون پریود (PM) برای سنسورهای خازنی زمین شده ارائه می‌کند. در این تحقیق عملکرد CDC با طراحی متقارن و با استفاده از تکنیک بزرگنمایی و سه تکنیک کالیبراسیون خودکار سیگنال به طور قابل توجهی بهبود یافته است. اثرات غالب غیر ایده‌آل‌های مدار CDC در سه فاز نامتقارن مسیرهای کالیبراسیون خودکار قرار دارند. این اثرات که عمدتاً ناشی از تزریق بار سوئیچ‌ها و خازن‌های پارازیتی مرتبط هستند، در اینجا بررسی می‌شوند. این اثرات غیر ایده‌آل با استفاده از سوئیچ‌های تصنعی (dummy) در مسیرهای نامتقارن کالیبراسیون خودکار اعمال شده کاهش می‌یابد. مدار واسط پیشنهادی به عنوان یک مدار مجتمع با استفاده از فناوری استاندارد ۰/۱۸ میکرومتر CMOS طراحی شده است. خطای خازنی در بدترین حالت برای یک خازن سنسور ۱۰ پیکوفاراد با حداکثر تغییرات ۲۰۰ فمتوفاراد و خازن پارازیتی تا ۲۰ پیکوفاراد کمتر از ۰/۲ فمتوفاراد حاصل شده است. CDC به درجه تفکیک خازنی مطلق ۰/۴۷۹ فمتوفاراد در ظرفیت حسگر ۱۰ پیکوفاراد با تغییرات ۲۰۰ فمتوفاراد دست می‌یابد که مربوط به بازده انرژی ۶/۹۴ pJ/step است. تأخیر به دست آمده ۱۲۸ میکروثانیه است و مبدل ۱۷۰ میکروآمپر از منبع تغذیه ۲ ولت مصرف می‌کند.

کلید واژه‌ها: تکنیک بزرگنمایی، سنسور خازنی زمین شده، سوئیچ تصنعی مبدل خازن به ولتاژ

تاریخ دریافت: ۱۹ مهر ۱۴۰۲

تاریخ بازنگری: ۱۸ آبان ۱۴۰۲

تاریخ پذیرش: ۵ آذر ۱۴۰۲

<https://doi.org/10.30495/jce.2023.1998573.1231>

۱-مقدمه

حسگرهای خازنی به دلیل اینکه توان استاتیک مصرف نمی‌کنند به طور گسترده در کاربردهای صنعتی با تکنولوژی بالا مورد استفاده قرار می‌گیرند و برای مدارهای واسط با انرژی محدود جذاب می‌باشند [۱]. آن‌ها را می‌توان به عنوان حسگرهای خازنی با الکترودهای هدف فعال [۲، ۱] و الکترودهای هدف زمین شده [۳-۵] طبقه‌بندی کرد. در مدارات الکترونیک واسط، استفاده از خازن‌های حسگر با الکترودهای هدف فعال به دلیل ایمنی بالای نویز و غیر حساس بودن به خازن‌های پارازیتی ترجیح داده می‌شود. علاوه بر این، پیاده‌سازی یک ساختار کاملاً دیفرانسیلی برای حذف خطاهای سیستماتیک واسط برای واسط زمین شده پیچیده است. با این حال، در برخی از کاربردها سنسورهای خازنی زمین شده ترجیح داده می‌شوند [۳-۵]. اخیراً راه‌حل‌های متعددی در تحقیقات مربوط به حسگرهای خازنی و مدارهای واسط مرتبط با آن‌ها وجود دارد. استراتژی اندازه‌گیری ظرفیت حسگر عمدتاً مبتنی بر تبدیل ظرفیت حسگر به دیجیتال با استفاده از مبدل ظرفیت به دیجیتال (CDC) است. این عمل با مدارات واسط مانند مبدل آنالوگ به دیجیتال^۱ [۱] مدولاسیون پریود^۲ [۶، ۴]، مدولاتور سیگما-دلتا [۵]،

^۱ Analog to Digital Converter (ADC)^۲ Period Modulation (PM)

مدولاسیون عرض پالس^۱ [۷] و غیره تحقق می‌یابد. درمبدل‌های PM، درجه تفکیک را می‌توان با شمارش مدت زمان چندین پریود با استفاده از یک تقسیم کننده دیجیتال، برای زمان تبدیل مبادله کرد که آن‌ها را کاملاً انعطاف‌پذیر می‌کند [۶]. یک راه حل دیگر برای تحقق یک CDC کارآمد، استفاده از ساختار بزرگنمایی^۲ است [۲، ۸، ۹]. این روش نیاز به رنج دینامیکی بالا برای طبقه بعدی را کاهش می‌دهد. کالیبراسیون خودکار نیز یک تکنیک جذاب برای حذف هر گونه خطای سیستماتیک در مسیرهای متقارن سیستم‌ها است [۱۰]. کالیبراسیون خودکار همچنین باعث بهبود پایداری اندازه‌گیری می‌شود، اما منجر به افزایش زمان اندازه‌گیری و پیچیدگی طراحی می‌شود. لازم به ذکر است که استفاده از واسط‌های مربوطه از یک مالتی‌پلکسر^۳ برای انتخاب عناصر حسگر و مسیرهای نامتقارن کالیبراسیون خودکار می‌تواند برخی از خطاهای سیستماتیک را به سیستم اضافه کند و بنابراین نیاز به طراحی دقیق دارد.

در این مقاله، یک مدار واسط با دقت بالا بر اساس حذف خطاهای سیستماتیک PM برای سنسورهای خازنی زمین شده پیشنهاد شده است. اثر بخشی حذف خطاها برای واسط پیشنهادی با یک تکنیک بزرگنمایی و یک طراحی متقارن از کالیبراسیون خودکار اعمال شده به دست می‌آید.

بخش ۲ اصول عملکرد یک سیستم اندازه‌گیری ظرفیت را شرح می‌دهد. بخش ۳ مدار طبقه اول را معرفی می‌کند که اثرات غیر ایده‌آل آن در بخش ۴ بررسی می‌شود. CDC کامل با تکنیک بزرگنمایی در بخش ۵ معرفی شده است. نتایج شبیه‌سازی در بخش ۶ ارائه شده است و در نهایت در بخش ۷ نتیجه‌گیری می‌شود.

۲- سیستم اندازه‌گیری ظرفیت

مبدل‌های مبتنی بر PM شامل یک مالتی‌پلکسر، یک مبدل خازن به ولتاژ^۴ یک مبدل ولتاژ به پریود^۵ و یک واحد کنترل [۶، ۴] است که در شکل ۱ نشان داده شده است. می‌توان آن را بر اساس یک نوسان‌ساز یا یک ساعت خارجی پیاده‌سازی کرد. از تکنیک کالیبراسیون خودکار به منظور اندازه‌گیری ظرفیت حسگر مستقل از پارامترهای ناخواسته و همچنین بهبود پایداری اندازه‌گیری، در طراحی استفاده می‌شود. بر این اساس، یک چرخه اندازه‌گیری شامل سه فاز است که در آن به ترتیب دو خازن مرجع C_{REF1} و C_{REF2} و همچنین خازن سنسور C_X اندازه‌گیری می‌شود. مقادیر آنها به صورت خطی به پریودهای T_{REF1} ، T_{REF2} و T_X در خروجی تبدیل می‌شوند. مقادیر خازن‌های مرجع باید به گونه‌ای انتخاب شوند که مدار واسط در ناحیه خطی خودکار کند [10]. با اندازه‌گیری پریودهای مربوطه، ظرفیت حسگر را می‌توان به صورت [۱۰، ۴] محاسبه کرد:

$$C_X = \left(\frac{T_X - T_{REF1}}{T_{REF2} - T_{REF1}} \right) (C_{REF2} - C_{REF1}) + C_{REF1} \quad (1)$$

با این حال، اثرات خازن پارازیتی مربوط به ظرفیت حسگر به خصوص زمانی که یک سنسور با هدف زمین شده استفاده می‌شود، اجتناب ناپذیر است. مطابق شکل، خازن‌های C_{P1} و C_{P2} ظرفیت‌های پارازیتی حسگر هستند که می‌توانند عملکرد مدار واسط را تحت تأثیر قرار دهند. به منظور از بین بردن این اثر، اقدامات اضافی به نام تکنیک "پیشخور مبتنی بر محافظت فعال"^۶ نیاز است [۴، ۳].

۳- اصل بزرگنمایی

شکل ۲-الف مدار CVC متداول به استثنای خازن‌های پارازیتی حسگر و تکنیک کالیبراسیون خودکار را نشان می‌دهد. سیگنال‌های غیر همپوشانی ϕ_1 ، ϕ_2 ، ϕ_3 و ϕ_4 به ترتیب سیگنال‌های کنترلی برای S_1 ، S_2 ، S_3 و S_4 هستند. با توجه به سیگنال‌های اعمال شده، بار $C_X V_{DD}/2$ به C_F پمپ می‌شود، که منجر به پرش $C_X V_{DD}/(2C_F)$ همراه با نوع خاصی از برش کردن ($+++$) [۳، ۴] در ولتاژ خروجی V_0 می‌شود که در شکل ۲-ج نشان داده شده است. این تکنیک سوئیچینگ، آفست تقویت کننده، نویز فلیکر و تداخل منبع را حذف می‌کند.

¹ Pulse Width Modulation (PWM)

² Zoom-in

³ Multiplexer (MUX)

⁴ Capacitance to Voltage Converter (CVC)

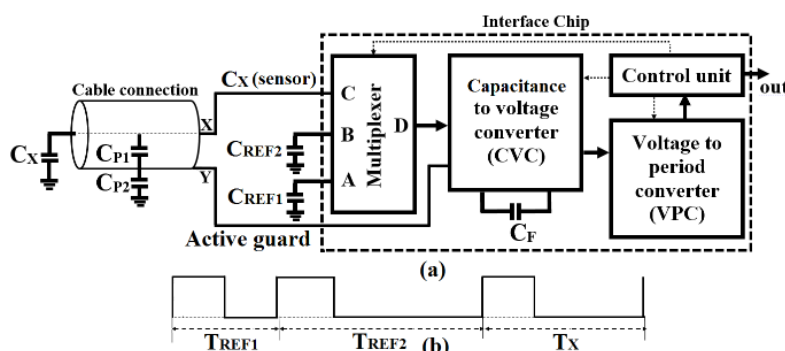
⁵ Voltage to Period Converter (VPC)

⁶ feed-forward based active-shielding

اصول عملکرد مدار CVC بزرگنمایی (شکل ۲-ب) مشابه ساختار CVC متداول است. تفاوت این است که، در مدار CVC بزرگنمایی، سیگنال اعمال شده به C_X مخالف سیگنال اعمال شده به C_Z است. بنابراین، فقط تفاوت بار $(C_X - C_Z)V_{DD}/2$ به C_F پمپ می‌شود که منجر به جهش ولتاژ با معادله زیر خواهد شد.

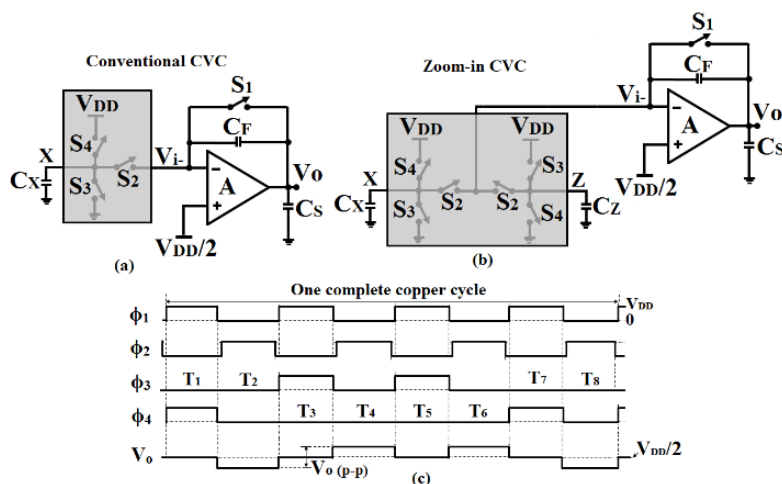
$$\Delta V = \frac{(C_X - C_Z)V_{DD}}{2C_F} \quad (2)$$

در کاربرد در نظر گرفته شده ما، تغییر ظرفیت حسگر در خازن سنسور ۱۰ پیکوفاراد زیر ۲۰۰ فمتوفاراد است. هدف اندازه‌گیری این تغییرات با دقت حداقل ۱۰ بیت است. این نیاز باید برای تأخیر کمتر از ۲۰۰ میکروثانیه و خازن‌های پارازیتی حسگر تا ۲۰ پیکوفاراد انجام شود.



شکل ۱: مبدل متداول ظرفیت به دیجیتال (CDC) بر اساس مدولاسیون پریود (PM) شامل کالیبراسیون خودکار سه سیگنال [۴، ۱۰]

Figure 1. The conventional capacitance-to-digital converter (CDC) based on period modulation (PM) including three-signal auto-calibration [4, 10]



شکل ۲: طبقه اول برای سنسورهای خازنی زمین شده، (الف) CVC متداول، (ب) CVC بزرگنمایی، (ج) سیگنال‌های مرتبط و ولتاژ

خروجی [۴، ۹، ۱۰]

Figure 2. The front-end stage for grounded capacitive sensors, (a) Conventional CVC, (b) Zoom-in CVC, (c) The related signals and output voltage [4, 9, 10]

۴- منابع خطا

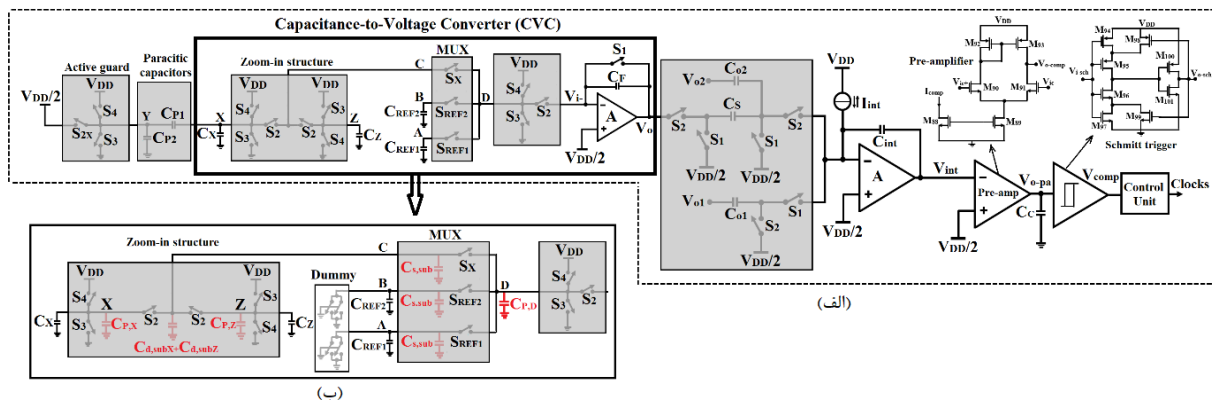
در این بخش، غیر ایده‌آل‌های بزرگنمایی CVC مانند تزریق بار سوئیچ‌ها و خازن‌های پارازیتی سوئیچ‌ها مورد بحث قرار می‌گیرد. غیر ایده‌آل بودن تقویت‌کننده مانند پهنای باند و بهره محدود با طراحی مناسب تقویت‌کننده رفع می‌شود. همچنین با توجه به آنکه کل مدار واسط به صورت یک نوسان‌ساز پیکربندی می‌شود، خطای زمان نشست در خروجی مدار CVC را می‌توان با تنظیم منبع جریان انتگرال‌گیر حذف کرد. ساختار بزرگنمایی می‌تواند بسیاری از غیر ایده‌آل‌های ساختار متداول را حذف کند.

۴-۱- تزریق بار سوئیچ و خازن پارازیتی

در CVC متداول (شکل ۲-الف)، سوئیچ ریست S1 به دلیل آنکه بار آن از چارپ^۱ استفاده می‌کند، نمی‌تواند خطایی ایجاد کند [۳،۴]. سوئیچ S2 نیز به دلیل آنکه با خاموش شدن، خروجی از طریق S1 به زمین مجازی متصل می‌شود، خطای تزریق بار ایجاد نمی‌کند. در همان زمان، خازن C_X به یک پتانسیل کاملاً مشخص (V_{DD} یا GND) متصل خواهد شد. علاوه بر این، سوئیچ‌های S3 و S4 به ترتیب سوئیچ‌های NMOS و PMOS هستند و بنابراین در لحظه خاموش شدن، بارهای آن‌ها را با قطبیت‌های مخالف تزریق می‌کنند. بنابراین، خطاهای تزریق بار آن‌ها در خروجی CVC جمع می‌شود. همچنین، خازن پارازیتی کلیدهای متصل به گره X (C_{par,X}) به موازات خازن حسگر ظاهر می‌شود که منبع خطا دیگری را ایجاد می‌کند. دقت مطلق CVC متداول به دلیل خازن‌های پارازیتی در گره X و تزریق بار سوئیچ‌ها برابر است [۱۱].

$$\text{Absolute accuracy} = \ln \left(\frac{C_X}{C_{\text{par},X} + WLC_{\text{ox}} \left(\frac{V_{\text{dd}} - V_{\text{th}}}{V_{\text{dd}}} \right)} \right) / \ln 2 \quad (3)$$

برای C_{ox} برابر ۱۰ فمتوفاراد بر میکرومتر مربع، C_X برابر ۲۰۰ فمتوفاراد، V_{th} برابر ۰/۵ ولت و V_{DD} برابر ۲ ولت حداقل اندازه سوئیچ با ابعاد (L برابر با ۰/۱۸ میکرومتر و W برابر با ۰/۲۵ میکرومتر)، دقت مطلق به ۷ بیت محدود می‌شود که به طور قابل توجهی کمتر از دقتی است که هدف این تحقیق است. با این وجود، در CVC بزرگنمایی (شکل ۲-ب)، با نادیده گرفتن اثرات مرتبه دوم مانند تفاوت در ولتاژ آستانه ترانزیستورهای PMOS، NMOS و همچنین عدم تطبیق، خطای تزریق بار سوئیچ و خازن‌های پارازیتی سوئیچ‌ها در گره‌های X و Z یکدیگر را جبران می‌کنند و تنها خطای باقیمانده را بر جای می‌گذارند. این موضوع در بخش ۶ بررسی خواهد شد.



شکل ۳: (الف) مدار CDC بزرگنمایی کامل، (ب) اثر خازنی پارازیتی
Figure 3. (a) The complete zoom-in CDC circuit, (b) Switches parasitic capacitance effect.

۵- مدار واسط کامل

شکل ۳-الف مدار واسط کامل را نشان می‌دهد. CVC بزرگنمایی شامل خازن‌های پارازیتی حسگر و کالیبراسیون خودکار می‌باشد که در شکل بصورت مستطیل نشان داده شده است. یک تکنیک شیلد فعال مبتنی بر پیش‌خور^۲ به اولین شیلد کابل برای حذف اثر خازن‌های پارازیتی اعمال می‌شود. یک MUX برای انتخاب خازن‌های مرجع C_{REF1}، C_{REF2}، C_{REF3} و خازن سنسور C_X استفاده می‌شود. هنگام انتخاب این خازن‌های مرجع، بار آن‌ها با چهار سوئیچ S1 الی S4 به مفهوم برش به خروجی CVC منتقل می‌شود. ممکن است تصور شود که هنگام انتخاب ظرفیت سنسور به مجموعه سه سوئیچ متصل به ورودی منفی تقویت‌کننده نیازی نیست. با این حال، این کمک خواهد کرد که مدار CVC تا حد ممکن برای اندازه‌گیری سه سیگنال مشابه باشد.

¹ Chopper

² Feed-forward

CVC با کالیبراسیون خودکار اعمال شده هنگام انتخاب C_{REF1} یا C_{REF2} مانند شکل ۲-الف است و بنابراین همان خطای خازنی ایجاد می‌کند. علاوه بر این، هنگام انتخاب C_X ، با نادیده گرفتن اثرات مرتبه دوم، تزریق بار سوئیچ‌ها و خازن‌های پارازیتی سوئیچ‌ها در گره‌های X و Z یکدیگر را جبران می‌کنند، با این حال، تزریق بار و خازن‌های پارازیتی در گره D باعث خطا در سیگنال خروجی CVC می‌شود. علاوه بر این، خازن‌های پارازیتی در گره C (مسیر حسگر) نیز با گره‌های A و B متفاوت است. کالیبراسیون خودکار سه سیگنال در صورت وجود مسیر متقارن برای همه ورودی‌ها، می‌تواند اثرات ناخواسته مانند تزریق بار سوئیچ‌ها و خازن‌های پارازیتی را کاهش دهد. از طرف دیگر، مسیرهای نامتقارن دارای خازن‌های پارازیتی متفاوتی هستند که به نوبه خود منجر به خطا می‌شود. شکل ۳-ب خازن‌های پارازیتی سوئیچ مربوط به مسیرهای مختلف را نشان می‌دهد. همانطور که می‌توان متوجه شد خازن‌های پارازیتی در گره C (مسیر حسگر) با گره‌های A و B متفاوت است. با انتخاب سوئیچ‌های انتخاب‌گر مشابه برای سه مسیر، تنها تفاوت $C_{P,X}$ ، $C_{P,Z}$ و $C_{d,subX}$ و $C_{d,subZ}$ خواهد بود. اثر خازن پارازیتی $C_{P,X}$ توسط $C_{P,Z}$ به دلیل تکنیک بزرگنمایی حذف می‌شود، اما اثر $C_{d,subX}$ و $C_{d,subZ}$ باعث خطای سیستماتیک می‌شود. همانطور که در شکل با رنگ خاکستری نشان داده شده است، می‌توان با اضافه کردن سوئیچ‌های تصنعی در گره‌های A و B نیز این خطا را برطرف کرد. به منظور جبران اثر خازن‌های پارازیتی سوئیچ‌ها، یک CVC متقارن مورد نیاز است. بر این اساس، بعد سوئیچ‌های تصنعی باید بر اساس خازن‌های پارازیتی کل در گره C انتخاب شود (یعنی $C_{d,subX} + C_{d,subZ}$). علاوه بر این، سوئیچ‌های MUX و سه سوئیچ در گره‌های X ، Y و Z باید تطابق کامل داشته باشند. با این حال، اثرات پارازیتی سوئیچ‌ها در گره D برای سه دنباله سیگنال یکسان است، بنابراین اثرات آن‌ها با کالیبراسیون خودکار از بین می‌رود.

۶- نتایج شبیه‌سازی و پیاده‌سازی

CDC پیشنهادی با استفاده از فناوری استاندارد ۱۸/۰ میکرومتر CMOS طراحی و اجرا شده است. نتایج به ازای منبع تغذیه ۲ ولت بررسی شده است و مقدار جریان اندازه‌گیری شده تغذیه ۱۷۰ میکروآمپر است. طبقات CVC و انتگرال‌گیر از تقویت‌کننده کاسکد تاشده^۱ [۱۲]، با جریان‌های تغذیه ۷۵ میکروآمپر استفاده می‌کنند. بازخورد^۲ و خازن‌های انتگرال‌گیر طبقه مربوطه به گونه‌ای انتخاب شده‌اند که خروجی تقویت‌کننده‌ها به ازای رنج حداکثر خازن ورودی اشباع نشوند. به عنوان مثال، $C_F = 2pF$ و $C_{int} = 10pF$ انتخاب شده است. علاوه بر این، خازن‌های ورودی به ترتیب به صورت بین ۱۰ پیکوفاراد و ۱۰/۲ پیکوفاراد، C_{REF1} برابر صفر پیکوفاراد، C_{REF2} برابر ۰/۵ پیکوفاراد، C_Z برابر ۱۰ پیکوفاراد و خازن‌های C_{P1} و C_{P2} برابر ۲۰ پیکوفاراد انتخاب شده‌اند. منبع جریان انتگرال‌گیر و خازن‌های C_{O1} و C_{O2} به ترتیب ۰/۵ میکروآمپر و ۱ پیکوفاراد انتخاب شده‌اند. خازن نمونه‌برداری C_S برابر با ۱۰ پیکوفاراد است. در شروع فازهای ϕ_1 و ϕ_2 ، بارهای $V_{DD}C_{O1}$ و $V_{DD}C_{O1} + V_{O1}C_S$ به ترتیب به خازن انتگرال‌گیر C_{int} پمپ می‌شوند و سپس توسط I_{int} به عنوان یک برشگر سنکرون حذف می‌شوند. مقایسه‌کننده از یک زوج دیفرانسیلی ساده و به دنبال آن یک اشمیت تریگر^۳ تشکیل شده است. لازم به ذکر است که تأخیر انتشار مقایسه‌کننده با کالیبراسیون خودکار اعمال شده حذف می‌شود، بنابراین از مقایسه‌کننده کند با جریان تغذیه کم ۱۰ میکروآمپر استفاده شده است.

به منظور بررسی غیر ایده‌آل‌های ناشی از سوئیچ‌ها (شکل ۲)، هر دو CVC متداول و بزرگنمایی به عنوان طبقه اول CDC استفاده می‌شوند (شکل ۳-ب). از آنجایی که خازن‌های پارازیتی حسگر تأثیر ناچیزی بر این خطاها دارد، خازن‌های پارازیتی حسگر صفر در نظر گرفته می‌شوند ($C_{P1} = C_{P2} = 0pF$). علاوه بر این، برای کاهش خطای نشست به کمتر از این خطاها، منبع جریان انتگرال‌گیر را به ۰/۲۵ میکروآمپر نصف می‌کنیم. بر این اساس، حداقل فواصل زمانی T_1 و T_2 حدود ۸ میکروثانیه تنظیم شده است. سایر پارامترها به صورت ($C_X = 10.2pF$ ، $C_Z = C_S = 10pF$ ، $C_F = 2pF$) انتخاب می‌شوند، در حالی که برای CVC متداول، از $C_X = 0.2pF$ استفاده کردیم.

شکل ۴ دقت مطلق را برای یک CVC متداول و بزرگنمایی به همراه دقت مطلق محاسبه شده برای یک CVC معمولی در مقابل عرض سوئیچ (W) نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود، نتایج شبیه‌سازی شده برای CVC متداول مطابقت نزدیکی با

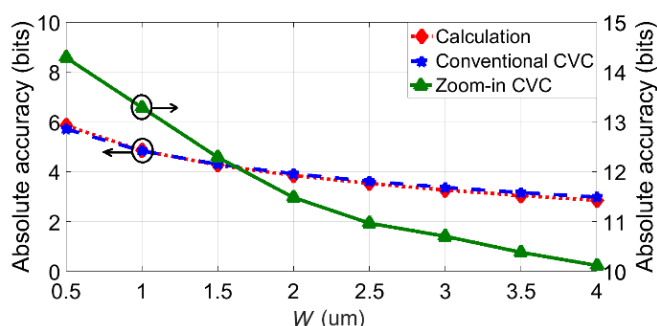
¹ Recycling folded-cascode amplifier

² Feedback

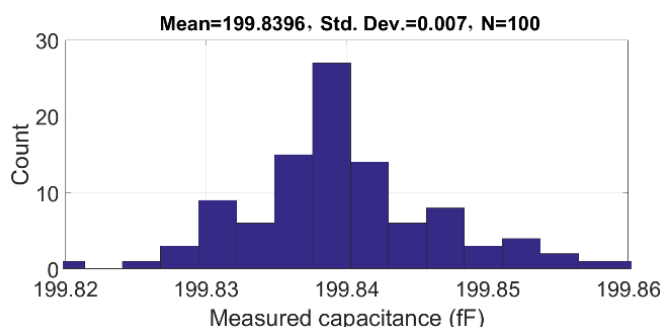
³ Schmitt trigger

تحلیل نظری دارد. همچنین، ساختار بزرگنمایی می‌تواند این اثرات را به طور قابل توجهی حذف کند. با توجه به اینکه بازه زمانی T1 و T2 برای مدار طراحی شده دو برابر شده و خازن‌های پارازیتی صفر شده است، می‌توان مطمئن بود که این خطا تنها به دلیل تزریق بار و خازن پارازیتی سوئیچ است.

به منظور بررسی اثر سوئیچ‌های تصنعی بر خطای مطلق واسط از جمله کالیبراسیون خودکار، از تحلیل مونت کارلو^۱ برای سوئیچ‌های تصنعی استفاده شده است. این بررسی برای ۱۰۰ تکرار و تغییرات ظرفیت حسگر تا ۲۰۰ فمتوفاراد، خازن‌های مرجع C_{REF1} برابر با ۰ پیکوفاراد و C_{REF2} برابر با ۰/۵ پیکوفاراد وقتی که خازن‌های پارازیتی حسگر ۲۰ پیکوفاراد است، تکرار می‌شود. میانگین خطا تقریباً ۰/۱۶ فمتوفاراد و انحراف استاندارد آن σ برابر ۷ آتوفاراد است (شکل ۴).



شکل ۴: دقت مطلق مدارهای CVC متداول و بزرگنمایی به عنوان تابعی از W ($C_{P1}=C_{P2}=0pF$, $C_F=2pF$, $C_Z=C_S=10pF$, $C_X=10.2pF$)
 Figure 4. Absolute accuracy of the conventional and zoom-in CVC circuits as a function of W ($C_X=10.2pF$, $C_Z=C_S=10pF$, $C_F=2pF$, and $C_{P1}=C_{P2}=0pF$)



شکل ۵: تجزیه و تحلیل مونت کارلو سوئیچ‌های تصنعی در CDC بزرگنمایی برای خازن‌های پارازیتی حسگر ۲۰ pF
 Figure 5. The Monte Carlo analysis of dummy switches in the zoom-in CDC for sensor parasitic capacitances of 20pF

علاوه بر این، خطای مطلق CDC بزرگنمایی با و بدون سوئیچ تصنعی تحت تغییرات سنسور تا ۲۰۰ فمتوفاراد و خازن‌های پارازیتی آن ۱۰ پیکوفاراد و ۲۰ پیکوفاراد بررسی شده است. نتایج این تحلیل در شکل ۶-الف نشان داده شده است. در مورد سوئیچ‌های بدون سوئیچ تصنعی، خطای ظرفیت حدود ۸ فمتوفاراد است. با این حال، همان‌طور که انتظار می‌رود، می‌توان مشاهده کرد که این خطا با اضافه کردن سوئیچ‌های تصنعی در گره A و B به طور قابل توجهی کاهش می‌یابد، که منجر به افزایش دقت بیش از ۵ بیت می‌شود.

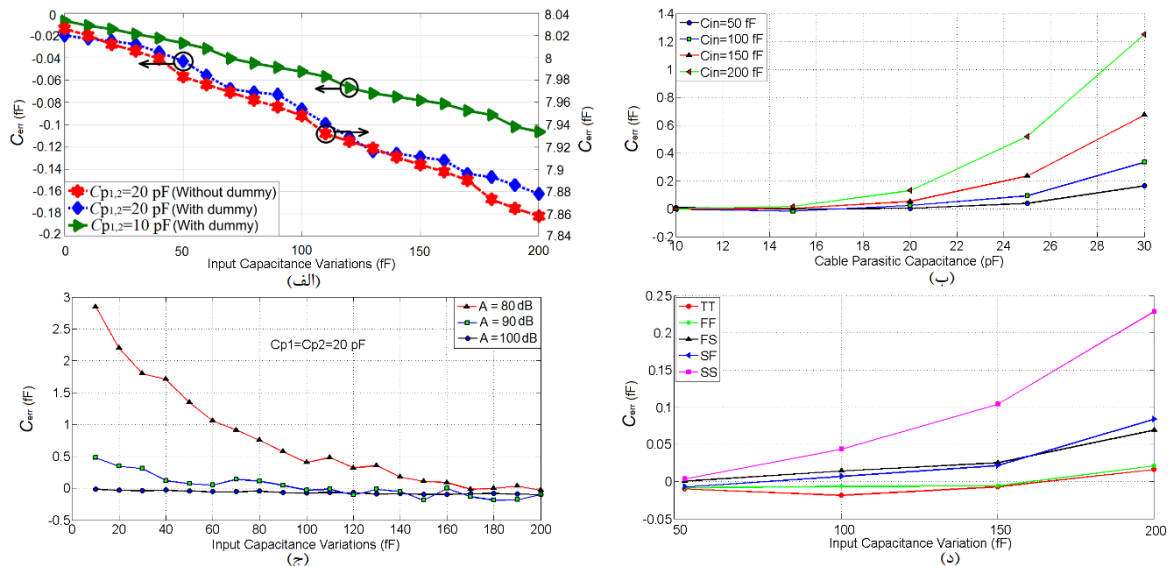
خطای مطلق CDC با توجه به تغییرات خازن حسگر و همچنین خازن‌های پارازیتی کابل تا ۳۰ پیکوفاراد بررسی شد. شکل ۶-ب خطای اندازه‌گیری شده را برای چهار مقدار مختلف تغییرات خازن حسگر نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، این خطا برای خازن‌های کابل زیر ۲۰ پیکوفاراد کمتر از ۰/۲ فمتوفاراد است و با افزایش خازن‌های پارازیتی کابل، دقت سیستم به دلیل خطای نشست کاهش یافته است.

دقت واسط با تغییر خازن حسگر و برای بهره‌های مختلف تقویت‌کننده تحت خازن‌های پارازیتی کابل ۲۰ پیکوفاراد بررسی شد. نتایج شبیه‌سازی در شکل ۶-ج آورده شده است. با توجه به هدف طراحی، برای اطمینان از دقت بالای ۱۰ بیت، به بهره‌های بالاتر

¹ Monte Carlo

از ۹۳ دسی بل نیاز است. همان طور که مشاهده می شود، خطای اندازه گیری خازن حسگر در بهره های کمتر از این مقدار افزایش یافته است.

علاوه بر این، دقت واسط برای گوشه های مختلف نیز بررسی شده است. شکل ۶-د نتایج شبیه سازی را با تغییر خازن حسگر تا ۲۰۰ فمتوفارد و خازن های پارازیتی کابل ۲۰ پیکوفارد نشان می دهد. همان طور که مشاهده می شود خطای مطلق مبدل پیشنهادی تقریباً زیر ۰/۲ فمتوفارد برای همه گوشه ها است که خواسته های طراحی را برآورده می کند.



شکل ۶: خطای مطلق مبدل پیشنهادی با تغییر پارامترهای مختلف مدار و گوشه های مختلف فرایند

Figure 6. Absolute error of the proposed converter versus various circuit parameters and different corners

به منظور تخمین نویز CDC، یک شبیه سازی نویز گذرا برای ۱۰۰ تکرار انجام شد و سپس جیترهای^۱ خروجی برای سه فاز مختلف کالبراسیون خودکار اعمال شده اندازه گیری شد. نویز شبیه سازی گذرا CDC بزرگنمایی در شکل ۷ نشان داده شده است. همان طور که مشاهده می شود، انحراف معیار سه فاز تقریباً در یک محدوده است. با توجه به بازه های زمانی T_{REF1} ، T_X و T_{REF2} انحراف معیار آن ها، درجه تفکیک ظرفیت خازن ۴۷۹ آتوفارد برای زمان اندازه گیری T_{msm} برابر ۱۲۸ میکرو ثانیه اندازه گیری شد.

در نهایت، خلاصه و مقایسه مبدل پیشنهادی با مدارهای واسط اخیر انجام شده است که نتایج آن در جدول ۱ آورده شده است. بازده انرژی این مبدل ها توسط معیار شایستگی^۲ (FOM) با معادلات زیر ارزیابی شده است [۱۷-۱۳].

$$ENOB = \frac{20 \log \left(\frac{Capaci \tan ce Range / 2\sqrt{2}}{Absolute Capaci \tan ce Re solution} \right) - 1.76}{6.02} \quad (4)$$

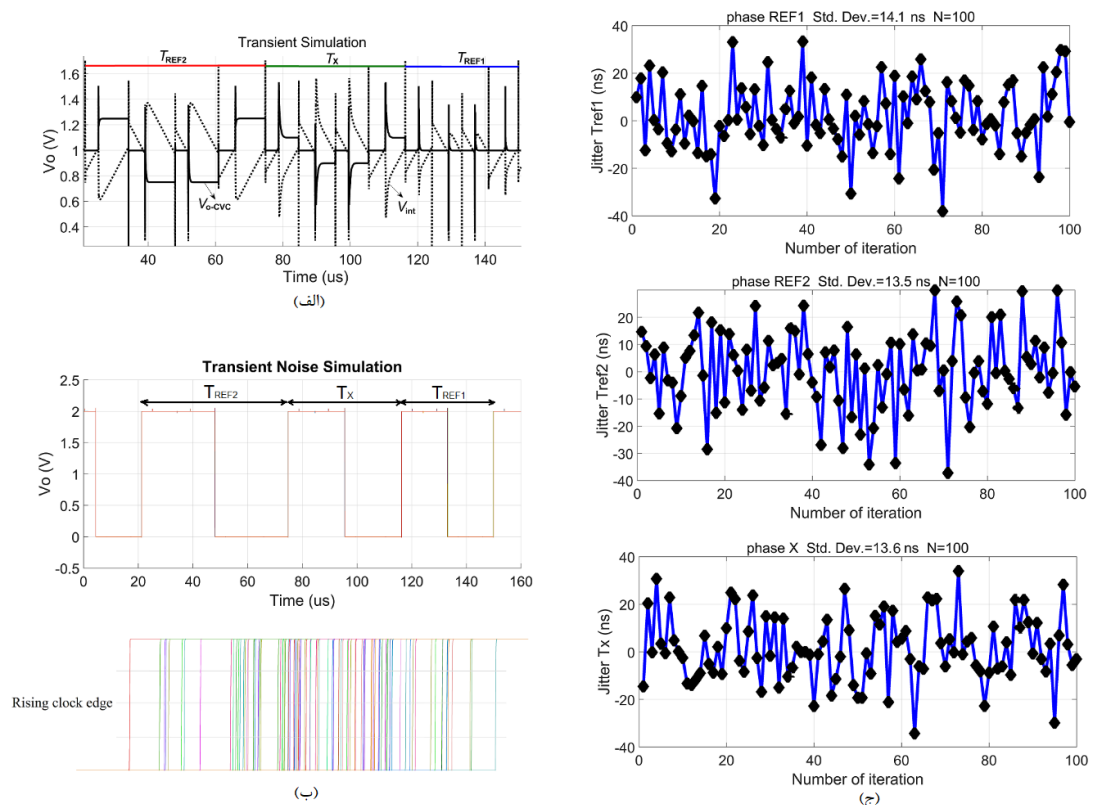
$$FOM = \frac{P_D \times T_M}{2^{ENOB}} \quad (5)$$

که در آن PD تلفات توان، T_M زمان تبدیل و $ENOB$ ^۳ درجه تفکیک موثر بر حسب بیت است. واسط پیشنهادی دارای تعداد موثر بیت ENOB برابر با ۱۲/۶ بیت است که مربوط به بازده انرژی ۶/۹۴ pJ/step است.

¹ Jitter

² Figure of Merit

³ Effective Number of Bits



شکل ۷: (الف) بعضی از سیگنال‌های مهم CDC، (ب) شبیه‌سازی نویز گذرا CDC، (ج) جیت‌های اندازه‌گیری شده به دست آمده از نتایج شبیه‌سازی گذرا CDC

Figure 7. (a) Some important signals of the CDC, (b) Transient noise simulation of the CDC, (c) The measured jitters obtained from the results of the transient simulation of the CDC

جدول ۱: خلاصه عملکرد و مقایسه با مقالات

Table 1: Performance summary and comparison with state-of-the-art works

این تحقیق	JSSC 22 [۱۸]	ISSC 20 [۱۷]	JSSC 20 [۱۶]	JSSC 21 [۱۵]	TCAS 22 [۱۴]	TCAS 18 [۱۳]	TCAS 17 [۵]	مرجع
۰/۱۸	۰/۱۱	۰/۱۸	۰/۰۴	۰/۱۱	۰/۱۸	۰/۱۸	۰/۱۸	تکنولوژی (μm)
زمین شده	فعال	شناور	فعال	فعال	فعال	فعال	زمین شده	نوع حسگر
۲	۱/۵	۱/۸	۰/۶ & ۱/۱	۱/۲	۰/۸ & ۱	۱/۵	۲/۶	ولتاژ تغذیه
۰ ~ ۱۰/۲	۰/۲-۱/۵	۰ ~ ۱۰	۰ ~ ۵	۰ ~ ۳/۱۵	۵/۷	۱۰ ~ ۱۰۰۰۰	۱۰	رنج حسگر (pF)
۰/۴۷۹	۰/۰۲۱۵	۰/۰۴۲	۰/۲۹	۰/۰۱۷۹@1pF	۰/۱۸۶@4pF	۰/۲۰۷	۰/۰۶	درجه تفکیک
								خازن (fF)
۱۲۸	۱۲۰۰	۱۰۰۰	۱۲/۵	۱۰۱۰	۱۸۰	۱۲۸	۳۰۷۲	زمان
								اندازه‌گیری (μs)
۳۴۰	۱۲۰	۵۶۳	۶/۴	۱/۰۲ ~ ۳/۱۹	۲۳/۲	۱۵	۲۳۴۰	تلفات توان
								(μW)
۱۲/۶	۱۴/۳	۱۶/۰۷	۱۲/۳	۱۴	۱۳/۱	۱۳	۱۷/۴	ENOB
								(bits)
۶/۹۴	۷/۱۴	۸	۰/۰۱۶	۰/۰۹۴@1pF	۰/۶۷@4pF	۰/۲۳۴	۴۱/۵	FOM
								(pJ/step)

۷- نتیجه‌گیری

در این تحقیق، یک واسط با دقت بالا بر اساس مدولاتور پریود برای سنسورهای خازنی زمین شده پیشنهاد شد. اثرات غیرایده‌آل CDC مورد بحث قرار گرفت. نشان داده شد که این اثرات غیر ایده‌آل را می‌توان با استفاده از تکنیک بزرگنمایی و استفاده از سوئیچ‌های تصنعی در مسیرهای نامتقارن کالیبراسیون خودکار اعمال شده کاهش داد. در بدترین حالت خطای خازنی کمتر از ۰/۲ فمتوفاراد برای خازن حسگر با مقدار اسمی ۱۰ پیکوفاراد، تغییرات تنها ۲۰۰ فمتوفاراد و خازن‌های پارازیتی حسگر تا ۲۰

پیکوفاراد به دست می‌آید. مجموع تأخیر به دست آمده برای برشگر و کالیبراسیون خودکار ۱۲۸ میکروثانیه است. CDC بزرگنمایی، یک درجه تفکیک ظرفیت خازنی مطلق ۰/۴۷۹ فمتوفاراد با بازده انرژی ۶/۹۴pJ/step را نشان می‌دهد، در ضمن جریان ۱۷۰ میکروآمپر از منبع تغذیه ۲ ولت مصرف می‌کند.

مراجع

- [1] H. Omran, A. Alhoshany, H. Alahmadi and K. N. Salama, "A 33fJ/Step SAR Capacitance-to-Digital Converter Using a Chain of Inverter-Based Amplifiers," *IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers*, vol. 64, no. 2, pp. 310–321, Feb. 2017, doi: 10.1109/tcsi.2016.2608905.
- [2] S. Xia and S. Nihtianov, "Power-Efficient High-Speed and High-Resolution Capacitive-Sensor Interface for Subnanometer Displacement Measurements," *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 61, no. 5, pp. 1315–1322, May 2012, doi: 10.1109/tim.2011.2178678.
- [3] F. Reverter, X. Li and G. C. M. Meijer, "A novel interface circuit for grounded capacitive sensors with feedforward-based active shielding," *Measurement Science and Technology*, vol. 19, no. 2, p. 025202, Jan. 2008, doi: 10.1088/0957-0233/19/2/025202.
- [4] A. Heidary and G. C. M. Meijer, "An integrated interface circuit with a capacitance-to-voltage converter as front-end for grounded capacitive sensors," *Measurement Science and Technology*, vol. 20, no. 1, p. 015202, Nov. 2008, doi: 10.1088/0957-0233/20/1/015202.
- [5] Y. Jung, Q. Duan and J. Roh, "A 17.4-b Delta-Sigma Capacitance-to-Digital Converter for One-Terminal Capacitive Sensors," *IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs*, vol. 64, no. 10, pp. 1122–1126, Oct. 2017, doi: 10.1109/tcsii.2015.2505960.
- [6] Z. Tan, S. H. Shalmany, G. C. M. Meijer and M. A. P. Pertijs, "An Energy-Efficient 15-Bit Capacitive-Sensor Interface Based on Period Modulation," *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, vol. 47, no. 7, pp. 1703–1711, Jul. 2012, doi: 10.1109/jssc.2012.2191212.
- [7] M. S. Arefin, J.-M. Redoute and M. R. Yuce, "A Low-Power and Wide-Range MEMS Capacitive Sensors Interface IC Using Pulse-Width Modulation for Biomedical Applications," *IEEE Sensors Journal*, vol. 16, no. 17, pp. 6745–6754, Sep. 2016, doi: 10.1109/jsen.2016.2587668.
- [8] A. Ahmadpour Bijargah, A. Heidary, P. Torkzadeh and S. Nihtianov, "An accurate and power-efficient period-modulator-based interface for grounded capacitive sensors," *International Journal of Circuit Theory and Applications*, vol. 47, no. 8, pp. 1211–1224, May 2019, doi: 10.1002/cta.2642.
- [9] A. Ahmadpour Bijargah, A. Heidary, P. Torkzadeh and S. Nihtianov, "Design trade-offs of a capacitance-to-voltage converter with a zoom-in technique for grounded capacitive sensors," *International Journal of Circuit Theory and Applications*, vol. 46, no. 12, pp. 2231–2247, Aug. 2018, doi: 10.1002/cta.2557.
- [10] A. Heidary, "A low-cost universal integrated interface for capacitive sensors," Ph.D. dissertation, Delft University of Technology, Delft, The Netherlands, 2011.
- [11] G. Wegmann, E. A. Vittoz and F. Rahali, "Charge injection in analog MOS switches," *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, vol. 22, no. 6, pp. 1091–1097, Dec. 1987, doi: 10.1109/jssc.1987.1052859.
- [12] R. S. Assaad and J. Silva-Martinez, "The Recycling Folded Cascode: A General Enhancement of the Folded Cascode Amplifier," *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, vol. 44, no. 9, pp. 2535–2542, Sep. 2009, doi: 10.1109/jssc.2009.2024819.
- [13] B. Li, W. Wang, J. Liu, W.J. Liu, Q. Yang and W.B. Ye "A 1 pF-to-10 nF generic capacitance-to-digital converter using zero-crossing $\Delta\Sigma$ modulation," *IEEE Trans Circuits Syst I Reg Papers*, vol. 65, no. 7, pp. 2169–2182, 2018, doi: 10.1109/tcsi.2017.2777872.

- [14] P. Yang, Z. Zhang and N. Mei, "A 0.15mm² Energy-Efficient Single-Ended Capacitance-to-Digital Converter," *IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs*, vol. 69, no. 2, pp. 314–318, Feb. 2022, doi: 10.1109/tcsii.2021.3101326.
- [15] H. Li et al., "Energy-Efficient CMOS Humidity Sensors Using Adaptive Range-Shift Zoom CDC and Power-Aware Floating Inverter Amplifier Array," *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, vol. 56, no. 12. Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), pp. 3560–3572, Dec. 2021. doi: 10.1109/jssc.2021.3114189.
- [16] X. Tang et al., "An Energy-Efficient Time-Domain Incremental Zoom Capacitance-to-Digital Converter," *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, vol. 55, no. 11. Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), pp. 3064–3075, Nov. 2020. doi: 10.1109/jssc.2020.3005812.
- [17] H. Jiang et al., "A 117-dB In-Band CMRR 98.5-dB SNR Capacitance-to-Digital Converter for Sub-nm Displacement Sensing With an Electrically Floating Target," *IEEE J. Solid-State Circuits Letters*, vol. 3, pp. 9–12, 2020.
- [18] H. Lee, C. Lee, I. Lee, and Y. Chae, "A 0.033-mm² 21.5-aF to 114.9-aF Resolution Continuous-Time $\Delta \Sigma$ Capacitance-to-Digital Converter Achieving Parasitic Capacitance Immunity Up to 480 pF," *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, vol. 57, no. 10. Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), pp. 3048–3057, Oct. 2022. doi: 10.1109/jssc.2022.3184531.

COPYRIGHTS

©2024 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>



Vol. 13/ No. 52/Summer 2024

Research Article

Improving Efficiency and Reliability in The Seismic Monitoring Systems Based on The Internet of Things by Applying Redundancy in Sensors and Controllers

Iman Zangeneh, PhD Student¹  | Amir Massoud Bidgoli, Associate Professor^{2*}  | Ardeshir Dolati, Professor³ 

¹Department of Computer Engineering, North Tehran Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran,
i.zangeneh@iau-tnb.ac.ir

²Department of Computer Engineering, North Tehran Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran,
am_bidgoli@iau-tnb.ac.ir

³ Department of computer science, Faculty of science, Shahed University, Tehran, Iran,
dolati@shahed.ac.ir

Correspondence

Amir Massoud Bidgoli, Associate Professor of Computer Engineering, North Tehran Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran,
am_bidgoli@iau-tnb.ac.ir

Received: 3 October 2023

Revised: 6 December 2023

Accepted: 18 December 2023

Abstract

Earthquakes are usually associated with damage. Therefore, any action to predict it is necessary. In data monitoring systems, being real-time and accuracy of data play a key role. In this article, a monitoring system based on Internet of Things was proposed for the messaging of seismic data. In the first solution, the lightweight protocol Message Queuing Telemetry Transfer (MQTT) was chosen for messaging. In the second solution, redundancy was applied in the sensor layer using the gray wolf algorithm, and in the third solution «redundancy was applied in the controller layer. The simulation results showed that the redundancy in the sensor and controller layer saved energy consumption by more than thirty percent. Also, the average end-to-end delay was significantly reduced in the second and third solutions. Finally «in the first solution, the rate of successful package delivery for different number of packages was a constant value of 78.98%. But by applying redundancy in the sensor and controller, the package delivery rate increased to over 92%, which can be the result of increasing the number of sensors and controllers and their proper placement.

Keywords: Seismic, Internet of Things, Energy Consumption, Packet Delivery Rate, Bit Error.

Highlights

- Improving the efficiency of the seismic monitoring system by applying the redundancy of the sensors of the sensors layer based on the Internet of Things.
- Applying redundancy in the controller layer of seismography system based on Internet of Things.
- Improving fault tolerance in the communication layer of the Internet of Things by modifying the information transmission mechanisms from the controller to the infrastructure layer.

Citation: I. Zangeneh, A.M. Bidgoli, and A. Dolati, "Improving Efficiency and Reliability in The Seismic Monitoring Systems Based on The Internet of Things by Applying Redundancy in Sensors and Controllers," *Journal of Southern Communication Engineering*, vol. 13, no. 52, pp. 11–34, 2024, doi: 10.30495/jce.2023.1997717.1228, [in Persian].

مقاله پژوهشی

بهبود کارایی و قابلیت اطمینان در سیستم مانیتورینگ داده‌های لرزه نگاری مبتنی بر اینترنت اشیاء با اعمال افزونگی در سنسورها و کنترلرها

ایمان زنگنه^۱ | امیرمسعود بیدگلی^۲ | اردشیر دولتی^۳

چکیده

زلزله معمولاً خسارات همراه است. لذا هر اقدامی در جهت پیش‌بینی آن ضروری است. در سیستم‌های مانیتورینگ داده، بلادرنج بودن و صحت و دقت داده‌ها، نقشی کلیدی دارد. در این مقاله، یک سیستم مانیتورینگ مبتنی بر اینترنت اشیاء برای پیام‌رسانی داده‌های مربوط به لرزه‌نگاری پیشنهاد شد. در راهکار اول، پروتکل سبک وزن انتقال تله‌متری صف پیام (MQTT) برای پیام‌رسانی انتخاب و بررسی شد. در راهکار دوم، با استفاده از الگوریتم گرگ خاکستری، افزونگی در لایه حسگر اعمال شد و در راهکار سوم، افزونگی در لایه کنترلر نیز اعمال شد. نتایج شبیه‌سازی نشان داد که افزونگی در لایه حسگر و کنترلر تا بیش از سی درصد در مصرف انرژی، صرفه جویی ایجاد کرد. همچنین میانگین تاخیر انتها به انتها در راهکار دوم و سوم بصورت معناداری کاهش یافت. نهایتاً در راهکار اول، نرخ تحویل موفق بسته‌ها برای تعداد مختلف بسته‌ها، مقدار ثابت ۷۸/۹۸ درصد بود. اما با اعمال افزونگی در حسگر و کنترلر، نرخ تحویل بسته‌ها به بالای ۹۲ درصد افزایش یافت که این میتواند نتیجه افزایش تعداد حسگرها و کنترلرها و جایگذاری مناسب آنها باشد.

کلید واژه‌ها: زلزله، اینترنت اشیاء، مصرف انرژی، نرخ تحویل بسته، خطای

بیتی

^۱ گروه مهندسی کامپیوتر، واحد تهران‌شمال، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران، i.zangeneh@iau-tnb.ac.ir

^۲ گروه مهندسی کامپیوتر، واحد تهران‌شمال، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران، am_bidgoli@iau-tnb.ac.ir

^۳ گروه علوم کامپیوتر، دانشکده علوم پایه، دانشگاه شاهد، تهران، ایران، dolati@shahed.ac.ir

نویسنده مسئول

^{*}امیرمسعود بیدگلی، گروه مهندسی کامپیوتر، واحد تهران‌شمال، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران، am_bidgoli@iau-tnb.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۱ مهر ۱۴۰۲

تاریخ بازنگری: ۱۵ آذر ۱۴۰۲

تاریخ پذیرش: ۲۷ آذر ۱۴۰۲

<https://doi.org/10.30495/jce.2023.1997717.1228>

۱-مقدمه

زمین لرزه به مجموعه‌ای از لرزش‌ها و ارتعاشات لرزه‌ای اطلاق می‌شود که در اثر آزاد شدن ناگهانی مقدار زیادی انرژی در لیتوسفر^۱ زمین ایجاد می‌شود. این امواج لرزه‌ای از ضعیف تا متوسط تا بسیار شدید هستند. علت اصلی وقوع زلزله فعالیت صفحات تکتونیکی^۲ است [۱]. در نتیجه، پیش‌بینی زلزله به عنوان یکی از پیچیده‌ترین و گران‌ترین فجایع طبیعی به یک کار چالش برانگیز و حیاتی برای بشریت تبدیل شده است. پیش‌بینی مؤثر زلزله این پتانسیل را دارد که تخریب زلزله را به میزان قابل توجهی به حداقل برساند، که برای جامعه و مردم بسیار مناسب است، و به نظر می‌رسد که افزایش علاقه و تحقیقات علمی در مورد پیش‌بینی رویدادهای لرزه‌ای وجود دارد [۲]. از آن سوی برخلاف پیش‌بینی‌های هواشناسی یا حتی هشدارهای سونامی برای زمین‌لرزه‌های دوردست، زمانی کافی برای زلزله‌شناس وجود ندارد که اطلاعات لرزه‌نگاری را بررسی کند و پیام هشدار را تنظیم تصحیح و ارسال نماید [۳].

¹lithosphere

²Tectonic plates

تاکنون رویکردهای مختلفی برای پیش بینی و اعلام هشدار زلزله بکار رفته است، رویکردهایی از قبیل انتقال داده بی سیم^۱، روشهای اندازه گیری ساده^۲، انتشار اکوستیک^۳، رویکرد مبتنی بر سامانه های میکرو الکترومکانیکی^۴، رویکرد مبتنی بر اینترنت اشیا^۵ و استفاده از سنسورهای شیب و جابجایی^۶ [۴].

یکی از این رویکردها که استفاده از آن به سرعت در حال گسترش است راه حل های مبتنی بر اینترنت اشیا است. اینترنت اشیا فناوری نوظهوری است که همه چیز را به اینترنت متصل می کند و به سرعت در حال گسترش است. این فناوری، فناوری جدیدی مانند نظارت بر بلایای طبیعی را به ارمغان می آورد [۵]. از آن سوی، عملکرد سیستم هشدار زودهنگام زلزله، اغلب با چگالی ایستگاه های آن مرتبط است. در زلزله شناسی، به دلیل نیاز بالای تراکم شبکه لرزه ای و پیچیدگی پردازش داده ها، توسعه سیستم هشدار اولیه زلزله^۷ زمان واقعی با کارایی بالا هنوز با چالش بزرگی مواجه است [۶]. استفاده از اینترنت اشیا و فناوری های مرتبط با آن می تواند قابلیت های این سیستم ها را افزایش دهد و ابزارهایی برای تجزیه و تحلیل، ذخیره و پردازش داده ها و همچنین نظارت کارآمد دستگاه ها فراهم کند.

از سوی دیگر، لرزه سنج های سنتی می توانند دقیقاً زلزله ها را ثبت کنند، اما قادر به پردازش آنها در محل برای راه اندازی مکانیسم هشدار و واکنش نیستند. در مقابل، دستگاه های اینترنت اشیا مجهز به شتاب سنج و پردازنده می توانند سیگنال های زلزله را در زمان واقعی ضبط و شناسایی کنند و پیام های هشدار را برای کاربران اطراف ارسال کنند [۷]. برای مثال، اخیراً دستگاه های تلفن همراه، مانند گوشی های هوشمند و دستگاه های اینترنت اشیا، با استفاده از شتاب سنج های داخلی خود برای شناسایی زمین لرزه ها با موفقیت مورد استفاده قرار گرفته اند [۸]. بدیهی است با گسترش و تراکم شتاب سنج های مبتنی بر اینترنت، دقت، سرعت و قابلیت اطمینان پیام های هشدار نیز افزایش می یابد. لذا دستگاه های اینترنت اشیا مجهز به شتاب سنج های کم هزینه، به عنوان ابزاری برای تشخیص زلزله در زمان واقعی پیشنهاد شده اند [۹]. همچنین بخش قابل توجهی از روش های پیش بینی زلزله بر اساس اطلاعات مربوط به زمین لرزه هایی است که قبلاً اتفاق افتاده است [۱۰]. لذا افزایش و تراکم در وسایل جمع آوری و ارسال داده ها با سرعت و دقت مناسب، بر عملکرد سیستم پیش بینی تاثیر خواهد داشت. چیزی که در تکنولوژی اینترنت اشیا بخوبی می توان از آن بهره برد.

در سال های اخیر، جامعه لرزه نگاری بر مطالعه دستگاه های کم هزینه به منظور ایجاد شبکه های پایش لرزه ای متراکم تر برای اجرای خدمات هشدار زودهنگام زلزله متمرکز شده است. شبکه های لرزه ای متراکم تر، زمان پاسخگویی سریع تر و دقت بالاتری را در تشخیص و مکان یابی زلزله ارائه می کنند [۱۱].

لذا در این مقاله، یک سیستم پیام رسانی و اعلام هشدار مبتنی بر اینترنت اشیا، با تکیه بر تراکم و افزونگی دستگاه های سنجش هشدار، پیشنهاد می شود. برای پیام رسانی، با توجه به شرایط ویژگی محیطی مختلف، پروتکل سبک وزن MQTT^۸ بکار برده می شود. برای افزایش دقت، سرعت، قابلیت اطمینان و کارایی سیستم پیام رسانی در مدل سه لایه ای پیشنهادی، افزونگی در حسگرهای اینترنت اشیا را هم در لایه حسگر و هم در لایه کنترلر خواهیم داشت.

در بخش دوم، برخی از کارهای مرتبط انجام شده در زمینه بکارگیری اینترنت اشیا در فرایند زلزله نگاری و پیام رسانی آورده شده است. در بخش سوم، به تشریح راه حل پیشنهادی برای مساله پیام رسانی زلزله پرداخته می شود. در قسمت اول آن، یک راهکار پایه پیام رسانی بر مبنای پروتکل MQTT^۸ ارائه می شود. در قسمت دوم به تشریح بکارگیری افزونگی در لایه حسگر سیستم پرداخته می شود. در قسمت سوم، افزونگی در لایه کنترلر را خواهیم داشت. در بخش چهارم، به شبیه سازی سیستم

¹wireless data transfer

²Simplified measuring methods

³Acoustic Emission

⁴MEMS based approach

⁵IoT based approach

⁶Using Tilt and Displacement Sensors

⁷Earthquake Early Warning

⁸Message Queuing Telemetry Transport

پرداخته می‌شود و نتایج حاصل از اجرای شبیه سازی در محیط متلب برای هر سه راهکار آورده می‌شود و نتایج مقایسه و بررسی می‌شود. در بخش پنجم و پایانی هم نتیجه‌گیری آورده می‌شود.

۲-تاریخچه

سارا مک براید و همکارانش [۳] به تشریح یک سیستم هشدار زود هنگام زلزله به نام shakealert در سواحل غربی ایالات متحده پرداخته است. سیستم ShakeAlert در میان دیگر پلتفرم‌های هشدار عمومی مانند سیستم عامل تلفن همراه، برنامه‌های تلفن هوشمند و سیستم مدیریت اضطراری فدرال یکپارچه هشدار و هشدار عمومی IPAWS را استفاده می‌کند. بسته به تراکم ایستگاه لرزه‌ای نزدیک کانون زلزله، فاصله بین مرکز زلزله و مکان کاربر و مسیر توزیع هشدار، هشدارها ممکن است قبل، در حین یا پس از رسیدن لرزش به یک مکان خاص دریافت شوند. لذا مدت هشدار که سیستم ShakeAlert می‌تواند ارائه دهد بسیار متغیر است و اغلب تنها چند ثانیه است. برای کاربرانی که در نزدیکی یک مرکز زلزله قرار دارند، هشدارها ممکن است پس از شروع لرزش قوی دریافت شود. آنها با بررسی داده‌ها بین محیط آزمایش کنترل‌شده و محیط واقعی، به بررسی آمار تأخیر پرداختند و دریافتند که با وجود تفاوت‌های زیاد در اندازه‌های جمعیت، تأخیرها پیام‌رسانی در هر دو محیط مشابه بوده است. آنان همچنین به بررسی کاربرد تلفن‌های همراه هوشمند و غیر هوشمند پرداختند و دریافتند که تلفن‌های غیر هوشمند مقرون به صرفه می‌توانند علایم هشدار را به عنوان گوشی‌های هوشمند سریع دریافت کنند.

سارا مک براید و همکارانش [۱۲] همچنین به بررسی جنبه‌های دیگری از سیستم اعلام هشدار shakeAlert پرداخته اند. آنها در شش مرحله بررسی خود را انجام داده اند:

- ۱- ارزیابی عملکرد ShakeAlert و سرعت انتقال پیام‌ها،
- ۲- توصیف رفتار و پاسخ انسان به هشدارهای زلزله،
- ۳- ارائه درخت تصمیم برای صدور پیام‌های پس از هشدار،
- ۴- طراحی مجموعه‌ای حیاتی از سناریوهای پیام‌رسانی پس از هشدار،
- ۵- شرح و بسط این سناریوها با الگوهای پیام برای انواع کانال‌های ارتباطی،
- ۶- توسعه یک نوع شناسی هشدارهای زلزله.

آنها همچنین روش‌هایی را برای نظارت و ارزیابی پیام‌های پس از هشدار برای بهبود مستمر سیستم بررسی کرده‌اند. جیانگهونگ لیانگ و همکارانش [۱] یک مطالعه مبتنی بر شبکه اینترنت اشیا مرتبط با تشخیص زلزله انجام داده‌اند. اکثر مدل‌های قبلی نتوانستند بین زلزله و سایر صداهای ارتعاشی خارجی که ممکن است به دلیل ساخت و ساز یا سایر منابع خارجی ایجاد شوند، تمایز قائل شوند. آنها تحلیل ساختاری عمیق روی ساختمانی که حسگرها باید در آن قرار گیرند، انجام دادند. سپس حسگرهای مختلف و خواص و کارایی آنها در تشخیص زلزله را به تفصیل توضیح داده‌اند. از سه مدل یادگیری ماشین: رگرسیون لجستیک^۱، ماشین بردار پشتیبان^۲ و شبکه عصبی کانولوشنی^۳ استفاده شد و نتیجه‌گیری شد که مدل شبکه عصبی بالاترین دقت را دارد.

رستم پیرماگومدوف و همکارانش [۱۰] یک سیستم نظارت بر رفتار حیوانات برای پیش بینی زلزله با استفاده از اینترنت اشیا ارائه کرده‌اند. این سیستم از حسگرهای اینرسی و بینایی رایانه‌ای برای جمع‌آوری داده‌ها در مورد رفتار حیوانات استفاده می‌کند. پردازش داده‌ها و تجزیه تحلیل داده‌ها بر روی سرور مرکزی انجام می‌شود. آنها از دستگاه جمع‌آوری داده استفاده کرده‌اند. این دستگاه شامل یک شتاب‌سنج، یک ژيروسکوپ، یک بسته باتری عظیم و یک میکروکنترلر NodeMCU است که یک مشتری^۴ MQTT است. سروری که داده‌ها روی آن پردازش می‌شود نیز یک مشتری MQTT بوده و آن را از طریق کارگزار MQTT دریافت کرده است.

¹Logistic Regression

²Support Vector Machine (SVM)

³Convolutional neural network

⁴Client

کانیکا ساینی و همکارانش [۱۲] در تحقیق خود، چارچوب نظارتی و پیش‌بینی زلزله هوشمند مبتنی بر اینترنت اشیا با تطابق مه و محاسبات ابری پیشنهاد داده‌اند. آنها از اینترنت اشیا برای جمع‌آوری داده‌ها از حسگرها و انتقال آن به لایه مه، برای پیش‌پردازش، استخراج ویژگی، انتخاب و طبقه‌بندی با استفاده از جنگل تصادفی استفاده کرده‌اند. علاوه بر این، از سیستم استنتاج فازی عصبی تطبیقی^۱ برای پیش‌بینی بزرگی زلزله در لایه ابر استفاده شده است. در این تحقیق، یک مدل سه لایه ای برای مانیتورینگ داده‌های زلزله پیشنهاد شده است از جمله لایه سنجش داده، لایه مه، لایه ابری ارتباطی. آنان در تحقیق خود دریافته‌اند که اگر داده‌ها نزدیک به جایی که به دست می‌آیند پردازش شوند، تأخیر را می‌توان کاهش داد. بعلاوه اظهار داشته‌اند که یک اینترنت اشیا یکپارچه همراه با ترکیب محاسباتی مه-ابر می‌تواند برای نظارت و پیش‌بینی زمین لرزه‌ها کارآمدتر و مؤثرتر مورد استفاده قرار گیرد.

آنا ماریا زامبرانو و همکارانش [۱۳] یک معماری مبتنی بر اینترنت اشیا برای سیستم اعلام هشدار زلزله پیشنهاد کردند. آنها گوشی‌های هوشمند را به عنوان دروازه‌ای برای انتقال اطلاعات از حسگرهای تعبیه‌شده‌شان مانند شتاب‌سنج پیشنهاد کردند. معماری پیشنهادی برای ادغام و پردازش داده‌های جمع‌آوری شده، با امکان ترکیب سنسورهای دیگر خارج از تلفن‌های هوشمند، مانند لرزه‌نگارها و تاریخ تولید در سکوی هماهنگ‌سازی اعلام هشدار است. این سیستم در یک محیط شبیه‌سازی شده آزمایش شده است تا آن را آموزش دهد و موارد کاذب را حذف کند و سیستم‌های هشدار اولیه از این نوع را بهبود بخشد. معماری پیشنهادی شامل شبکه شتاب‌نگار سلسله مراتبی سه لایه برای سیستم اعلام هشدار زلزله است. در لایه اول، تلفن‌های هوشمند به عنوان واحدهای پردازش استفاده می‌شوند و نمونه‌ها را به سرور میانی مربوط به لایه ارسال می‌کنند. در لایه دوم به محض اینکه تلفن‌های هوشمند پس از غلبه بر فرآیندی که به طور خاص طراحی شده است، یک قله لرزه‌ای را تشخیص دهد. هر تلفن هوشمند تصمیم می‌گیرد که آیا یک رویداد لرزه‌ای وجود داشته است یا خیر، و بلافاصله به کاربران خود اطلاع می‌دهد و در همان زمان، حادثه را به مرکز کنترل لایه سوم، اطلاع می‌دهد.

یانت چاوز ریورا و همکارانش [۱۴] یک سیستم مبتنی بر آردوینو ارائه داده‌اند که قادر به اندازه‌گیری، ثبت و انتقال داده‌های هواشناسی، اینرسی و موقعیتیابی در زمان واقعی از مکان‌های دوردست است که قادر به جمع‌آوری داده‌ها برای هشدار زلزله و برای نظارت بر محیط زیست است. این سیستم شامل حسگرهایی شتاب‌سنج، ژيروسکوپ، دماسنج، مغناطیس سنج، مکان‌یاب، فشارسنج، رطوبت‌سنج، اشعه ماوراء بنفش و سنسور کیفیت هوا برای تعیین آب و هوا یا رویدادهای حرکتی غیرعادی به عنوان زلزله در مکان‌های دور افتاده است. سیستم جاسازی شده را می‌توان به Raspberry Pi متصل کرد تا داده‌ها را از طریق پروتکل MQTT و پروتکل انتقال ابرمتن^۲ انتقال دهد. اطلاعات را می‌توان توسط هر دستگاه متصل به اینترنت به بازیابی کرد. همچنین، این سیستم از دو دستگاه اصلی تشکیل شده است: سیستم IAAPP-MET 1 و Raspberry Pi 3. هر دو برای اندازه‌گیری، ذخیره و ارسال داده‌ها از طریق پروتکل‌های MQTT یا HTTP با هم کار می‌کنند.

پایولو پیرلیونی و همکارانش [۱۱] یک دستگاه هشدار اولیه مبتنی بر اینترنت اشیا را بر اساس فناوری سیستم‌های الکترومکانیکی پیشنهاد و ارزیابی کرده‌اند. آنها همچنین پیشنهاد ادغام دستگاه در معماری اینترنت اشیا برای تشخیص رویداد، نظارت بر دستگاه و قابلیت انتشار هشدار ارائه می‌کند. آنها با ارزیابی نتایج خود بیان داشتند که عملکرد سیستم هشدار زود هنگام زلزله اغلب با چگالی ایستگاه‌های آن مرتبط است. استفاده از اینترنت اشیا و فناوری‌های ابری می‌تواند قابلیت‌های این سیستم‌ها را افزایش دهد و ابزارهایی برای تجزیه و تحلیل، ذخیره و پردازش داده‌ها و همچنین نظارت کارآمد دستگاه‌ها فراهم کند. علاوه بر این، پیشرفت‌های فناوری در سیستم‌های میکرو الکترومکانیکی امکان ایجاد دستگاه‌های پایش لرزه‌ای کم‌هزینه و کوچک را فراهم کرده است که می‌توانند برای ایجاد شبکه‌های لرزه‌ای متراکم‌تر مورد استفاده قرار گیرند. در نهایت نتایج ارزیابی عملکرد نشان می‌دهد که این دستگاه قادر است رویدادهایی با بزرگی بیشتر از ۴/۱ ریشتر و در فاصله کمتر از ۳۰ کیلومتری را تشخیص دهد.

سیونگ کیونگ کیم و همکارانش [۸] یک سیستم اعلام هشدار مبتنی بر شتاب‌سنج‌های ارزان قیمت اینترنت اشیا با تأکید بر حل مشکل نویزهای ناخواسته پیشنهاد کرده‌اند. آنها دریافتند در محیط مورد بررسی سیگنال‌های ثبت‌شده در دستگاه‌های

¹Adaptive Neural Fuzzy Inference System

²Hyper Text transfer Protocol (HTTP)

اینترنت اشیا به دلیل دو عامل اصلی نويز دارند: ساختمان‌ها و سازه‌های شهری که این دستگاه‌ها در آن نصب می‌شوند و مبادله هزینه و کیفیت آنها. بنابراین، در این کار، مکانیزمی برای مقابله با مشکل هشدارهای کاذب در دستگاه‌های اینترنت اشیا ارائه می‌شود. آنها شبکه عصبی مصنوعی پیشنهادی خود را با اندازه‌های پنجره و ویژگی‌های مختلف از ۲ ثانیه تا ۶ ثانیه و با شدت‌های مختلف زلزله آزمایش کرده و دریافتند که تنظیم اندازه پنجره و ویژگی در یک بازه زمانی خاص (یعنی ۴-۵ ثانیه) می‌تواند عملکرد مدل را بهبود بخشد. علاوه بر این، یک سکوی هدایت مسیر تخلیه که موقعیت کاربر را در نظر می‌گیرد پیشنهاد شده است. سکوی پیشنهادی از طریق ارتباط بین سرور و دستگاه‌های کاربر، اطلاعات را به دستگاه‌های کاربر در زمان واقعی ارائه و تجسم می‌کند. در صورت بروز فاجعه، پناهگاه‌های امن بر اساس اطلاعات وارد شده از سرور انتخاب می‌شوند و مسیرهای عابر پیاده ارائه می‌شود.

ونیتا بابو و ویتنوراجا [۵] یک سیستم پیشنهادی مبتنی بر فناوری اینترنت اشیا برای تجزیه و تحلیل زمان واقعی سیل و زلزله ارائه داده و بیان داشته‌اند که این سیستم می‌تواند مناطق آسیب دیده سیل و زلزله را نظارت کند. این سیستم رصدخانه سیل و زلزله را به عنوان یک سیستم هشدار و هشدار برای نظارت موثر بر مناطق بحرانی مستعد سیل و زلزله در زمان واقعی بدون هزینه و اقدامات ایمنی ارایه می‌کند. سیستم پیشنهادی همچنین به مقامات در مورد حضور یک انسان در منطقه هشدار می‌دهد. همچنین برای مواقع اضطراری با استفاده از انرژی خورشیدی منبع پشتیبان تهیه می‌کند. طراحی سیستم پیشنهادی شامل یکپارچه‌سازی حسگرها به میکروکنترلر، فرستنده رادیو فرکانسی^۱ و گیرنده برای ارتباطات دوربرد و سکوی اینترنت اشیا برای بررسی و تجسم مقادیر سنسور آپلود شده است.

آمینگ وو و همکارانش [۷] در تحقیق خود، یک سیستم تشخیص زلزله تحت شبکه، با نام CrowdQuake با سنسور شتاب سیمد گوشی هوشمند و یک مدل تشخیص زلزله مبتنی بر یادگیری عمیق را ارائه کردند. برای یک سال عملیات، این سیستم مجموعه‌ای از زمین لرزه‌ها را شناسایی کرده و داده‌های مختلف زلزله و غیرزلزله را جمع‌آوری کرد. سپس آنها در مورد چگونگی گسترش آن در سراسر کشور کره جنوبی چالش‌های زیر مورد بررسی قرار دادند: (۱) استقرار حسگر برای شبکه بسیار متراکم، (۲) عملکرد تشخیص زلزله با استفاده از یک مدل یادگیری عمیق، و (۳) طراحی سیستم با کارایی بالا و مقیاس‌پذیر برای پردازش داده‌های بزرگ. این سیستم بهبودیافته توانست داده‌های ارسال شده از ۸۰۰۰ حسگر اینترنت اشیا را پیام‌رسانی کند و با استفاده از یک مدل تشخیص جدید پیشنهادی، زلزله را در چند ثانیه تشخیص دهد. علاوه بر این، سیستم پیشنهادی تمام داده‌های شتاب ارسال شده از سنسورها را ذخیره کرده و سطوح نويز آنها را ارزیابی کرده است. بعلاوه داده‌های جمع‌آوری شده برای آموزش مدل یادگیری عمیق استفاده شده است.

ارشاد خان و همکارانش [۹] در تحقیق خود یک رویکرد ارائه کرده‌اند که با استفاده از چندین گوشی هوشمند واقع در یک منطقه نزدیک، زلزله را شناسایی می‌کند تا توانایی تشخیص زلزله رویکرد مستقل بدون زیرساخت‌های سیستم و شبکه را بهبود بخشد. در این تحقیق، گوشی‌های هوشمند واقع در یک منطقه جغرافیایی نزدیک، یک شبکه لرزه‌نگاری ایجاد می‌کنند تا زلزله‌ها را تشخیص دهند. هنگامی که تلفن هوشمند با استفاده از الگوریتم تشخیص زلزله بر اساس یک شبکه عصبی، حرکتی شبیه به زلزله را تشخیص می‌دهد، نتیجه تشخیص را برای گوشی‌های هوشمند مجاور ارسال می‌کند. پس از دریافت نتایج تشخیص از گوشی‌های هوشمند مجاور، هر گوشی هوشمندی که در شبکه لرزه‌نگاری شرکت می‌کند، یک فرآیند تصمیم‌گیری را انجام می‌دهد و زلزله را تأیید می‌کند و سپس یک هشدار را به صورت لحظه‌ای اعلام می‌کند.

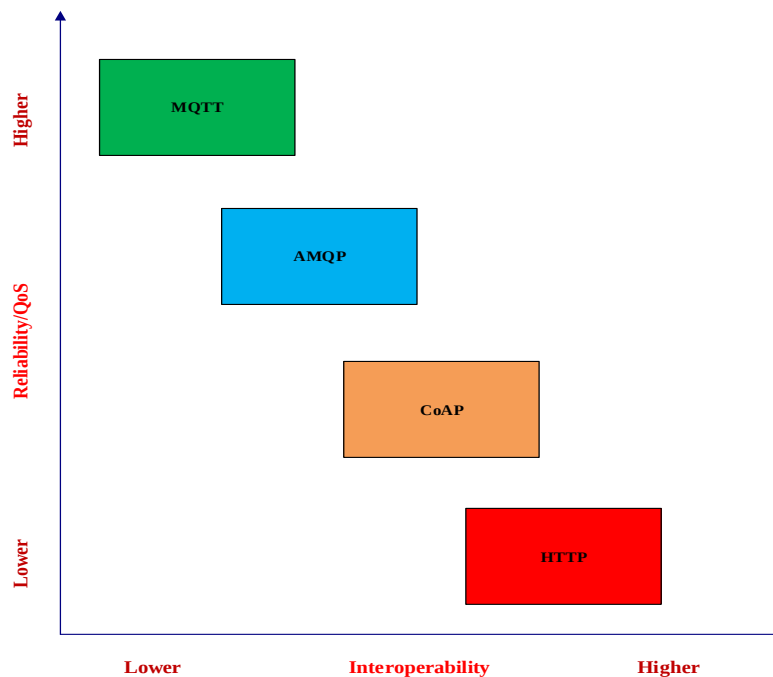
پیترو بوکادورو و همکارانش [۱۵] در تحقیق خود یک سیستم مانیتورینگ زلزله و آب و هوا مبتنی بر اینترنت اشیا بنام quakesense را معرفی می‌کنند. این سیستم از دو فناوری MQTT بهره می‌برد و ادعا می‌کند که امکان مانیتورینگ تقریباً بلادرنگ در زمان واقعی برای اعلان رویدادهای لرزه‌نگاری از طریق یک رابط مبتنی بر وب فراهم می‌کند.

¹RF

۳- روش پیشنهادی

زمین لرزه از پیچیده‌ترین و مخرب‌ترین بلایای طبیعی است که انسان با آن مواجه می‌شود. در نتیجه، پیش بینی زلزله یک کار چالش برانگیز و حیاتی است. پیش‌بینی مؤثر و اعلام هشدار برای زلزله این پتانسیل را دارد که تخریب زلزله را به میزان قابل توجهی به حداقل برساند [۲]. لذا هر گونه تلاش در جهت کاهش تاخیر و افزایش قابلیت اطمینان در سیستم پیام‌رسانی و اعلام هشدارهای داده‌های لرزه‌نگاری مفید و کارا خواهد بود. از آن سوی سیستم‌های موجود برای پایش، تشخیص و هشدار اولیه این زمین لغزش‌ها از قبیل تداخل سنجی ماهواره‌ای راداری، اسکن لیزری، تصویربرداری با وضوح بالا از طریق ماهواره‌ها و شبکه‌های حسگر ژئوفیزیک یا برای استقرار در مناطق وسیع بسیار گران هستند یا دقت کمتری دارند یا فاقد ویژگی‌های بلادرنگ مورد نیاز برای تشخیص زمین لغزش هستند [۱۳]. لذا، در سیستم‌های مانیتورینگ داده، به رغم مزایا و ویژگیها، یکی از موضوعات مورد توجه و چالش برانگیز قابلیت اطمینان بوده است [۱۶، ۱۷].

از طرفی گستردگی روزافزون کاربرد شبکه‌های مانیتورینگ که عموماً از نوع بیسیم هستند، لزوم استفاده از پروتکل‌های سبک وزن که مصرف انرژی پایینی نیز دارند را دو چندان کرده است. این موضوع بطور خاص در محیط‌های مختلف و متنوع نمود بیشتری پیدا می‌کند [۱۸]. با بررسی و مقایسه پروتکل‌ها می‌بینیم که در بین پروتکل‌های موجود برای ارتباطات شبکه حسگر گسترده که مستلزم استفاده از حسگرهای با پهنای باند پایین و توان مصرفی کم است، به نحوی که تبادل اطلاعات و پیام حتی‌الامکان به صورت قابل اطمینان و بلادرنگ بر مبنای اینترنت اشیا باشد پروتکل MQTT پروتکلی مناسب است [۱۹-۲۱]. شکل ۱، مقایسه‌ای بین پروتکل MQTT با سه پروتکل پیام‌رسانی AMQP^۱، CoAP^۲ و HTTP را نشان می‌دهد. همانطور که از شکل پیداست، پروتکل MQTT دارای بالاترین قابلیت اطمینان-کیفیت سرویس است. لازم به یادآوری است که این پروتکل دارای سه سطح از کیفیت سرویس است و از پروتکل اتصال‌گرای TCP به عنوان پروتکل حمل و نقل استفاده می‌کند.



شکل ۱: مقایسه قابلیت اطمینان پروتکل MQTT با پروتکل‌های AMQP، CoAP و HTTP [۲۰]

CoAP and HTTP [20]. Figure 1. Comparison of reliability of MQTT with AMQP

لذا با بررسی و مقایسه این پروتکل‌های پیام‌رسانی موجود برای ارتباطات شبکه سنسوری گسترده که مستلزم استفاده از حسگرهای با پهنای باند پایین و توان مصرفی کم است به نحوی که تبادل اطلاعات و پیام حتی‌الامکان به صورت قابل اطمینان

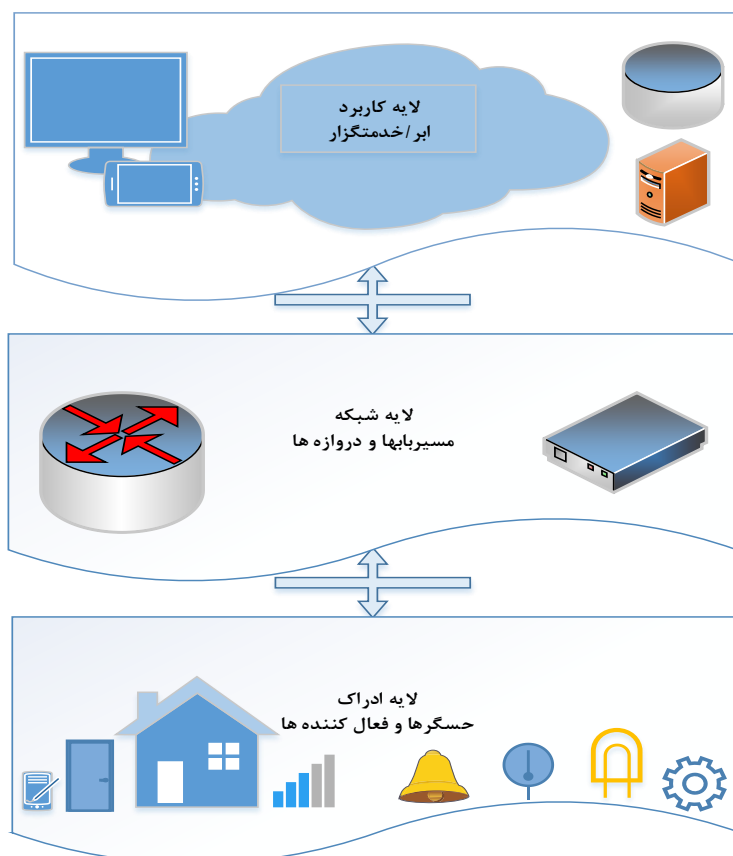
^۱Advanced Message Queuing Protocol

^۲Constrained Application Protocol

و بلادرنگ بر مبنای IoT^۱ باشد پروتکل مناسب انتخابی MQTT است. بنابراین با توجه به اینکه محدوده مورد تحقیق ما که شبکه گسترده‌ای از حسگرهاست که در مقیاس بزرگ جغرافیایی نسبت به تبادل اطلاعات و مانیتورینگ می‌پردازند، این پروتکل انتخاب شده است.

از سوی دیگر، با توجه به گستردگی شبکه مورد مطالعه و شرایط مختلف محیطی، هر یک از عناصر شبکه در معرض خرابی و در نتیجه کاهش قابلیت اطمینان هستند. از طرفی، هرچند که این پروتکل در حالت کلی از قابلیت اطمینان بالایی برخوردار است اما در این پروتکل با تعریف سه سطح از کیفیت سرویس، رسیدن به قابلیت اطمینان بالاتر منجر به تاخیر انتشار نیز می‌شود که این با بلادرنگی سیستم در تقابل است.

لذا ما به دنبال کاهش تاخیر و افزایش قابلیت اطمینان و کارایی سیستم پیام‌رسانی از طریق ایجاد افزونگی در لایه حسگر و کنترلر سیستم پیام‌رسانی مبتنی بر اینترنت اشیا بر مبنای پروتکل پیام‌رسانی سبک وزن MQTT هستیم و پیشنهاد انجام اصلاحاتی برای بهبود عملکرد این پروتکل در قالب سه راهکار هستیم. برای پیام‌رسانی نیز، از بین معماری‌های چند لایه از قبیل معماری سه لایه، چهار لایه و پنج لایه، با توجه شرایط محیط مورد نظارت و به جهت سادگی عملکرد و کاهش سربار سیستم، معماری سه لایه را پیشنهاد می‌دهیم. در شکل ۲ معماری سه لایه پیشنهادی برای پیام‌رسانی آمده است.



شکل ۲: مدل سه لایه ای پیشنهادی سیستم مانیتورینگ پیام‌رسانی مبتنی بر اینترنت اشیا بر مبنای پروتکل MQTT

Figure2. The proposed three-layer model of the messaging monitoring system based on the Internet of Things on the MQTT protocol

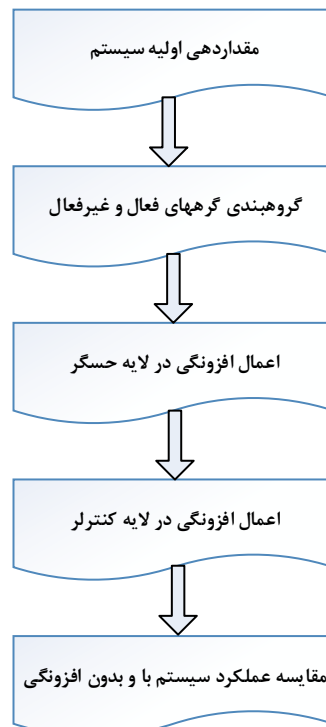
همانگونه که در شکل ۲ آمده است، در لایه پایینی این مدل اشیای مختلف حسگر قرار دارند که وظیفه جمع‌آوری داده‌های مختلف مورد نظر سیستم را بر عهده دارند و بایستی این داده‌ها را بصورت بلادرنگ به لایه بالاتر ارسال کنند. این اشیای حسگرهایی هستند که بر مبنای تکنولوژی اینترنت اشیا متصل شده‌اند؛ که می‌تواند نقاط مختلف محیطی تعبیه شده باشد. لایه دوم و میانی لایه کنترلر است که در واقع متناظر با بروکر^۲ در پروتکل MQTT است که وظیفه انجام عملیات پیام‌رسانی داده‌ها از اشیای لایه

¹Internet of Things

²broker

حسگر تحت پوشش خود را دارد. داده‌ها از لایه کنترلر به لایه بالایی کابرد ارسال می‌شود. در واقع بروکرها واسطه‌های میانی هستند که پیام‌های دریافتی از حسگرها را پس از جمع‌آوری و پایش و مانیتور به لایه کابرد، که ممکن است در محل دیگری واقع باشد ارسال و تبادل می‌کند. در لایه کاربرد، داده‌های دریافتی از کنترلرهای مختلف مورد ارزیابی و تجزیه و تحلیل و تصمیم‌گیری قرار می‌گیرد و هشدارهای لازم صادر می‌شود. برای پیاده‌سازی این سیستم می‌توان از ماژولهای آردوینو^۱ مثل Raspberry Pi3 استفاده کرد.

بنابراین، با توجه به توضیحات قبل در خصوص ضرورت بهبود عملکرد و قابلیت اطمینان سیستم پیام‌رسانی و کاهش تاخیر انتشار و نیز توجه به معماری سه لایه پیشنهادی برای پیام‌رسانی، روالی برای کاهش تاخیر و افزایش قابلیت اطمینان و کارایی سیستم طبق شکل ۳ پیشنهاد شده است.



شکل ۳: روال پیشنهادی برای بهبود عملکرد سیستم پیام‌رسانی زلزله

Figure3. Proposed procedure to improve the performance of the earthquake messaging system

در ابتدا سیستم مانیتورینگ را در سه لایه حسگر، کنترلر و کاربرد با مقادیر مشخص پیاده می‌کنیم. سپس در راهکار اول، پروتکل MQTT را برای پیام‌رسانی بکار برده و به عنوان مبنایی برای مقایسه با سایر راهکارها، افزونگی در سیستم پیام‌رسانی نداریم؛ بلکه پیشنهاد می‌شود به جهت کاهش مصرف انرژی، گره‌ها به دو دسته گره فعال و گره آماده‌باش^۲ تقسیم شوند. تقسیم گره‌ها به دو دسته فعال و غیرفعال باعث صرفه جویی در مصرف انرژی توسط حسگرهای محیط می‌شود. در راهکار دوم، به جهت پوشش بهتر محیط و پوشش گره‌های خراب احتمالی، افزونگی در لایه حسگر را خواهیم داشت، بطوری‌که تعداد حسگرها را در نقاط مختلف محیط مورد بررسی، افزایش می‌دهیم. استفاده از سنسورهای بیشتر در لایه حسگر، علاوه بر اینکه باعث پوشش گره‌های خراب و ناحیه‌های خرابی می‌شود، دقت و تعداد نمونه‌های اندازه‌گیری را افزایش می‌دهد. در راهکار سوم، برای افزایش قابلیت اطمینان و کارایی رویکرد افزونگی در لایه کنترلر پیشنهاد می‌شود تا در صورت خرابی کنترلرهای سیستم و یا ایجاد نواحی خرابی تحمل‌پذیری خطا افزایش یابد. در نهایت نیز، این سه راهکار را از جنبه‌های مختلف مورد بررسی، مقایسه و ارزیابی قرار می‌دهیم.

^۱arduino

^۲standby

۳-۱-راهکار اول

با توجه به شرایط محیطی و گستردگی سیستم مانیتورینگ، عناصر سیستم از جمله اشیای حسگر و یا کنترلرها ممکن است در معرض خرابی قرار گیرند و لذا در زمان پاسخ مناسب، نتوانند نسبت به تبادل پیام اقدام کنند و قابلیت اطمینان سیستم تحت تاثیر قرار گیرد. خرابی اشیای حسگر از طریق بکارگیری تعداد زیاد و مناسب آنها پوشش داده می‌شود. از طرفی، گستردگی محیط مورد پایش و تعداد محدود اشیای سیستم باعث افزایش تاخیر در سیستم پیام‌رسانی و کاهش کارایی خواهد شد. لذا در ابتدا یک راهکار بدون افزونگی پیشنهاد می‌شود که البته می‌تواند مبنای مناسبی نیز برای مقایسه با سایر راهکارهای پیشنهادی باشد.

در حالت پیش فرض که میزان خطای داده‌ها و نقص لینک‌های ارتباطی کم است، داده‌های مربوط به زلزله‌نگاری توسط n درصد از حسگرهای مستقر شده در محیط حس^۱ می‌شود. گره‌ها پس از تشخیص رویداد در محیط، داده را به کنترلر ارسال می‌کنند. کنترلر نیز داده را در صورتی که تکراری نباشد، به ایستگاه اصلی از طریق لینک‌های ارتباطی ارسال می‌کند.

روش کار به این صورت است که با توجه به میزان خطای شبکه و سطوح مختلف کیفیت سرویس، تعدادی از گره‌ها در حالت پایش فعال و سایرین برای کاهش مصرف انرژی در حالت حداقل انرژی مصرفی (حالت خواب) قرار می‌گیرند [۲۲]. یکی از تکنیک‌های بهینه‌سازی مصرف انرژی، زمان‌بندی خواب و بیدار گره‌های حسگر است [۲۳، ۲۴]. در این روش، گره‌ها بصورت سازگار شونده ناحیه تحت پوشش خود را بر اساس پارامترهای کیفیت سرویس تغییر می‌دهند. تکنیک‌های به حالت خواب بردن، با هدف صرفه جویی در انرژی به وسیله خاموش کردن برخی از گره‌ها در پریودهای زمان‌بندی برای حفظ انرژی گره‌ها است. در این تکنیک، برای تعیین گره فعال از بین گره‌های موجود، یک رتبه‌بندی بر اساس میزان انرژی باقیمانده [۲۵] و نرخ تشخیص رویداد در محل استقرار گره با استفاده از الگوریتم فازی انجام می‌شود و همواره سعی بر این است که گره‌هایی که انرژی مصرفی آنها کمتر از سایرین است و احتمال وقوع رخداد در محیط استقرار آن بیشتر است، انتخاب شوند. با این کار می‌توان نرخ پوشش را افزایش و مجموع انرژی مصرفی را در شبکه کاهش داد.

در حالت کلی، انرژی مصرفی در گره حسگر در یک چرخه انتقال پیام، طبق رابطه زیر از مجموع انرژی مصرفی برای انتقال و انرژی مصرف شده در حالت بیکار به دست می‌آید.

$$E_{total} = E_{tx} + E_{idle} \quad (۱)$$

که در آن E_{total} انرژی مصرفی کل، E_{tx} انرژی انتقال و E_{idle} انرژی مصرفی در گره حسگر در حالت بیکار است که معمولاً مقداری ثابت است و به فاصله بستگی ندارد. انرژی انتقال که مقدار انرژی است که یک گره حسگر مصرف می‌کند تا داده‌ها را در فاصله معینی انتقال دهد با توان دوم فاصله نسبت دارد و از رابطه زیر قابل محاسبه است.

$$E_{tx} = E_{elec} \times L + E_{fs} \times L^2 \quad (۲)$$

که در آن E_{elec} انرژی مورد نیاز برای راه اندازی گره فرستنده-گیرنده است. L فاصله انتقال است. E_{fs} انرژی مورد نیاز هر بیت برای انتقال از طریق کانال فضای آزاد برای انتقال است که معمولاً تابعی از، از دست دادن مسیر است.

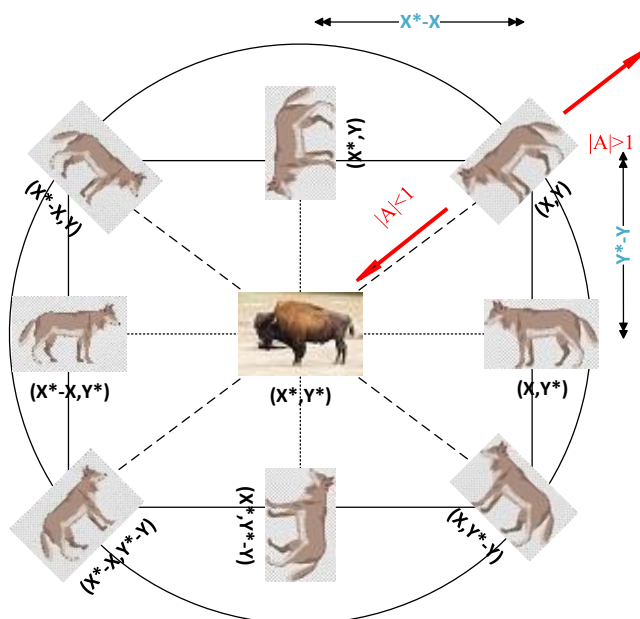
۳-۲-راهکار دوم

بر اثر افزایش وقوع خطا در لینک‌های ارتباطی یا گره‌های حسگر، دقت داده‌های جمع‌آوری شده کاهش یافته می‌یابد. لذا ایجاد افزونگی در حسگرها، برای پوشش بهتر محیط راهگشاست. بنابراین در راهکار دوم، این گره‌های اضافی بر اساس نرخ وقوع خطا در بخش‌های مختلف شبکه، به گره‌های اولیه شبکه اضافه می‌شوند و به عنوان گره‌های رله در نظر گرفته می‌شود. بنابراین راهکار دوم، مربوط به مکان‌یابی گره‌های رله در شبکه پایش داده‌های زلزله‌نگاری در بستر اینترنت اشیاء است؛ به نحوی که بتوان با استقرار گره‌های رله در مناطقی که حسگرها دچار خطا شده‌اند، مقاوم‌پذیری سیستم را افزایش داد [۲۵]. انتخاب بهینه گره‌های رله، یک انتخاب چند متغیره است. به همین منظور یکی از سخت‌ترین چالش‌ها، نحوه انتخاب این گره‌ها از بین گره‌های موجود است [۲۶، ۲۷]، چون در انتخاب یک گره رله، پارامترهای زیادی مانند مجموع انرژی باقیمانده

¹sense

در الگوریتم خاکستری، چهار نوع گرگ بنام گرگ‌های آلفا^۳ که رهبران گروه هستند، بتا^۴ و دلتا^۵ که به رهبران مشاوره و راهنمایی می‌دهند و امگا^۶ که گره‌های معمولی و زیر دست هستند، وجود دارد. الگوریتم شامل سه گام اصلی شکار گرگ‌های خاکستری می‌باشد که عبارتند از: جستجو برای طعمه، محاصره طعمه و در نهایت حمله به طعمه است [۲۹، ۳۰].

گرگ‌های خاکستری، توانایی تخمین موقعیت شکار را دارند. در جستجوی اولیه هیچ ایده‌ای در مورد موقعیت شکار وجود ندارد. فرض می‌شود گرگ‌های آلفا، بتا و دلتا دانش اول بهتری در خصوص موقعیت شکار (نقطه بهینه جواب که در اینجا همان نقطه خرابی احتمالی گره حسگر هستند) دارند. در واقع گرگ‌های آلفا، بتا و دلتا موقعیت شکار (گره) را تخمین می‌زنند، اما بقیه گرگ‌ها موقعیت خود را بطور تصادفی حول شکار به روز رسانی می‌کنند. از طرفی موقعیت سه جواب برتر همواره حفظ می‌شود. وقتی شکار توسط گرگ‌ها احاطه شده و از حرکت بایستد حمله به رهبری گرگ آلفا شروع می‌شود. مطابق شکل ۴، مدل کردن این فرایند با استفاده از کاهش بردار A انجام می‌شود. اگر $|A| < 1$ باشد، گرگ آلفا به شکار (و بقیه گرگ‌ها) نزدیک می‌شود و اگر $|A| > 1$ گرگ آلفا از شکار (و بقیه گرگ‌ها) دور خواهد شد. سایر گرگ‌ها، موقعیت خود را برحسب موقعیت گرگ‌های آلفا، بتا و دلتا به‌روزرسانی کنند. فرایند جستجو پروسه‌ای دقیقاً عکس فرایند حمله دارد. در هنگام جستجو گرگ‌ها از یکدیگر دور می‌شوند تا شکار را ردیابی کنند ($|A| > 1$) در حالی که پس از ردیابی شکار، گرگ‌ها در فاز حمله به یکدیگر نزدیک می‌شوند ($|A| < 1$). به این پروسه واگرایی، در جستجو – همگرایی، در حمله می‌گویند.



شکل ۴: مکانیزم به‌روزرسانی موقعیت عامل‌های جستجو و تاثیر A بر روی آن [۳۱]
Figure 4. The mechanism of updating the position of search agents and the effect of A on it [31]

⁶omega

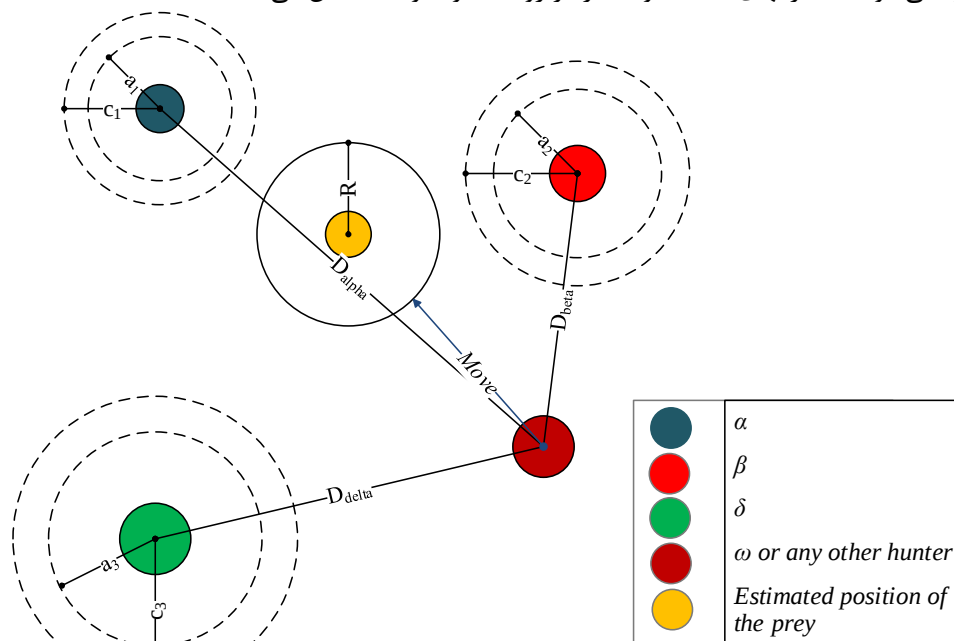
در هر تکرار الگوریتم، برازندگی کلیه جواب‌ها محاسبه شده و سه جواب برتر آلفا، بتا و دلتا انتخاب می‌شوند. با تعیین موقعیت این سه جواب، به‌روز رسانی موقعیت سایر گرگ‌ها به تبعیت از آن‌ها و بر اساس روابط ۳ و ۴ و ۵ انجام می‌شود. در پایان تکرارها، موقعیت گرگ آلفا به عنوان نقطه بهینه برای جایگذاری گرگ رله معرفی می‌شود [۳۰،۳۱].

$$\vec{D}_\alpha = |\vec{C}_1, \vec{X}_\alpha - \vec{X}|, \vec{D}_\beta = |\vec{C}_2, \vec{X}_\beta - \vec{X}|, \vec{D}_\delta = |\vec{C}_3, \vec{X}_\delta - \vec{X}| \quad (3)$$

$$\vec{X}_1 = \vec{X}_\alpha - \vec{A}_1, (\vec{D}_\alpha) \quad \vec{X}_2 = \vec{X}_\beta - \vec{A}_2, (\vec{D}_\beta) \quad \vec{X}_3 = \vec{X}_\delta - \vec{A}_3, (\vec{D}_\delta) \quad (4)$$

$$Fit(sol_u) = \frac{T_{error}(sol_u)}{\sum_{i \in B} Eng_i} \quad (5)$$

شکل ۵ به‌روز رسانی موقعیت گرگ‌های آلفا، بتا و دلتا را بر روابط ۳ و ۴ و ۵ نمایش می‌دهد.



شکل ۵: به‌روز رسانی موقعیت در الگوریتم بهینه‌سازی گرگ خاکستری [۲۹،۳۰]
Figure 5. Updating the position in the gray wolf optimization algorithm [29,30]

متغیر تصمیم‌گیری و تعیین‌کننده میزان برازش راه‌حل ارائه شده توسط الگوریتم گرگ خاکستری، نرخ خرابی حسگرها در ناحیه انتخابی برای استقرار گرگ‌های رله و انرژی باقیمانده گرگ‌های حاضر در بلوک است. این تابع هدف، برای تعیین میزان برازندگی راه‌حل sol_u بصورت زیر است [۳۲]:

$$Fit(sol_u) = \frac{T_{error}(sol_u)}{\sum_{i \in B} Eng_i} \quad (6)$$

T_{error} نرخ وقوع خطا در بلوک انتخابی sol_u برای استقرار گرگ رله می‌باشد و Eng_i انرژی گرگ i واقع در بلوک B است. بلوک B می‌تواند هر ناحیه از محیط که تحت پوشش یک گرگ کنترلر است باشد یا حتی کل محیط مورد پیمایش را به عنوان یک بلوک در نظر گرفت. لذا در این راهکار، با تعیین تابع برازش، بهترین موقعیت برای گرگ حسگر، بعنوان گرگ افزونه رله، جهت پوشش خرابی بدست می‌آید.

۳-۳- راهکار سوم

در راهکار دوم، به منظور پوشش بهتر محیط و کاهش خطا در داده‌های ارسالی، افزونگی در لایه حسگر را دیدیم. این فرایند می‌تواند برای گرگ‌های کنترلر نیز بکار رود. چرا که در صورت خطا در گرگ‌های کنترلر، افزونگی در گرگ‌های حسگر نمی‌تواند موجب حل مشکل در کنترلر شود. لذا برای پوشش بهتر خطاهای احتمالی در گرگ‌های کنترلر، در محیط افزونگی کنترلرها را در کنار افزونگی گرگ‌های حسگر می‌توان بکار برد. بدیهی است همان تکنیک‌های فرا ابتکاری و مواردی که در راهکار دوم برای

افزودگی گره‌های حسگر گفتیم می‌تواند برای گره‌های کنترلر بصورت جداگانه و یا در ترکیب با گره‌های حسگر بکار رود؛ که در شبیه سازی راهکار ترکیبی آورده شده است.

۴- شبیه‌سازی و نتایج آن

۴-۱- مقدمه

در سیستم مانیتورینگ داده‌های مبتنی بر اینترنت اشیا، برای پیش بینی و اعلام هشدار رویدادهای مخربی مانند زلزله، کارایی سیستم از اهمیت بالایی برخوردار است. لذا هرگونه تلاش جهت بهبود هر چند اندک پارامترهایی از قبیل تاخیر انتشار، انرژی مصرف، صحت داده‌ها و قابلیت اطمینان در این سیستم مفید است. در سیستم مانیتورینگ، به علت گستردگی محیط مورد پایش و تنوع اشیا در سیستم پیام‌رسانی، معمولاً با محدودیت انرژی مصرفی در گره‌های حسگر مواجهیم. همچنین به علت گستردگی محیط و اشیای ارتباطی، هر کدام از گره‌ها و یا ارتباط آنها، ممکن است در معرض خطا یا خرابی قرار گیرند و ترافیک داده‌ها و صحت سیستم را تحت تاثیر قرار دهد. به علاوه، جمع‌آوری صحیح و ارسال با تاخیر کمتر داده‌ها، ضمن جلوگیری از ارسال داده‌های تکراری، مورد توجه است. لذا در ادامه این بخش، پارامترهای کارایی سیستم برای سه راهکار بدون افزودگی، افزودگی در لایه حسگر و افزودگی در لایه کنترلر شبیه سازی شده و مورد ارزیابی قرار می‌گیرد.

۴-۲- پارامترهای شبیه‌سازی

برای شبیه‌سازی طرح پیشنهادی، از محیط نرم افزار متلب استفاده شده است. شبیه‌سازی بر روی گره‌هایی با تعداد ۸۰ تا ۱۶۰ گره در یک محدوده به محیط ۳۰۰ متر انجام شده است. فرض شده است که تعداد ۱۰۰ تا ۱۰۰۰ عمل تشخیص رخداد (زمین لرزه) رخ خواهد داد. شبیه‌سازی بر روی یک سیستم با پردازنده اینتل CORE i5 و ۴ گیگابایت و بر روی سیستم عامل ویندوز ۱۰ پیاده سازی شد. پارامترهای شبیه‌سازی موردی در جدول ۱ بیان شده است. البته در مدل‌سازی شبیه‌سازی فرض محدود کننده‌ای، در خصوص گره‌ها، توپولوژی و معماری گره‌های شبکه حسگر لحاظ نشده است. این موضوع، در مقادیر مختلف پارامترهای شبیه‌سازی مثل تعداد گره‌ها، فاصله آن‌ها، انرژی گره‌های حسگر نیز وجود دارد و شبیه‌سازی با مقادیر مختلف آنها نیز قابل انجام است، بطوری‌که برای مثال برای محیط‌های با ابعاد بزرگتر از محدوده ۳۰۰ متری مورد آزمایش، این پارامترها نتایجی مشابهی تولید کرده‌اند. پروتکل استاندارد مبنایی مورد استفاده برای پیام‌رسانی پروتکل MQTT است که پارامترهای مورد نظر راه‌حل‌های سه‌گانه با هم مقایسه خواهد شد. این پروتکل، یک پروتکل ارتباطی است که بر اساس مدل انتشار-اشتراک عمل می‌کند و بر روی پروتکل TCP/IP اجرا می‌شود.

۴-۳- ارزیابی طرح پیشنهادی

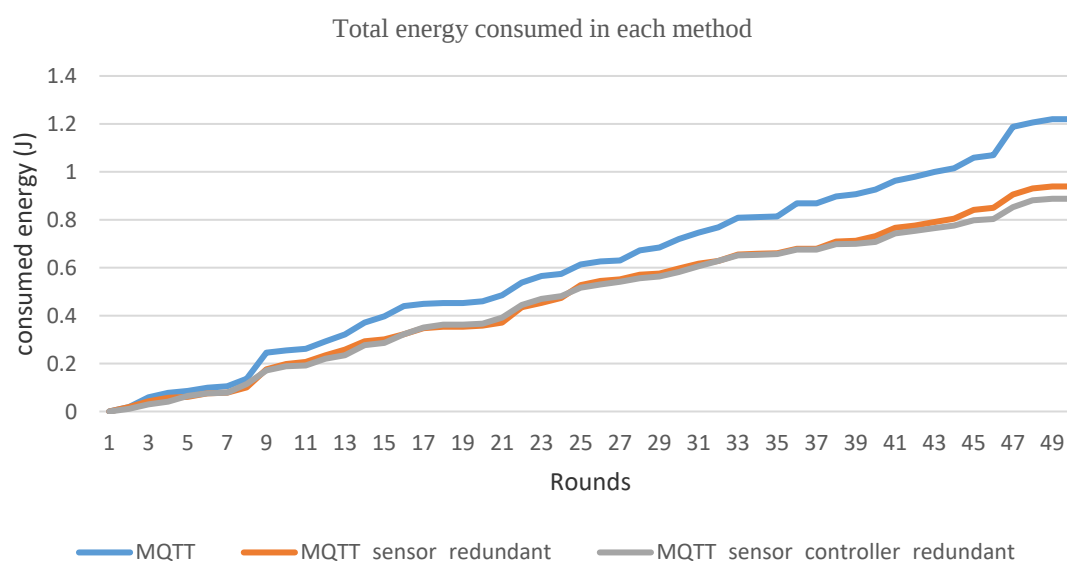
۴-۳-۱- ارزیابی انرژی مصرفی شبکه

برای بررسی وضعیت سیستم پیشنهادی، پایش تا ۵۰ دور انجام شد و عملکرد طرح در راهکارهای متفاوت، مقایسه شده است. در شکل ۶ می‌بینیم که انرژی مصرفی گره‌ها، برای تکرارهای مختلف، در راهکار دوم که شامل افزودگی در اشیای حسگر و راهکار سوم که افزودگی در اشیا حسگر و کنترلر را دارد در کل نسبت به راهکار MQTT مبنایی کمتر است. بنابراین می‌توان دید با اعمال افزودگی‌های لایه اول و دوم می‌توان طول عمر شبکه را افزایش داد. همانگونه که می‌بینیم، در تکرارهای پایین، مجموع انرژی مصرفی در هر سه راهکار تفاوت چندانی ندارد ولی از تکرار ۱۰ به بعد با افزایش تعداد تکرارها انرژی مصرفی در راهکارهای دوم و سوم نسبت به راهکار اول کاهش معناداری پیدا می‌کند، بطوری‌که با افزایش تعداد تکرارها، این تفاوت چشم‌گیرتر خواهد شد. در تکرارهای بالا، مصرف انرژی در راهکار سوم که شامل افزودگی در اشیای حسگر و هم در کنترلر است از راهکار دوم که فقط شامل افزودگی در لایه حسگر است کمتر است، که این موضوع در تکرار چهارم به بعد مشهود است. البته باید مصلحه^۱ بین هزینه افزودگی در کنترلرها و کاهش مصرف انرژی ناشی از آن را حل کرد.

¹Trade off

جدول ۱: پارامترهای شبیه‌سازی
Table 1. Simulation parameters

پارامتر	مقدار
ابعاد محیط استقرار گره‌ها	۳۰۰۰ متر
تعداد گره‌ها	۸۰-۱۶۰ گره
تعداد بسته های ارسال شده به مقصد	۱۰۰-۱۰۰۰ بسته
شعاع ارسال سیگنال گره‌ها	۲۰۰ متر
توزیع گره‌ها در محیط	تصادفی
انرژی اولیه	۰/۰۱ کیلوژول
جمعیت اولیه در روش گرگ خاکستری	۵۰
تعداد دور تکرار در روش گرگ خاکستری	۵۰ دور
اندازه فیلتر	۱۰۰



شکل ۶: مجموع انرژی مصرفی گره‌ها در سه راهکار طرح پیشنهادی

Figure 6. The total energy consumption of the nodes in the three solutions of the proposed procedure

برای مقایسه آماری بهتر و کمی نتایج، خصوصا در مقادیر نزدیک به هم و متفاوت از خطای جذر میانگین مربعات^۱ استفاده می‌شود:

$$RMSD(MQTT_i, 0) = \sqrt{MSE(MQTT_i, 0)} = \sqrt{E((MQTT_i)^2)} = \sqrt{\frac{\sum_{j=0}^n (x_{MQTT_{i,j}})^2}{n}} \quad (7)$$

که در آن $RMSD$ خطای جذر میانگین مربعات پارامتر مورد بررسی، $MQTT_i$ نماینده راهکار اول تا سوم است که با مقادیر صفر به عنوان مبنا مقایسه بکار می‌رود. راهکار اول راهکار بدون افزونگی، راهکار دوم افزونگی در اشیای حسگر و راهکار سوم افزونگی در حسگرها و کنترلرهاست. MSE میانگین مربعات و E امید میانگین است. همچنین $x_{MQTT_{i,j}}$ نشان‌دهنده خروجی پارامتر برای راهکار نام است.

لذا طبق جدول شماره ۲ و بررسی میزان خطای میانگین مربعات می‌بینیم که راهکار پایه اول دارای بیشترین مقدار $0/702304001$ است و سپس راهکار دوم با مکان‌یابی کنترلر و $0/558049572$ قرار دارد که و پس از آن، راهکار سوم با عملکرد تقریباً مشابه دوم ولی بهتر و با مقدار $0/542788824$ قرار دارد.

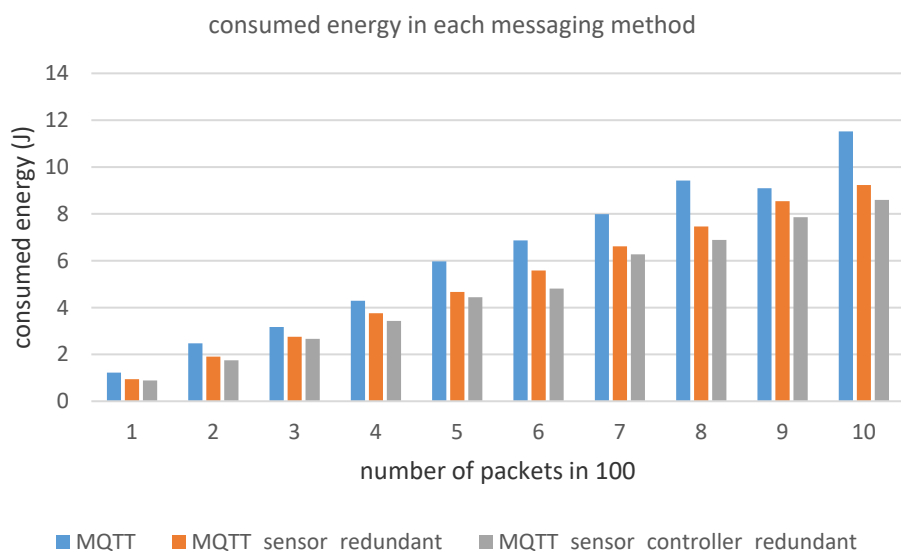
¹Root Mean Square Error

جدول ۲: مقایسه جذر مربع میانگین انرژی مصرفی در راهکارهای سه گانه

Table 2. Comparison of square root of average energy consumption in three solutions

راهکار پیشنهادی	میزان RMSD انرژی مصرفی در تکرارهای مختلف
MQTT ₁	۰/۷۰۲۳۰۴۰۰۱
MQTT ₂	۰/۵۵۸۰۴۹۵۷۲
MQTT ₃	۰/۵۴۲۷۸۸۸۲۴

در ادامه، مصرف انرژی را در راه حل های پیشنهادی با تغییر در تعداد بسته های ارسالی مورد ارزیابی قرار دادیم و تاثیر تغییر در تعداد بسته ها و ترافیک ناشی از آن را در مشاهده نمودیم. همان گونه که در شکل ۷ می بینیم انرژی مصرفی در راهکار دوم و سوم علی رغم افزایش در تعداد اشیا حسگر و کنترلر، نسبت به راهکار اول برای بسته های مختلف کاهش معناداری دارد، بطوری که با افزایش در تعداد بسته ها، این کاهش چشمگیرتر خواهد بود. دیگر اینکه راهکار سوم هم نسبت به راهکار دوم مصرف انرژی کمتری را دارد. بنابراین می توان گفت، افزونگی باعث کاهش مصرف انرژی در پیام رسانی شده است.



شکل ۷: مقایسه مجموع انرژی مصرفی گره ها برای تعداد بسته های ارسالی مختلف
Figure 7. Comparison of total energy consumption of nodes for different number of sent packets

جدول ۳: مقایسه جذر مربع میانگین انرژی مصرفی برای تعداد مختلف بسته ها در راهکارهای سه گانه

Table 3. Comparison of square root of average energy consumption for different number of packages in three solutions

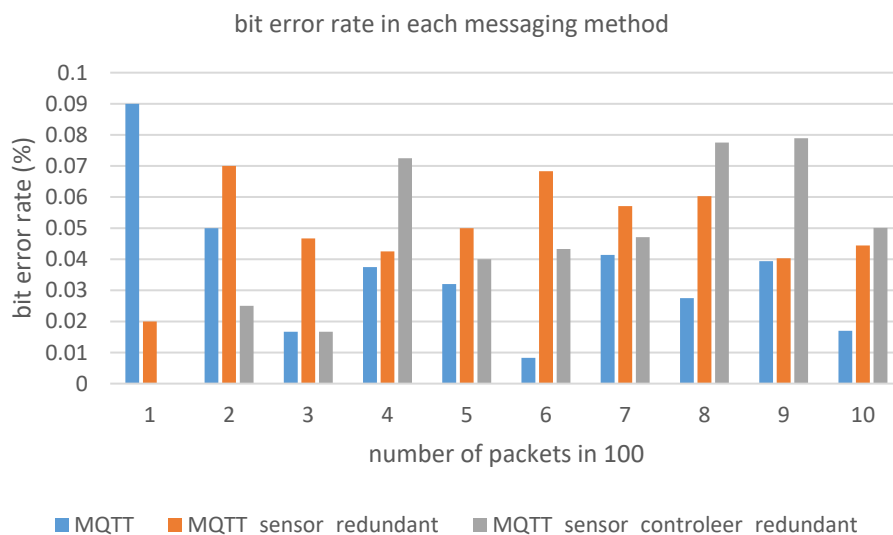
راهکار پیشنهادی	میزان RMSD انرژی مصرفی در راهکارهای سه گانه
MQTT ₁	۶/۹۷۷۴۷۳۱۲۸
MQTT ₂	۵/۸۰۳۲۱۳۶۹۵
MQTT ₃	۵/۳۶۶۲۴۲۱۸۷

با مشاهده مقادیر خطای جذر میانگین مربعات برای انرژی مصرف شده در سه راهکار، می بینیم که به نسبت، راهکار سوم افزونگی حسگر و کنترلر دارای بهترین عملکرد و سپس راهکار دوم افزونگی حسگر قرار دارد و راهکار اول دارای بدترین عملکرد است.

۴-۳-۲- ارزیابی نرخ خطای بی تی

با اعمال افزونگی هوشمند در حسگرها و کنترلرها، تحمل پذیری در برابر خطا، در شبکه پایش رخداد های لرزه نگاری، افزایش می یابد. زیرا این کار باعث پوشش شبکه در نقاط مختلف خواهد شد. داده های در گره های افزونه دریافت و داده صحیح، ارسال می شود و به جهت پوشش بهتر محیط و داده کمتری به علت عدم ارسال صحیح دچار خطا خواهد شد. برای سنجش این

شاخص، از نرخ خطای بیتی استفاده می‌شود. هرچه نرخ خطای بیتی مقدار کمتری باشد، نشان می‌دهد که تحمل‌پذیری خطا در شبکه بیشتر است. در شکل ۸ می‌بینیم که در راهکارهای سه‌گانه، با افزایش در تعداد بسته‌های ارسالی مختلف (۱۰۰ تا ۱۰۰۰ بسته) عملکرد راهکارها، متفاوت و مختلف خواهد بود.



شکل ۸: مقایسه نرخ خطای بیتی در سه راهکار

Figure 8. Comparison of bit error rate in three solutions

جدول ۴: مقایسه جذر مربع میانگین نرخ خطای بیتی برای سه راهکار

Table 4. Comparison of root mean square bit error rate for three solutions

راهکار پیشنهادی	جذر میانگین مربعات نرخ خطای بیتی
MQTT ₁	۰/۰۴۲۰۵۹۰۰۶
MQTT ₂	۰/۰۵۱۹۰۷۵۹۱
MQTT ₃	۰/۰۵۱۵۷۰۲۵۳

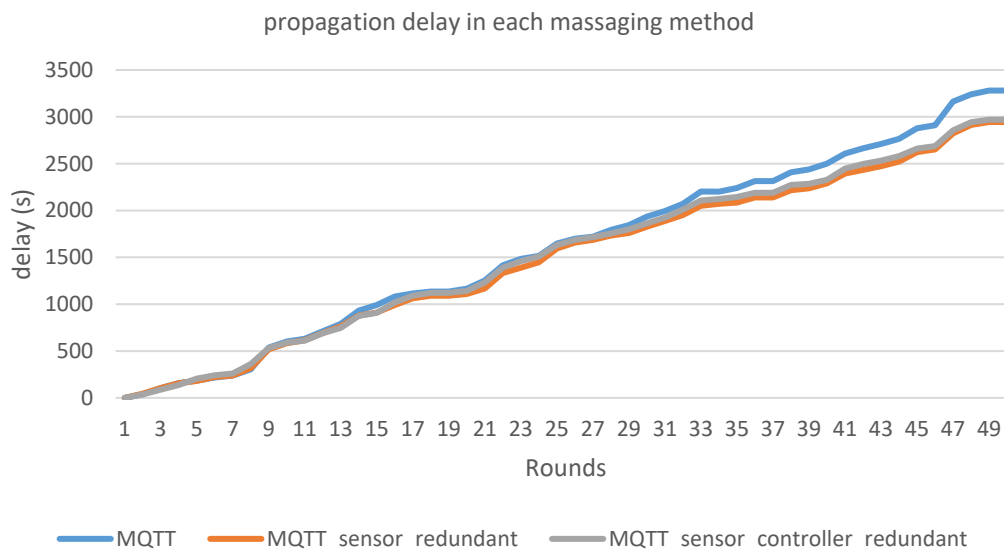
همانطور که از جدول ۴ پیداست، عملکرد راهکار دوم و سوم مشابه است و راهکار اول عملکرد بهتری دارد.

۴-۳-۳-ارزیابی تأخیر انتها به انتها

تأخیر انتها به انتها، میانگین زمان استفاده شده برای پایش یک رویداد توسط گره حسگر، تحویل بسته از گره مبدا به گره‌های بعدی و در نهایت تحویل به ایستگاه اصلی را مشخص می‌کند. شکل ۹ نشان می‌دهد که در تکرارهای پایین، تأخیر انتها به انتها، در هر سه روش تفاوت معناداری ندارد؛ بطوری‌که تا تکرار سی‌ام مقادیر روش‌ها مشابه‌اند، اما رفته رفته با افزایش تکرارها، این مقدار در روش‌های دوم و سوم که افزونگی دارد، نسبت به روش اول کاهش معناداری پیدا می‌کند، بطوری‌که در تکرار پنجاهام این کاهش مشهود است. دلیل آن نیز این می‌تواند باشد که با افزایش تعداد گره‌ها، احتمال وجود گره‌های بدون خطا و کاهش خطای پیام‌رسانی افزایش می‌یابد.

همانطور نیز که از جدول ۵ پیداست میزان RMSD در روش اول بیشتر و در نتیجه تأخیر انتها به انتهای آن در مجموع بیشتر است. پس از آن روش‌های سوم و دوم با مقدار میانگین کمتری قرار دارند.

در ادامه، همین ارزیابی را برای ثبت تأخیر انتها به انتها، در طول اجرای شبیه‌سازی، با تعداد بسته‌های ارسال شده مختلف در شبکه انجام دادیم. بر اساس نتایج بدست آمده در شکل ۱۰ می‌بینیم مانند آزمایش قبل، تأخیر انتها به انتها در انتقال داده در راهکارهای دوم و سوم با بسته‌های مختلف (۱۰۰ تا ۱۰۰۰ بسته) بهتر از روش پایه بدون افزونگی است.



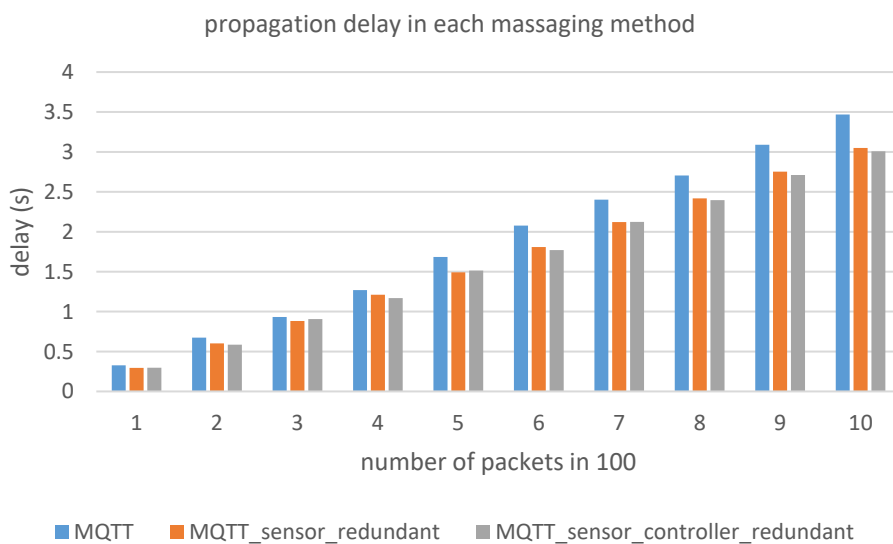
شکل ۹: مقایسه تاخیر انتها به انتها در طول زمان برای سه راهکار

Figure 9. Comparison of end-to-end delay over time for three solutions

جدول ۵: میانگین تاخیر انتها به انتها در راهکارهای سه گانه

Table 5. Average end-to-end delay in three solutions

راهکار پیشنهادی	میزان RMSD تاخیر انتها به انتها در راهکارهای سه گانه
MQTT ₁	۱۸۸/۴۴۷۵۸۳
MQTT ₂	۱۷۳۶/۵۵۲۰۱۸
MQTT ₃	۱۷۷۰/۹۳۲۶۰۵



شکل ۱۰: مقایسه تاخیر انتها به انتها برای بسته های مختلف در سه راهکار

Figure 10. End-to-end delay comparison for different packets in three solutions

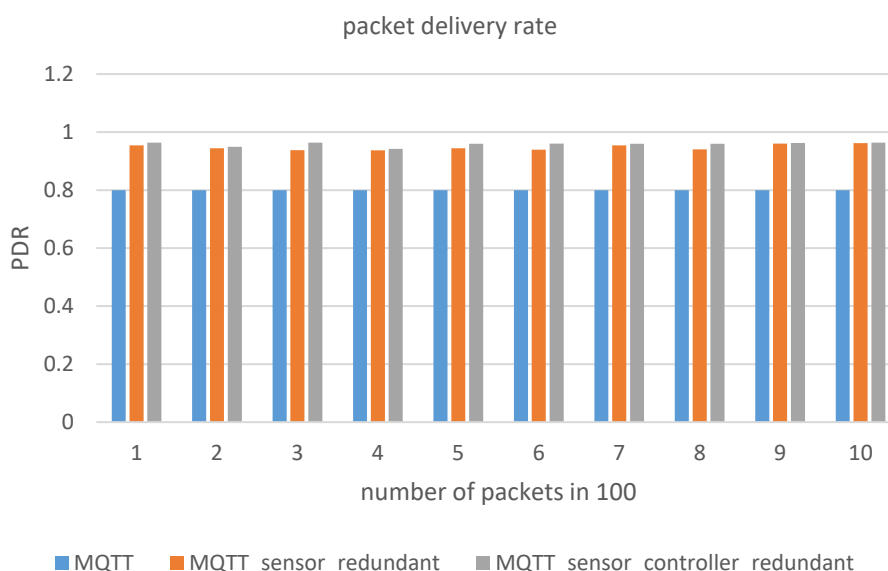
با مشاهده مقادیر جدول ۶ می بینیم که در راهکار اصلاحی دوم و سوم میزان RMSD کمتر از راهکار پایه اول را داراست و بهبود معناداری را دارد، بطوریکه راهکار سوم، دارای کمترین میزان RMSD است و سپس راهکار دوم قرار دارد.

جدول ۶: مقایسه جذر میانگین مربعات تاخیر انتها به انتها برای تعداد بسته‌های مختلف در راهکارهای سه‌گانه
Table 6. Comparison of end-to-end root mean square delay for different number of packets in triple solutions

راهکار پیشنهادی	میزان RMSD تاخیر انتها به انتها
MQTT ₁	۲/۱۱۷۹۲۸۳۹
MQTT ₂	۱/۸۸۱۶۰۰۱۲۸
MQTT ₃	۱/۸۶۲۵۸۶۰۰۳

۴-۳-۴- ارزیابی نرخ تحویل موفق بسته‌ها به مقصد

یکی از پارامترهای استاندارد در کارایی و کیفیت سرویس نرخ تحویل موفق بسته به مقصد^۱ است که بصورت درصد تعداد بسته‌های تحویل شده بصورت موفق، به کل بسته‌های ارسالی می‌باشد. از شکل ۱۱ پیداست که نرخ تحویل موفق بسته‌ها، در راهکارهای دوم و سوم بهتر از راهکار اول است. این موضوع به دلیل افزونگی در حسگرها و کنترلرها و افزایش گره‌های سالم در توپولوژی شبکه پیام‌رسانی قابل انتظار است. نکته‌ای که در اینجا قابل توجه است این است که در این شبیه‌سازی برای بسته‌های با تعداد متفاوت صد، دویست، سیصد تا هزار بسته نرخ تحویل بسته، برای راهکار اول مقدار ۷۹/۹۸ درصد است. یعنی تغییر در تعداد بسته‌ها تغییری در نرخ تحویل بسته‌ها در راهکار اول ندارد.



شکل ۱۱: ارزیابی نرخ تحویل موفق بسته‌های ارسالی به مقصد در راهکارهای سه‌گانه
Figure 11. Evaluation of the successful delivery rate of packages sent to the destination in three solutions

جدول ۷: مقایسه RMSD نرخ تحویل بسته‌ها در راهکارهای سه‌گانه
Table 7. Comparison of RMSD of packet delivery rate in three solutions

راهکار پیشنهادی	میزان RMSD نرخ تحویل بسته در پروتکل‌های متفاوت
MQTT ₁	۰/۷۹۹۸۰۶
MQTT ₂	۰/۹۴۷۴۳۱۳۴۸
MQTT ₃	۰/۹۵۸۴۴۴۲۷۸

طبق جدول ۷ راهکار دوم و سوم نرخ تحویل بالای ۹۴ درصد دارند بطوریکه مقدار میانگین نرخ تحویل بسته برای راهکار دوم ۹۴/۷۴ درصد و برای راهکار سوم به میزان ۹۵/۸۴ درصد است و نسبت به راهکار پایه با نرخ تحویل ۷۹/۹۸ درصد بهبود قابل توجهی دارند.

¹Packet Delivery Rate (PDR)

۵- نتیجه گیری

یک سیستم هشدار زلزله می‌تواند کوچکترین لرزشی را قبل از یک زلزله بزرگ تشخیص دهد. دستگاه‌های متصل و فناوری حسگر پیشرفته، نظارت بر محیط زیست سنتی را به یک سیستم نظارت بر محیط هوشمند تبدیل کرده‌اند [۳۳]. با انقلاب تکنولوژیک در جمع‌آوری داده‌ها، شبکه‌های ارتباطی، اینترنت اشیا و تجزیه و تحلیل داده‌های بزرگ، امکان توسعه یک مدل پیش‌بینی زلزله هوشمند برای هشدارهای اولیه در مکان‌های آسیب‌پذیر وجود دارد. فناوری اینترنت اشیا به دست آوردن داده‌های حسگر بلادرنگ استفاده می‌شود [۳۴]. از طرفی گستردگی محیط و تنوع و گوناگونی ابزار اینترنت اشیا بعنوان حسگرهای جمع‌آوری داده‌های لرزه‌نگاری لزوم توجه به دقت و صحت داده‌های جمع‌آوری شده و قابلیت اطمینان سیستم را دوچندان می‌کند.

لذا یک چارچوب نظارتی و پیش‌بینی زلزله هوشمند مبتنی بر اینترنت اشیا با استفاده از پروتکل ارتباطی سبک وزن سه لایه MQTT پیشنهاد شده است و با اعمال افزونگی‌های در لایه حسگر و کنترلر در صدد بهبود پارامترهایی از قبیل طول عمر باتری و مصرف انرژی، نرخ خطا و نرخ تحویل موفق بسته‌ها بوده‌ایم.

مصرف انرژی همواره چالش مورد توجهی در سیستم‌های مانیتورینگ بخصوص در ابعاد گسترده محیطی و ناهمگونی تجهیزات بوده است. شبیه‌سازی‌ها نشان داده است که پروتکل استاندارد پایه MQTT دارای مصرف انرژی بالاتری نسبت به دو راهکار اصلاحی پیشنهادی است. همان‌طور که از شکل ۶ پیداست، در تکرارهای بالا تا سی درصد افزونگی در لایه حسگر و لایه کنترلر به نسبت راهکار اول MQTT پایه کاهش مصرف انرژی دارد. از آنسوی بنا به شکل ۷ با افزایش تعداد بسته‌های ارسالی از ۱۰۰ تا ۱۰۰۰ به علت افزایش ترافیک بسته‌ها، مصرف انرژی در سه راهکار افزایش می‌یابد و البته به نسبت راهکار پایه اول دارای بیشترین مصرف انرژی است و پس از آن با اختلاف راهکار دوم افزونگی در لایه حسگر و بعد از آن راهکار سوم افزونگی در لایه کنترلر با اختلاف کمتری از راهکار دوم قرار دارد.

کاهش خطای بیتی در سیستم منجر به افزایش قابلیت اطمینان و صحت داده‌ها می‌شود. در هر سه راهکار، ارسال بسته‌های داده با تعداد متفاوت منجر به نرخ خطای بیتی مختلفی شده است که این موضوع می‌تواند تحت تاثیر پیکربندی، ترافیک شبکه یا سایر پارامترهای مرتبط باشد. به هر حال می‌توان گفت در مجموع می‌تواند از جدول ۴ هم استنتاج کرد که نتایج حاصل از اعمال افزونگی در هر سه راهکار نتایج مشابهی در نرخ خطای بیتی ایجاد کرده است.

کاهش زمان ارسال داده‌ها از مبدا به مقصد منجر به افزایش بلادرنگی سیستم پیام‌رسانی می‌شود که این موضوع در سیستم‌های مانیتورینگ حیاتی است. نتایج حاصل از شبیه‌سازی نشان داده است که میانگین تاخیر انتها به انتها در تکرارهای پایین در راهکار بدون افزونگی و دو راهکار دیگر بدون افزونگی تفاوت معناداری ندارد ولی به مرور و با افزایش تکرارها و بخصوص در تکرارهای بالا، تاخیر انتها به انتها در راهکار دوم و سوم شامل افزونگی در حسگرها و کنترلرها از راهکار اول کاهش معناداری پیدا می‌کند.

و در نهایت پارامتر دیگر مورد انتظار برای افزایش قابلیت اطمینان و صحت عملکرد سیستم، نرخ تحویل موفق بسته‌ها و افزایش این نرخ است. همان‌طور که نتایج حاصل از شبیه‌سازی نیز نشان داده است، در راهکار اول با پروتکل پایه MQTT، نرخ تحویل موفق بسته‌ها برای تعداد مختلف بسته‌ها، مقدار ثابت ۷۸/۹۸ درصد است. به عبارت دیگر تغییر در تعداد بسته‌ها، تاثیری بر نرخ تحویل بسته نداشته است. اما از آنسوی، در راهکار دوم و سوم با اعمال افزونگی، نرخ تحویل بسته‌ها متفاوت و البته همگی به بالای ۹۲ درصد افزایش یافته است که این می‌تواند نتیجه‌ای افزایش تعداد حسگرها و کنترلرها و جایگذاری آنها باشد که احتمال پیام‌رسانی مطمئن را در صورت عدم عملکرد صحیح احتمالی برخی حسگرها و یا کنترلرها افزایش می‌دهد.

برای اعتبارسنجی نتایج حاصل از مشاهدات شبیه‌سازی آزمون تحلیل واریانس را بر روی آن اعمال نمودیم. نتایج حاصل از آزمون بصورت خلاصه در جدول ۸ برای α برابر ۰/۰۵ آمده است. آزمون برای شش پارامتر مجموع انرژی مصرفی، انرژی مصرفی با تعداد بسته‌های مختلف، نرخ خطای بیتی، تاخیر انتشار، تاخیر انتشار با تعداد متفاوت بسته و نرخ تحویل بسته انجام شده و مقدار نهایی آماره آزمون فیشرف بدست آمده است. فرضهای آزمون نیز در رابطه ۶ آمده است.

$$\begin{cases} H_0: \overline{X_{mqtt}} = \overline{X_{mqtt_sensor_redundant}} = \overline{X_{mqtt_sensor_controller_redundant}} \\ H_1: \overline{X_{mqtt}} \neq \overline{X_{mqtt_sensor_redundant}} \neq \overline{X_{mqtt_sensor_controller_redundant}} \end{cases} \quad (8)$$

فرض صفر بیان می‌دارد که مقدار میانگین نتایج پارامترهای مورد بررسی برای سه راهکار بدون افزونگی، افزونگی در حسگرها و افزونگی در کنترلرها برابر است. فرض یک نیز بیان می‌دارد مقدار میانگین برای یکی از راهکارها (راهکار بدون افزونگی) با دو راهکار دیگر متفاوت است. همانطور که مشاهدات شامل سه دسته داده سه راهکار است لذا درجه آزادی صورت برابر ۲ است. همچنین برای مجموع انرژی مصرفی و تاخیر انتشار نتایج شامل سه دسته پنجاه تایی از مشاهدات است لذا درجه آزادی مخرج برابر ۱۴۷ است و برای چهار پارامتر دیگر نتایج شامل سه دسته ده تایی از داده‌هاست و لذا برای آنها درجه آزادی مخرج برابر ۲۷ است.

جدول ۸: آزمون تحلیل واریانس بر روی داده‌های حاصل از شبیه‌سازی برای $\alpha=0.05$ Table8. Variance analysis test on the simulation data for $\alpha=0.05$

پارامتر آزمون	درجه آزادی	درجه آزادی	MS_B	MS_W	F محاسبه شده	F جدول توزیع فیشر
مخرج	صورت					
مجموع انرژی مصرفی	۲	۱۴۷	۰/۳۶۶۴۲۳	۰/۰۹۱۲۳	۴/۰۱۶۴۸۷	۳/۰۵
انرژی مصرفی برای تعداد مختلف بسته‌ها	۲	۲۷	۳۷/۰۵۲۹۹	۶/۴۰۲۱۴۳	۵/۷۸۷۵۹۲	۳/۳۵
نرخ خطای بیتی	۲	۲۷	۰/۰۰۲۳۷۴	۰/۰۰۰۳۴۲	۶/۹۴۳۱۶۳	۳/۳۵
تاخیر انتشار	۲	۱۴۷	۳۲۳۰۵۵۳	۸۱۰۲۴۷/۷	۳/۹۸۷۱۱۸	۳/۰۵
تاخیر انتشار برای تعداد مختلف بسته‌ها	۲	۲۷	۰/۰۷۶۶۳۵۱	۰/۶۵۰۱۵۲	۱/۱۷۸۷۲۷	۳/۳۵
نرخ تحویل بسته‌ها	۲	۲۷	۰/۸۱۸۶۴۴	۰/۰۵۴۷۸	۱۴/۹۴۳۱	۳/۳۵

طبق جدول ۸ مقدار F محاسبه شده برای مجموع انرژی مصرفی برابر ۴/۰۱۶۴۸۷ و بیشتر از مقدار استاندارد ۳/۰۵ جدول فیشر^۱ است و لذا فرض H_1 برقرار می‌شود که به آن معناست که مقدار میانگین برای مجموع انرژی مصرفی در راهکار بدون افزونگی متفاوت از دو راهکار دارای افزونگی است. به بیان دیگر، همانطور که مشاهدات شبیه‌سازی نیز نشان داد، می‌توان استنباط کرد که با دقت بالای ۹۵ درصد (این دقت برای سایر پارامترهای مورد آزمون برقرار است) در راهکار بدون افزونگی نسبت به دو راهکار با افزونگی، بصورت میانگین انرژی بیشتری مصرف می‌شود و اصلاحات انجام شده باعث بهبود عملکرد سیستم از نظر مصرف انرژی می‌شود. در آزمون مصرف انرژی برای بسته‌های با تعداد مختلف ۱۰۰ تا ۱۰۰۰ بسته نیز مقدار F محاسبه شده برای مجموع انرژی مصرفی برابر ۵/۷۸۷۵۹۲ و بیشتر از مقدار استاندارد ۳/۳۵ جدول فیشر است. این نیز به آن معناست که می‌توان استنباط کرد مصرف انرژی برای تعداد متفاوت بسته‌ها نیز در حالت بدون افزونگی بیشتر از دو راهکار دیگر خواهد بود. محاسبات بر روی نرخ خطای بیتی نشان می‌دهد که مقدار F با اندازه ۶/۹۴۳۱۶۳ بیشتر از مقدار جدول فیشر بوده است و می‌توان استنباط نمود نرخ خطای بیتی در دو راهکار با افزونگی، بهبود قابل توجهی نسبت به راهکار بدون افزونگی داراست. همین طور با محاسبه مقدار ۳/۹۸۷۱۱۸ بزرگ‌تر از مقدار استاندارد فیشر برای تاخیر انتشار، نتیجه می‌گیریم که بهبود و اعمال افزونگی در سیستم منتج به کاهش زمان تاخیر انتشار می‌شود اما F بدست آمده با اندازه ۱/۱۷۸۷۲۷ برای آزمون تاخیر انتشار برای بسته‌های با تعداد متفاوت، کمتر از مقدار استاندارد فیشر است و این بدان معناست که علی‌رغم کاهش تاخیر انتشار در نتایج شبیه‌سازی از طریق آزمون در حالت کلی نمی‌توان استدلال کرد که افزونگی منجر به کاهش تاخیر انتشار می‌شود. در نهایت با مقدار بالای ۱۴/۹۴۳۱ برای نرخ موفق تحویل بسته‌ها، می‌توان استنباط کرد که افزونگی اعمال شده در سیستم منجر به افزایش نرخ تحویل بسته‌ها می‌شود که این تفاوت بخوبی در نتایج شبیه‌سازی در بخش ۴-۳-۴ دیده شد.

¹Fisher

منابع

- [1] R. Dugga, N. Gupta, A. Pandya, P. Mahajan, K. Sharma, T. kaundal and P. Angra, "Building structural analysis based Internet of Things network assisted earthquake detection," *Internet of Things*, vol. 19, p. 100561, August 2022, doi: 10.1016/j.iot.2022.100561.
- [2] K. Saini, S. Kalra and S. K. Sood, "An Integrated Framework for Smart Earthquake Prediction: IoT, Fog and Cloud Computing," *Journal of Grid Computing*, vol. 20, Article number: 17, May 2022, doi:10.1007/s10723-022-09600-7.
- [3] S. K. McBride, D. F. Sumy, A. L. Llenos, G. A. Parker, J. McGuire, J. K. Saunders, M.-A. Meier, P. Schuback, D. Given, R. De-Groot, "Latency and geofence testing of wireless emergency alerts intended for the ShakeAlert earthquake early warning system for the West Coast of the United States of America," *Safety Science*, vol. 157, p. 105898, January 2023, doi: 10.1016/j.ssci.2022.105898.
- [4] R. Wanare, K. K. R. Iyer and P. Jayanthi, "Recent Advances in Early Warning Systems for Landslide Forecasting," *Geohazard Mitigation*, pp. 249–260, doi:10.1007/978-981-16-6140-2_20.
- [5] V. Babu and V. Rajan, "Flood and Earthquake Detection and Rescue Using IoT Technology," 2019 *International Conference on Communication and Electronics Systems (ICCES)*, Coimbatore, India, 2019, pp. 1256-1260, doi: 10.1109/ICCES45898.2019.9002406.
- [6] A. Wu, J. Lee, I. Khan and Y. -W. Kwon, "CrowdQuake+: Data-driven Earthquake Early Warning via IoT and Deep Learning," *IEEE International Conference on Big Data (Big Data)*, Orlando, FL, USA, 2021, pp. 2068-2075, doi: 10.1109/BigData52589.2021.9671971.
- [7] S. Kim, I. Khan, S. Choi and Y. -W. Kwon, "Earthquake Alert Device Using a Low-Cost Accelerometer and its Services," in *IEEE Access*, vol. 9, pp. 121964-121974, 2021, doi: 10.1109/ACCESS.2021.3103505.
- [8] I. Khan, M. Pandey and Y. -W. Kwon, "An earthquake alert system based on a collaborative approach using smart devices," *IEEE/ACM 8th International Conference on Mobile Software Engineering and Systems (MobileSoft)*, Madrid, Spain, 2021, pp. 61-64, doi: 10.1109/MobileSoft52590.2021.00014.
- [9] A. Alphonsa and G. Ravi, "Earthquake early warning system by iot using wireless sensor networks," *International Conference on Wireless Communications, Signal Processing and Networking (WiSPNET)*, 2016, pp. 1201-1205, doi: 10.1109/WiSPNET.2016.7566327.
- [10] R. Pirmagomedov, M. Blinnikov, A. Amelyanovich, R. Glushakov, S. Loskutov, A. Koucheryavy, R. Kirichek and E. Bobrikov, "IoT Based Earthquake Prediction Technology," *International Conference on Next Generation Wired/Wireless Networking Conference on Internet of Things and Smart Spaces, Internet of Things, Smart Spaces, and Next Generation Networks and Systems*, pp 535–546, September 2018, doi: 10.1007/978-3-030-01168-0_48.
- [11] P. Pierleoni, A. Belli, M. Esposito, R. Concetti and L. Palma, "Earthquake Early Warning Services Based on Very Low-Cost Internet of Things Devices," 2022 *61st FITCE International Congress Future Telecommunications: Infrastructure and Sustainability (FITCE)*, Article ID: 253424887, November 2022, doi: 10.23919/FITCE56290.2022.9934792.
- [12] S. K. McBride, A. Bostrom, J. Sutton, R. M. De-Groot, A. S. Baltay, B. Terbush, P. Bodin, M. Dixon, E. Holland, R. Arba, P. Laustsen, S. Liu and M. Vinci, "Developing post-alert messaging for ShakeAlert, the earthquake early warning system for the West Coast of the United States of America," *International Journal of Disaster Risk Reduction*, vol. 50, p. 101713, November 2020, doi: 10.1016/j.ijdrr.2020.101713.
- [13] A.-M. Zambrano, I. Pérez, C. E. Palau and Manuel Esteve, "Sensor Web Enablement Applied to an Earthquake Early Warning System," *International Conference on Internet and Distributed Computing Systems*, 2015, pp. 51–62, doi: 10.1007/978-3-319-23237-9_6.
- [14] Y. Chavez-Rivera, B. Espinoza-Garcia and P. R. Yanyachi, "Low Cost Embedded IoT System to Record Meteorological, and Inertial Data in Remote Places," *IEEE URUCON*, Montevideo, Uruguay, 2021, pp. 273-277, doi: 10.1109/URUCON53396.2021.9647077.

- [15] P. Boccadoro, B. Montaruli and L. A. Grieco, "QuakeSense, a LoRa-compliant Earthquake Monitoring Open System," *IEEE/ACM 23rd International Symposium on Distributed Simulation and Real Time Applications (DS-RT)*, Cosenza, Italy, 2019, pp. 1-8, doi: 10.1109/DS-RT47707.2019.8958675.
- [16] N. Moussa, E. Nurellari and A. E. El-Alaoui, "A Novel Energy-Efficient and Reliable ACO-Based Routing Protocol for WSN-Enabled Forest Fires Detection," *Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing*, vol. 14, no. 9, February 2022, doi: 10.1007/s12652-022-03727-x.
- [17] S. Kumari, R. Kumar, S. Kadry, S. Namasudra and D. Taniar, "Maintainable stochastic communication network reliability within tolerable packet error rate," *Computer Communications*, vol. 178, October 2021, pp. 161-168, October 2021, doi: 10.1016/j.comcom.2021.07.023.
- [18] Y. Zhang, W. Zhao, P. Dong, X. Du, W. Qiao and M. Guizani, "Improve the reliability of 6G vehicular communication through skip network coding," *Vehicular Communications*, vol. 33, p. 100400, January 2022, doi: 10.1016/j.vehcom.2021.100400.
- [19] J. Yongguo, L. Qiang, Q. Changshuai, S. Jian and L. Qianqian, "Message-oriented Middleware: A Review," *5th International Conference on Big Data Computing and Communications (BIGCOM)*, QingDao, China, 2019, pp. 88-97, doi: 10.1109/BIGCOM.2019.00023.
- [20] N. Naik, "Choice of effective messaging protocols for IoT systems: MQTT, CoAP, AMQP and HTTP," *IEEE International Systems Engineering Symposium (ISSE)*, Vienna, Austria, 2017, pp. 1-7, doi: 10.1109/SysEng.2017.8088251.
- [21] A. Rizzardi, S. Sicari and A. Coen-Porisin, "Analysis on functionalities and security features of Internet of Things related protocols," *Wireless Networks*, vol. 28, pp. 2857-2887, June 2022, doi: 10.1007/s11276-022-02999-7.
- [22] A. Yamawaki, M. Yamanaka and S. Serikawa, "A sensor node architecture with zero standby power on wireless sensor network," *Artificial Life and Robotics*, vol. 20, pp. 210-216, July 2015, doi: 10.1007/s10015-015-0218-9.
- [23] N. Oukas and M. Boulif, "Sensor Performance Evaluation for Long-Lasting EH-WSNs by GSPN Formulation, Considering Seasonal Sunshine Levels and Dual Standby Strategy," *Arabian Journal for Science and Engineering*, vol. 48, no. 3, June 2022, doi: 10.1007/s13369-022-06970-8.
- [24] B. Guruprakash, C. Balasubramanian and R. Sukumar, "An approach by adopting multi-objective clustering and data collection along with node sleep scheduling for energy efficient and delay aware WSN," *Peer-to-Peer Networking and Applications*, vol. 13, pp. 304-319, 2020, doi: 10.1007/s12083-019-00779-3.
- [25] S. Roshni, J. Senthilkumar, Y. Suresh and V. Mohanraj, "Advertisement valid time triggered firefly and fruit-fly inspired approach for efficient cluster formation and standby CH selection in hierarchical wireless sensor network," *Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing*, vol. 12, pp. 4697-4713, 2021, doi: 10.1007/s12652-020-01873-8.
- [26] W. Barkhoda and H. Sheikhi, "Immigrant imperialist competitive algorithm to solve the multi-constraint node placement problem in target-based wireless sensor networks," *Ad Hoc Networks*, vol. 106, p. 102183, September 2020, doi: 10.1016/j.adhoc.2020.102183.
- [27] S. K. Gupta, P. Kuila and P. K. Jana, "Genetic algorithm approach for k-coverage and m-connected node placement in target based wireless sensor networks," *Computers & Electrical Engineering*, vol. 56, pp. 544-556, November 2016, doi: 10.1016/j.compeleceng.2015.11.009.
- [28] M. Banaie-Dezfouli, M. H. Nadimi-Shahraki and Z. Beheshti, "R-GWO: Representative-based grey wolf optimizer for solving engineering problems," *Applied Soft Computing*, vol. 106, p. 107328, July 2021, doi: 10.1016/j.asoc.2021.107328.
- [29] H. Tang, W. Sun, A. Lin, M. Xue and X. Zhang, "A GWO-based multi-robot cooperation method for target searching in unknown environments," *Expert Systems with Applications*, vol. 186, p. 115795, December 2021, doi: 10.1016/j.eswa.2021.115795.

- [30] S. A. Mirjalili, S. M. Mirjalili and A. Lewis, "Grey Wolf Optimizer," *Advances in Engineering Software*, vol. 69, March 2014, pp. 46-61, doi:10.1016/j.advengsoft.2013.12.007.
- [31] S. Mirjalili, "How effective is the Grey Wolf optimizer in training multi-layer perceptrons," *Applied Intelligence*, vol. 43, pp. 150-161, 2015, doi:10.1007/s10489-014-0645-7.
- [32] S. K. Sankaralingam, N. S. Nagarajan and A. S. Narmadh, "Energy aware decision stump linear programming boosting node classification based data aggregation in WSN," *Computer Communications*, vol. 155, pp. 133-142, April 2020, doi: 10.1016/j.comcom.2020.02.062.
- [33] Y. Pal, S. Nagendram, M. S. Al-Ansari, K. Singh, L.A. Anto-Gracious and P. Pa, "IoT based Weather, Soil, Earthquake, and Air Pollution Monitoring System", *7th International Conference on Computing Methodologies and Communication (ICCMC)*, Erode, India, April 2023, pp. 1212-1217, doi: 10.1109/ICCMC56507.2023.10083932.
- [34] M. Bhatia, T. A. Ahanger and A. Manocha, "Artificial intelligence based real-time earthquake prediction", *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, vol. 120, p. 105856, April 2023, doi: 10.1016/j.engappai.2023.105856.

COPYRIGHTS

©2024 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>



Vol. 13/ No. 52/Summer 2024

Research Article

Optimizing Solar Radiation Prediction Based on The Internet of Things Platform in Photovoltaic Power Plant

Neda Ashrafi Khozani, Instructor¹  | Maryam Mahmoudi, Instructor^{2*}  | Shabnam Nasr Esfahani, Assistant Professor³ 

¹Department of Computer Engineering, Meymeh Branch, Islamic Azad University, Meymeh, Iran, anahid.shaabani@gmail.com

²Department of Computer Engineering, Meymeh Branch, Islamic Azad University, Meymeh, Iran, Mahmoudi.m174@iau.ac.ir

³Department of Electrical Engineering, Meymeh Branch, Islamic Azad University, Meymeh, Iran, nasr.sh.2010@gmail.com

Correspondence

Maryam Mahmoudi, Instructor of Computer Engineering, Meymeh Branch, Islamic Azad University, Meymeh, Iran, Mahmoudi.m174@iau.ac.ir

Received: 16 September 2023

Revised: 15 December 2023

Accepted: 22 December 2023

Abstract

The solar radiation value parameter is one of the most important parameters in determining the output power value of photovoltaic panels. Accurate prediction of this parameter is crucial for dispatching and load management planning. Managers and designers encounter economic and managerial challenges due to the uncertainty and difficulty in predicting solar radiation levels. This research introduces a highly accurate prediction method utilizing tree-based methods, enhanced by meta-heuristic algorithms to boost performance. The proposed method emphasizes preventing overfitting and ensuring high reliability for use in Internet of Things systems. Meta-heuristic algorithms are utilized for optimizing tree-based methods, as well as for feature and instance selection. Employing meta-heuristic methods as the main innovation in this research not only optimizes machine learning model settings but also mitigates the impact of noise, outliers, and ineffective inputs, thereby enhancing the final output quality. Utilizing an innovative fitness function in model optimization enhances prediction accuracy and adaptability to real photovoltaic power plant environments. The final outcome is a strong model that has a score of 0.95 with the R-square criterion and is optimal model.

Keywords: Internet of Things, Decision Tree, Machine Learning, Bat Algorithm, Photovoltaic Power Plants.

Highlights

- Accurate prediction of the amount of solar radiation as an important parameter in determining the amount of output power of photovoltaic panels.
- Optimizing tree-based models with meta-heuristic algorithms for prediction of solar radiation parameter.
- Balance the accuracy, complexity, and suitability of the final model for IoT device implementation.
- In the end, a strong model that has a score of 0.95 with the R-square criterion was obtained in this research.
- The final model can be implemented in the environment of power plants based on the Internet of Things.

Citation: N. Ashrafi Khozani, M. Mahmoudi, and Sh. Nasr Esfahani, "Optimizing Solar Radiation Prediction Based on The Internet of Things Platform in Photovoltaic Power Plant," *Journal of Southern Communication Engineering*, vol. 13, no. 52, pp. 33–44, 2024, doi: 10.30495/jce.2023.1996606.1224, [in Persian].

مقاله پژوهشی

بهینه‌سازی پیش‌بینی تابش خورشیدی بر اساس بستر اینترنت اشیاء در نیروگاه فتوولتائیک

ندا اشرفی خوزانی^۱ | مریم محمودی*^۲ | شبنم نصر اصفهانی^۳

چکیده:

پارامتر مقدار تابش خورشیدی یکی از مهم‌ترین پارامترها در تعیین مقدار توان خروجی پنل‌های فتوولتائیک است. پیش‌بینی دقیق این پارامتر برای برنامه‌ریزی در واحدهای دیسپچینگ (Dispatching) و مدیریت بار از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. عدم قطعیت در میزان تابش خورشیدی و سختی پیش‌بینی آن، طراحان را با چالش‌های اقتصادی و مدیریتی مواجه می‌کند. در این پژوهش یک روش پیش‌بینی با دقت بالا با استفاده از روش‌های مبتنی بر درخت و بهبود عملکرد این روش‌ها به کمک الگوریتم‌های فراابتکاری ارائه می‌شود. تأکید اصلی در روش پیشنهادی عدم بیش-برازش و قابلیت اتکای بالا و قابلیت به‌کارگیری در سیستم‌های اینترنت اشیاء است. بنابراین، الگوریتم‌های فراابتکاری در بهینه‌سازی روش‌های مبتنی بر درخت و همین‌طور در انتخاب ویژگی و انتخاب نمونه‌ها نیز دخیل شده‌اند. لذا استفاده از روش‌های فراابتکاری به عنوان جنبه‌ی نوآوری اصلی این پژوهش، نه تنها استفاده برای به دست آوردن تنظیمات بهینه‌ی مدل‌های یادگیری ماشین بلکه در کاهش اثر نویزها، داده‌های پرت (Outlier) و ورودی‌های کم‌اثر نیز به بهبود کیفیت خروجی نهایی کمک کرده است. به علاوه مناسب‌سازی نتایج پیش‌بینی برای استفاده عملی در محیط نیروگاه‌های فتوولتائیک موضوع پراهمیتی است. این موضوع که از طریق تابع برازش نوآورانه این پژوهش در بهینه‌سازی مدل‌ها انجام پذیرفته است، باعث می‌شود که خروجی نهایی علاوه بر دقت بالا از نظر سهولت پیاده‌سازی در محیط‌های واقعی نیروگاه‌های فتوولتائیک نیز بهینه باشد. خروجی نهایی، یک مدل قوی است که با معیار مربع-R دارای امتیاز ۰/۹۵ است و از نظر سادگی تا حد زیادی بهینه است.

کلید واژه‌ها: الگوریتم خفاش، اینترنت اشیاء، درخت تصمیم، نیروگاه‌های فتوولتائیک، یادگیری ماشین

^۱ دانشکده مهندسی کامپیوتر، واحد میمه، دانشگاه آزاد اسلامی، میمه، ایران، anahid.shaabani@gmail.com

^۲ دانشکده مهندسی کامپیوتر، واحد میمه، دانشگاه آزاد اسلامی، میمه، ایران، Mahmoudi.m174@iau.ac.ir

^۳ دانشکده مهندسی برق، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد میمه، میمه، ایران، nasr.sh.2010@gmail.com

نویسنده مسئول

*مریم محمودی، مربی، دانشکده کامپیوتر، واحد میمه، دانشگاه آزاد اسلامی، میمه، ایران، Mahmoudi.m174@iau.ac.ir

تاریخ دریافت: ۲۵ شهریور ۱۴۰۲

تاریخ بازنگری: ۲۴ آذر ۱۴۰۲

تاریخ پذیرش: ۱ دی ۱۴۰۲

<https://doi.org/10.30495/jce.2023.1996606.1224>

۱-مقدمه

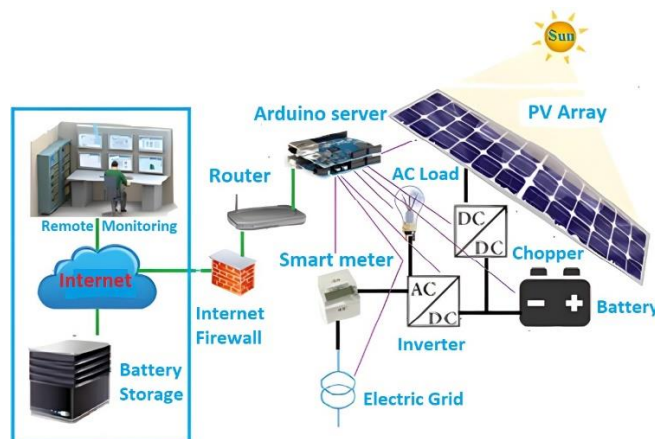
به طور کلی، سیستم‌های فتوولتائیک به سیستم‌هایی اطلاق می‌شود که از نور خورشید برای تولید برق استفاده می‌کنند. این سیستم‌ها شامل مجموعه‌ای از ماژول‌های فتوولتائیک (سلول‌های خورشیدی) هستند که نور خورشید را به انرژی الکتریکی

تبدیل می‌کنند. استفاده از سیستم‌های فتوولتائیک^۱ به عنوان یکی از انواع منابع تولید انرژی پاک، در سال‌های اخیر به طور چشمگیری در بسیاری از کشورها افزایش یافته است. اما این سیستم‌ها دارای عدم قطعیت در تولید انرژی هستند که می‌تواند برای شبکه‌های برق مشکلاتی ایجاد کند. برای مثال، افزایش تولید انرژی در سیستم‌های فتوولتائیک در روزهای آفتابی باعث افزایش ولتاژ در شبکه می‌شود و در صورت عدم مدیریت مناسب می‌تواند باعث اتلاف انرژی، خرابی تجهیزات و حتی ایجاد نقص در شبکه شود. بنابراین، برای جلوگیری از این مشکلات، مدیریت دقیق تولید انرژی سیستم‌های فتوولتائیک و پیش‌بینی دقیق عدم قطعیت در تولید انرژی این سیستم‌ها برای شبکه‌های برق بسیار مهم و ضروری است.

اینترنت اشیاء^۲ امروزه نقشی حیاتی در جنبه‌های مختلف زندگی انسان‌ها از کشاورزی و صنعت تا پزشکی و شهرهای هوشمند بازی می‌کند. به صورت خلاصه اینترنت اشیاء فناوری نوینی است که در آن برای هر موجودیتی (اعم از انسان و یا اشیاء) قابلیت دریافت و ارسال داده از طریق شبکه‌ی اینترنت یا اینترنت، فراهم می‌گردد. اینترنت اشیاء در واقع زیرساختی از شبکه پویای خود تنظیم شونده با پروتکل‌های ارتباطی استاندارد و یکپارچه است که در آن اشیاء فیزیکی و مجازی، دارای هویت، ویژگی‌های فیزیکی و شخصیت‌های مجازی هستند و به صورت یکپارچه درون زیرساخت اطلاعاتی تجمع شده‌اند. نیروگاه‌های خورشیدی فتوولتائیک نیز از این موضوع مستثنی نیستند و به صورت یکپارچه درون زیرساخت اطلاعاتی تجمع شده‌اند. نیروگاه‌های خورشیدی فتوولتائیک نیز از این موضوع مستثنی نیستند و به صورت یکپارچه درون زیرساخت اطلاعاتی تجمع شده‌اند. نیروگاه‌های خورشیدی فتوولتائیک نیز از این موضوع مستثنی نیستند و به صورت یکپارچه درون زیرساخت اطلاعاتی تجمع شده‌اند.

بروز خطاهای احتمالی در این نیروگاه‌ها مورد توجه قرار گرفته‌اند. به عنوان نمونه، یک سیستم کنترل نیروگاه فتوولتائیک در سال ۲۰۱۸ در [۱] پیشنهاد شده است که دارای سه لایه مختلف است. لایه‌ی اول شامل تجهیزات محیطی در مکان نیروگاه اعم از پنل‌های فتوولتائیک، سنسورها، سوئیچ‌ها و غیره است. لایه‌ی دوم شامل سرور مرکزی و روتر برای اتصال امن به شبکه است و آخرین لایه شامل اینترنت و پایگاه‌های داده است که کنترل و پایش این سیستم را به عهده دارد. معماری کلی این سیستم در شکل ۱ نمایش داده شده است. در این معماری، لایه اول شامل محیط طراحی سیستم فتوولتائیک است که در آن تمام اجزا مطابق با تنظیمات مورد نیاز برای تکمیل کامل نیازهای کاربر به هم متصل شدند. لایه دوم که به عنوان اتصال بین طراحی‌های سخت‌افزاری سیستم فتوولتائیک به وب سرور از طریق یک روتر با گزینه فایروال اینترنتی عمل می‌کند. اطلاعات از سرور به لایه سوم که لایه نظارت و کنترل از راه دور است داده می‌شود. در اینجا سرور اطلاعات جمع‌آوری شده در مورد سیستم فتوولتائیک را به دستگاه‌های ذخیره‌سازی که می‌توان از آن‌ها گزارش‌های دوره‌ای تولید کرد، تحویل می‌دهد.

از آنجایی که با توجه به این معماری و روش‌های مشابه، کنترل سیستم‌های فتوولتائیک به کمک اینترنت اشیاء مورد توجه قرار گرفته است، نیاز به توسعه مدل‌های متناسب با اینترنت اشیاء که پارامترهای مهم را به منظور کنترل دقیق‌تر این نیروگاه‌ها پیش‌بینی می‌کند از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است.



شکل ۱: معماری اینترنت اشیاء برای کنترل نیروگاه فتوولتائیک [۱]

Figure 1. Internet of Things architecture for photovoltaic power plant control [1]

¹ Photovoltaic

² Internet of Things

پارامتر مقدار تابش خورشیدی یکی از مهم‌ترین پارامترها در تعیین مقدار توان خروجی پنل‌های فتوولتائیک است. این پارامتر که به شدت یا توان تابشی خورشید نیز شناخته می‌شود، با میزان انرژی تولیدی در نیروگاه‌های فتوولتائیک رابطه مستقیم دارد و آن را با W/m^2 نشان می‌دهند. اگر شدت تابش را در پارامتر زمان ضرب کنیم به انرژی تابشی خورشید می‌رسیم و واحد آن را با Wh/m^2 یا Kwh/m^2 نشان می‌دهند. معادله ۱، رابطه بین تابش و جریان و توان ماژول‌ها را نمایش می‌دهد که در آن، $G1$ و $G2$ میزان تابش‌ها (بر حسب W/m^2)، $I1$ و $I2$ جریان متناظر ماژول‌ها (در A) هستند و $P1$ و $P2$ توان حاصل در هنگام تغییر تابش (بر حسب W) هستند. لازم به ذکر است که در این پژوهش تابش خورشیدی به عنوان پارامتر وابسته در نظر گرفته شده که مقادیر آن توسط سنسورهای مختلف اینترنت اشیا به همراه پارامترهای مستقلی که می‌توانند در آن مؤثر باشند اندازه‌گیری شده و مجموعه داده‌های مورد استفاده را تشکیل می‌دهد.

$$\frac{G1}{G2} = \frac{I2}{I1} = \frac{P2}{P1} \quad (1)$$

پیش‌بینی دقیق این پارامتر برای برنامه‌ریزی در واحدهای دیسپچینگ^۱ و مدیریت بار از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. این پارامتر همچنین در حفظ پایداری ولتاژ و فرکانس شبکه و آماده‌سازی نیروگاه‌های پشتیبان نیز حائز اهمیت است. عدم قطعیت در میزان تابش خورشیدی و سختی پیش‌بینی کوتاه مدت آن، مدیران و طراحان سیستم‌هایی که از انرژی خورشیدی بهره می‌گیرند را با چالش‌های اقتصادی و مدیریتی مواجه می‌کند. از این رو یک چارچوب دقیق و دارای عمومیت بالا که بتواند در سیستم‌های اینترنت اشیا که محیط‌های این نیروگاه‌ها را کنترل می‌کنند به خوبی اجرا شود، می‌تواند کمک شایانی در این زمینه داشته باشد [۲]. در این پژوهش، یک چارچوب پیش‌بینی تابش خورشیدی با ویژگی‌های زیر ارائه می‌شود:

▪ قابلیت پیاده‌سازی در سیستم‌های اینترنت اشیا با مصرف بهینه منابع

▪ دقت و عمومیت بالا

▪ عدم وجود مشکل بیش برآزش^۲

اهمیت قابل توجه تحلیل تابش خورشیدی حتی پیش از اینکه مدل‌های یادگیری ماشین در حوزه‌های مختلف علمی و مهندسی به طور گسترده به کار گرفته شوند، دانشمندان را بر آن داشت که مدل‌هایی برای تحلیل این پدیده ارائه کنند. مدل انگستروم [۳] و حالت ارتقا یافته‌ی آن یعنی مدل انگستروم-پرسکات [۴] را می‌توان اولین تلاش‌ها در این زمینه دانست. در طی سالیان متمادی، روش‌های متعدد دیگری بر مبنای همین پژوهش‌ها ارائه شد که برخی از آن‌ها در منابع [۵،۷] قابل مشاهده هستند. اما آنچه برای ما به عنوان پیشینه این پژوهش از اهمیت بیشتری برخوردار است استفاده از روش‌های یادگیری ماشین در این زمینه است که در ادامه به برخی از آن‌ها می‌پردازیم. شبکه‌های عصبی مصنوعی و سایر روش‌های مبتنی بر آن، پایه بسیاری از پژوهش‌ها در این زمینه قرار گرفته‌اند. از جمله ملیت و همکارانش در [۲] یک مدل شبکه عصبی برای مدل‌سازی داده‌های تابش خورشیدی با کاربرد سایزینگ^۳ سیستم فتوولتائیک ارائه کرده‌اند. همچنین، کائو و همکارانش در [۸]، یک روش ترکیبی با استفاده از شبکه‌های عصبی مصنوعی و تحلیل موجک برای پیش‌بینی تابش خورشیدی در یک شبانه‌روز را توسعه داده‌اند. داده‌های استفاده شده در این تحقیق دیتای تاریخی روزانه مقدار تابش است. در [۹] نیز مدل شبکه‌های عصبی نوع LSTM^۴ برای پیش‌بینی این پارامتر استفاده شده است با این تفاوت که داده‌های مورد استفاده در آن داده‌های هواشناسی مانند دما، رطوبت و غیره است. روش متفاوتی در [۱۰] برای پیش‌بینی نوسانات تابش ارائه شده است که بر تصویربرداری از آسمان مبتنی است. بازه زمانی پیش‌بینی در این تحقیق ۵ تا ۱۰ دقیقه است و بر همین اساس، پیش‌بینی کوتاه مدت به شمار می‌آید. تکنیک یادگیری ماشینی که در این تحقیق به کار رفته است، شبکه‌های عصبی کانولوشنی عمیق^۵

¹ Dispatching

² Overfitting

³ Sizing

⁴ Long-Short Term Memory

⁵ Deep convolutional neural network

است. همچنین در [۱۱] مدلی را برای پیش‌بینی تابش خورشیدی در بازه‌های کوتاه مدت معرفی شده است که می‌تواند برای هر موقعیت جغرافیایی مورد استفاده قرار بگیرد، بدون اینکه به اندازه‌گیری‌های میدانی نیاز داشته باشد. این روش به جای اینکه استفاده از اطلاعات ماهواره‌ای کند پیش‌بینی‌های هواشناسی را در قالب شبکه‌های عصبی عمیق استفاده کرده است. همچنین در رویکردی که در [۱۲] پیشنهاد شده است، مدلی برای پیش‌بینی تابش با استفاده از شبکه‌های عصبی نوع کانولوشنی ارائه شده است. داده‌های ورودی به صورت ۱۵ حالت هواشناسی شامل ابری، نیمه‌آبری، صاف و غیره است که از داده‌های ایستگاه هواشناسی نمونه‌برداری می‌شوند. به منظور بهینه‌سازی‌های ابرپارامترهای شبکه‌ی عصبی پیشنهادی، از الگوریتم ترکیبی PSO/GA^۱ استفاده شده است که از این جنبه شباهت بیشتری به پژوهش موجود دارد. ماشین بردار پشتیبان نیز در [۱۳] به منظور مدل‌سازی و پیش‌بینی تابش در بازه‌های زمانی ۳ ساعته به کار گرفته شده است. این پژوهش به طور خاص برای خانه‌های هوشمند که از انرژی خورشیدی استفاده می‌کنند طراحی شده است و پارامترهایی همچون دما، روز، سال، سرعت باد، پوشش ابر و غیره برای انجام پیش‌بینی مورد استفاده قرار گرفته‌اند.

در پژوهش‌های مشابه انجام شده که به مهم‌ترین آن‌ها اشاره شد، عموماً به دست آوردن یک مدل پیش‌بینی تابش خورشیدی با دقت بالا هدف قرار گرفته است. به همین دلیل، هرچند مدل‌های دقیقی برای پیش‌بینی تابش خورشیدی به دست آمده است در بسیاری از موارد فاقد تحلیل‌های مربوط به عمومیت مدل‌ها (بیش-برازش) هستند. از طرفی امکان عملی استفاده از مدل‌ها در سیستم‌های اینترنت اشیا در محیط نیروگاه‌های فتوولتائیک در مدل‌سازی در نظر گرفته نشده است. لذا در این پژوهش سعی شده است که با انتخاب مدل مناسب و روش مناسب برای بهینه‌سازی مدل به دست آمده دارای سرعت و سهولت پیاده‌سازی کافی برای استفاده در این نوع محیط‌ها مدنظر قرار داده شود. به طور خلاصه در این پژوهش، استفاده از روش‌های فرا ابتکاری به عنوان جنبه اصلی نوآوری، نه تنها برای بدست آوردن تنظیمات بهینه مدل‌های یادگیری ماشین بلکه به منظور کاهش اثر نویزها، داده‌های پرت و ورودی‌های کم اثر نیز به بهبود کیفیت خروجی نهایی مورد استفاده قرار گرفته است. علاوه بر این، مناسب‌سازی نتایج پیش‌بینی برای استفاده عملی در محیط‌های نیروگاه‌های فتوولتائیک، که در این پژوهش مورد توجه قرار گرفته است، جنبه‌ی نوآوری پراهمیتی است. با استفاده از تابع برازش نوآورانه مورد استفاده در این پژوهش برای بهینه‌سازی مدل‌ها، خروجی نهایی علاوه بر داشتن دقت بالا، از نظر سهولت پیاده‌سازی در محیط‌های واقعی نیروگاه‌های فتوولتائیک نیز بهبود یافته است.

۲- روش پیشنهادی

در این پژوهش، هدف اصلی توسعه‌ی یک مدل دقیق برای پیش‌بینی تابش خورشیدی است که قابلیت استفاده در اینترنت اشیا را دارد. لذا مدل‌های گروهی (تجمیعی) مبتنی بر درخت تصمیم به عنوان پایه‌ی اصلی مدل‌سازی انتخاب شدند. دلیل این انتخاب تفسیرپذیر بودن ذاتی روش‌های مبتنی بر درخت است. این روش‌ها در واقع از تعدادی درخت تصمیم مختلف که در کنار یکدیگر، یک مدل قوی‌تر را می‌سازند، تشکیل می‌شوند. در این بخش ابتدا به معرفی بلوک‌های سازنده چارچوب این پژوهش پرداخته می‌شود و در پایان روش پیشنهادی ارائه می‌شود.

۲-۱- پیش پردازش

پیش‌پردازش داده‌ها یک مرحله مهم در فرآیند یادگیری ماشین است که شامل تبدیل و تهیه داده‌ها قبل از ورود به مدل یادگیری می‌شود. دو فعالیت مهم این مراحل مهم شامل حذف داده‌های پرت و نرمال‌سازی هستند. حذف داده‌های پرت به منظور حذف داده‌های نامناسب، نادرست یا غیرعادی استفاده می‌شود. این داده‌ها ممکن است ناقص یا با مقادیر غیرمنطقی باشند و ممکن است تحت تأثیر خطاهای اندازه‌گیری، نویزهای تصادفی یا خطاهای دیگر قرار گرفته باشند. حذف این داده‌ها می‌تواند باعث بهبود کیفیت داده‌ها و دقت مدل یادگیری شود، زیرا داده‌های پرت ممکن است در تصمیم‌گیری مدل تأثیر منفی داشته باشند [۸].

¹ Particle Swarm Optimization/Genetic Algorithm

نرمال‌سازی داده‌ها به منظور قرار دادن داده‌ها در یک مقیاس یکسان و قابل مقایسه استفاده می‌شود. این فرآیند معمولاً با استفاده از روش‌های مختلف مانند مقیاس‌بندی، زیرگروه‌بندی یا تبدیلات ریاضی انجام می‌شود. با نرمال‌سازی داده‌ها، واحدهای مختلف و مقیاس‌های متفاوت داده‌ها به یک مقیاس مشترک تبدیل می‌شوند. این موضوع باعث می‌شود که مدل‌های یادگیری ماشین بتوانند به خوبی الگوها و روابط بین داده‌ها را درک کنند و عملکرد بهتری در پیش‌بینی و تصمیم‌گیری داشته باشند [۱۴].

۲-۲- درخت تصمیم

مدل درخت تصمیم یک الگوریتم یادگیری ماشین است که برای مسائل طبقه‌بندی و پیش‌بینی استفاده می‌شود. این مدل بر اساس یک ساختار درختی تصمیم‌گیری ساخته می‌شود و به صورت سلسله مراتبی قواعد و شرایط را بررسی می‌کند تا به تصمیمات نهایی برسد. در مدل درخت تصمیم، هر گره از درخت نمایانگر یک ویژگی است که به عنوان یک شرط بر روی داده‌ها بررسی می‌شود. با توجه به مقدار ویژگی در داده‌ها، درخت به شاخه‌های مختلف تقسیم می‌شود [۱۵]. هر شاخه از درخت نمایانگر یک مقدار ممکن برای ویژگی و یا یک مجموعه از مقادیر است. در نهایت، برگ‌ها (گره‌های پایانی درخت که فاقد گره‌های فرزند هستند) نمایانگر کلاس‌های طبقه‌بندی شده یا مقدار پیوسته پیش‌بینی شده برای داده‌ها هستند. مزیت اصلی مدل درخت تصمیم این است که آن راحت قابل فهم و تفسیر است و همچنین می‌تواند به صورت مجموعه‌ای از قوانین بیان شود. به علاوه، درخت تصمیم قابلیت کاربرد در داده‌های عددی و دسته‌ای را دارد و به خوبی با داده‌های کم‌کاربرد یا ناقص سازگاری دارد. در کل، مدل درخت تصمیم به عنوان یک ابزار قوی در یادگیری ماشین مورد استفاده قرار می‌گیرد که قابلیت طبقه‌بندی و پیش‌بینی دقیق را در مسائل مختلف ارائه می‌دهد [۱۶].

۲-۳- جنگل تصادفی

مدل جنگل تصادفی یک الگوریتم یادگیری ماشین است که بر پایه ترکیب چندین درخت تصمیم ساخته می‌شود. این مدل از ترکیب تصمیم‌های گوناگون چندین درخت تصمیم بهره می‌برد تا تصمیم‌های بهتر و قابل اطمینان‌تری را در مورد داده‌ها ارائه دهد. در مدل جنگل تصادفی، هر درخت تصمیم به صورت مستقل ساخته می‌شود. این درخت‌ها بر اساس تصادفی‌سازی در فرآیند ساخت شاخه‌بندی مورد استفاده قرار می‌گیرند. به عبارت دیگر، در هر مرحله از ساخت درخت، فقط یک زیرمجموعه تصادفی از ویژگی‌ها برای تقسیم داده‌ها استفاده می‌شود. این عمل تصادفی باعث ایجاد تنوع در درخت‌ها می‌شود و از بیش‌برازش جلوگیری می‌کند. در نهایت، تصمیم نهایی مدل جنگل تصادفی، بر اساس آرایه‌ای از تصمیم‌های هر درخت گرفته می‌شود. با ترکیب نتایج چندین درخت، مدل جنگل تصادفی قادر است به صورت هم‌زمان بر روی داده‌های آموزش و داده‌های تست پیش‌بینی دقیقی ارائه دهد [۱۷].

مزیت اصلی مدل جنگل تصادفی این است که از کاهش واریانس^۱ و بیش‌برازش در مدل‌های تصمیم‌گیری تک درخت استفاده می‌کند. همچنین، این مدل قابلیت مقابله با داده‌های پرت، توانایی برخورد با داده‌های بزرگ، و قابلیت استخراج اهمیت ویژگی‌ها را داراست [۱۸].

۲-۴- آدا‌بوست

مدل آدا‌بوست^۲ یک الگوریتم یادگیری ماشین مبتنی بر مجموعه‌های ضعیف است که با استفاده از ترکیب آن‌ها یک مدل قوی‌تر و دقیق‌تر را ایجاد می‌کند. ایده اصلی این الگوریتم این است که ترکیب چندین تصمیم‌گیری ضعیف به وسیله وزن‌دهی به هر یک از آن‌ها، منجر به ساخت یک تصمیم‌گیری قوی می‌شود [۱۹]. در مدل آدا‌بوست، درخت‌های تصمیم به عنوان تصمیم‌گیری‌های ضعیف مورد استفاده قرار می‌گیرند. ابتدا هر درخت تصمیم با استفاده از مجموعه داده‌های آموزش ساخته

¹ Variance

² AdaBoost

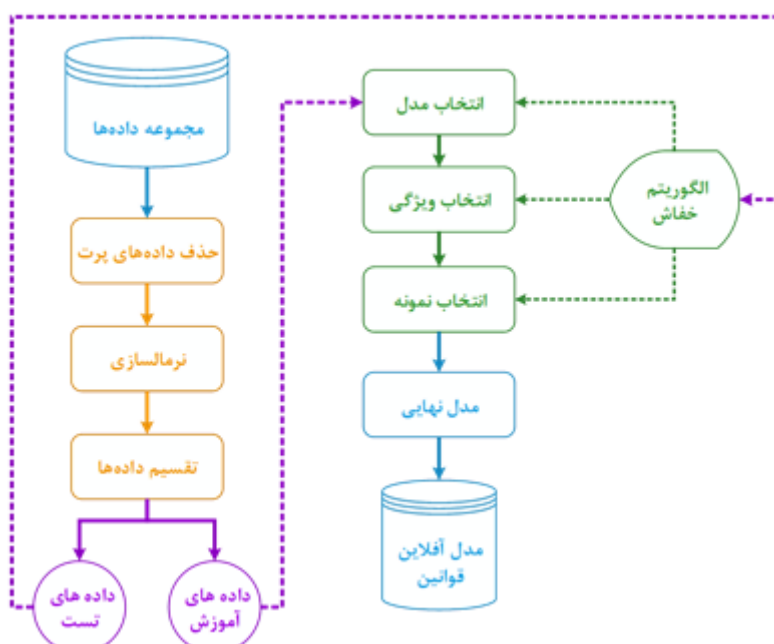
می‌شود. سپس به هر داده‌ی آموزشی وزنی اختصاص داده می‌شود و درخت با استفاده از این وزن‌ها آموزش داده می‌شود. در این مرحله، تمرکز بر داده‌هایی که به درستی تشخیص داده نشده‌اند، بیشتر می‌شود. سپس درخت تصمیم نهایی با توجه به وزن‌های داده‌ها ساخته می‌شود. به درخت‌هایی که توانستند داده‌های نادرست را به خوبی تشخیص دهند، در ادامه فرآیند وزن بیشتری اختصاص می‌دهند. این روند تکرار می‌شود و در هر مرحله، درختی جدید با توجه به وزن‌های جدید ساخته می‌شود. در نهایت، تمام درخت‌های ساخته شده با استفاده از روش اجماع ترکیب می‌شوند تا مدل نهایی ادابوست به دست آید. این مدل، با توجه به وزن‌های اختصاص داده شده به هر درخت، تصمیماتی را اتخاذ می‌کند که به دقت بیشتری در پیش‌بینی و تصمیم‌گیری می‌انجامد. در واقع، این وزن‌ها به مدل اجازه می‌دهند تا در تصمیم‌گیری بیشترین تأثیر را داشته باشند. به عبارت دیگر، درخت‌هایی که در تشخیص داده‌های پیچیده و دشوار موفقیت بیشتری دارند، نقش مهم‌تری در تصمیم‌گیری نهایی دارند [۲۰].

مزیت اصلی مدل ادابوست این است که با ترکیب چندین درخت تصمیم ضعیف، یک مدل قوی‌تر و مقاوم‌تر در برابر بیش‌برازش ایجاد می‌کند. همچنین، با تمرکز بر داده‌هایی که توسط درخت‌های قبلی اشتباه تشخیص داده شده‌اند، مدل توانایی بهبود دقت و عملکرد خود را افزایش می‌دهد. این الگوریتم قابلیت استفاده در مسائل دسته‌بندی و رگرسیون^۱ را دارد و در بسیاری از موارد با عملکرد برتر نسبت به الگوریتم‌های تک درخت مانند درخت تصمیم استفاده می‌شود [۲۱].

۲-۵- روش پیشنهادی

در اینجا از دو روش جنگل تصادفی (که در آن تعدادی درخت تصمیم به صورت مستقل از هم پیش‌بینی را انجام می‌دهند و در مدل نهایی نتایج آن‌ها با هم ترکیب می‌شود) و ادابوست (که در آن هر مدل درخت تصمیم بر اساس داده‌هایی که در مراحل قبل با خطای بالا پیش‌بینی شده است توسعه می‌یابد) استفاده می‌کنیم. اما از آنجایی که این مدل‌ها خود دارای ابر-پارامترهایی هستند که مقدار آن‌ها تأثیر مستقیمی در نتیجه نهایی دارد، انتخاب این پارامترهای حیاتی و همچنین انتخاب ویژگی‌ها (ورودی‌ها) و نمونه‌های مورد استفاده در مرحله‌ی آموزش از اهمیت خاصی برخوردار است. به عنوان جنبه‌ی اصلی نوآوری، در این پژوهش بر مبنای ایده‌ی مطرح شده در [۱۹] برای بهینه‌سازی این موارد از الگوریتم فرا ابتکاری خفاش [۲۲] استفاده شده است که همانند الگوریتم ژنتیک یک الگوریتم الهام گرفته شده از طبیعت است و برای مسائل بهینه‌سازی بسیار پرکاربرد است. در ادامه به توضیح جزئیات روش پیشنهادی که معماری کلی آن در شکل ۲ نمایش داده شده است، می‌پردازیم. یکی از اولین اقدامات در هر مسئله یادگیری نظارت‌شده، پیش‌پردازش است. در اینجا در مرحله پیش‌پردازش ابتدا داده‌های پرت شناسایی و حذف می‌شوند. به این منظور از روش فاصله‌ی کوک [۲۴، ۲۳] استفاده می‌شود. به علاوه در این مرحله عمل نرمال‌سازی داده‌ها نیز انجام می‌شود، عدم نرمال‌سازی ورودی‌ها می‌تولند باعث شود که ویژگی‌هایی که بازه‌ی تغییر گسترده‌تری دارند تأثیر زیادی در مدل نهایی به صورت غیر عادی ایفا کرده و از دقت مدل بکاهد. لذا مقادیر همه ورودی‌ها در این مرحله نرمال‌سازی می‌شوند. در آخرین فعالیت از مراحل پیش‌پردازش، داده‌ها به دو زیر مجموعه داده‌های آموزش و داده‌های تست تقسیم می‌شوند. از آنجایی که داده‌های تست برای آزمایش و محاسبه‌ی معیارهای مختلف در مدل‌های تولید شده مورد استفاده قرار می‌گیرند و در مرحله آموزش نقشی ندارد، تعداد این داده‌ها باید محدود و بسیار کوچک‌تر از داده‌های آموزش باشد. لذا این تقسیم با نسبت ۹ به ۱ انجام می‌پذیرد و صرفاً ۱۰ درصد از داده‌ها به صورت تصادفی به عنوان داده‌های تست انتخاب می‌شوند.

¹ Regression



شکل ۲: معماری کلی روش پیشنهادی

Figure 2. The general architecture of the proposed method

پس از پیش‌پردازش، نوبت به فعالیت‌های سه‌گانه‌ای می‌رسد که تحت عنوان کلی انتخاب مدل شناخته می‌شوند. اما این فعالیت‌ها صرفاً شامل انتخاب یک الگوریتم برای انجام مدل‌سازی نیستند. در این پژوهش انتخاب الگوریتم مورد استفاده (یکی از دو الگوریتم جنگل تصادفی و ادابوست که پیش‌تر ذکر شد)، انتخاب مقادیر ابر پارامترها و انتخاب نمونه‌ها و ویژگی‌های مورد استفاده در این مرحله انجام می‌پذیرد. در واقع اگر هر ترکیب از مواردی که ذکر شد را به عنوان یک راه حل در نظر بگیریم این راه حل یک آرایه عددی است که اولین عنصر آن الگوریتم مورد استفاده را به صورت ۰ و ۱ مشخص می‌کند. سپس ۵ عنصر بعدی مقادیر ابر پارامترها را مشخص می‌کند. این ابر پارامترها عبارتند از،

- تعداد درخت تصمیم (مدل‌های پایه)

- حداکثر عمق درخت تصمیم

- حداکثر تعداد ویژگی مورد بررسی در هر گره از درخت تصمیم

- تعداد نمونه لازم برای تشکیل یک انشعاب در درخت تصمیم

- نرخ یادگیری (برای ادابوست)

سایر عناصر یک راه حل نیز حضور-عدم حضور ویژگی‌ها و نمونه‌های موجود در مجموعه داده‌های آموزش را برای الگوریتم مشخص می‌کند. بنابراین با هر یک راه حل که در بالا توضیح داده شد می‌توانیم یک مدل کامل بسازیم که بر اساس مقادیر موجود در آرایه ذکر شده پیکره‌بندی شده است. با این توضیحات در واقع ما یک مساله بهینه‌سازی داریم که با روش‌های تکاملی و فرا ابتکاری قابل حل است. در اینجا ما الگوریتم خفایش را انتخاب کرده‌ایم. انگیزه‌ی این انتخاب همگرایی سریع این الگوریتم است.

از آنجایی که در مدل نهایی به دست آمده از این پژوهش باید علاوه بر دقت پیش‌بینی بالا، تا جای ممکن از پیچیدگی کمی برخوردار باشد. لذا در مقایسه ترکیب‌های مختلف با یکدیگر علاوه بر پارامتر دقت مدل باید تعداد درخت تصمیم و حداکثر عمق درخت را نیز مورد بررسی قرار دهیم. به دست آوردن نوعی تعادل بین دقت مدل و پیچیدگی آن باعث می‌شود مدل نهایی از نظر مصرف منابع محاسباتی در زمان پیاده‌سازی در این اینترنت اشیاء بهینگی بیشتری داشته باشد. به بیان دیگر، داشتن مدلی که علاوه بر دقت بالا دارای پیچیدگی بهینه نیز باشد هدف قابلیت پیاده‌سازی در سیستم‌های کنترلی مبتنی بر

اینترنت اشیا را تأمین می‌کند. بر همین اساس، تابع برازش را با استفاده از امتیاز R^2 که نمایانگر دقت مدل است و تعداد درخت تصمیم و حداکثر عمق که پیچیدگی مدل را نشان می‌دهند، این‌گونه تعریف می‌کنیم،

$$Fitness = \frac{100R^2}{MaxDept + MaxTree} \quad (2)$$

$$R^2 = \frac{(n \sum t_i o_i - \sum t_i \sum o_i)^2}{(n \sum t_i^2 - (\sum t_i)^2) - (n \sum o_i^2 - (\sum o_i)^2)} \quad (3)$$

در معادلات فوق n تعداد کل نقاط داده را مشخص می‌کند، t مقدار اندازه‌گیری شده (مقدار مورد انتظار) را نشان می‌دهد و o مقدار پیش‌بینی شده توسط مدل را مشخص می‌کند.

پس از انجام بهینه‌سازی، یک مدل نهایی به‌دست می‌آید که بهترین و دقیق‌ترین پیش‌بینی را از میان راه‌حل‌های مختلف تولید شده انجام می‌دهد. در این مرحله با توجه به اینکه هر درخت تصمیم (مدل پایه‌ی روش‌های مورد استفاده) می‌تواند به صورت مجموعه‌ای از قوانین بیان شود، می‌توانیم قوانین همه‌ی درخت‌های تولید شده توسط مدل نهایی را استخراج کرده و مجموعه قوانین از پیش تعیین شده‌ای را برای استفاده در محیط اینترنت اشیا داشته باشیم. این قوانین با توجه به اینکه ثابت بوده و نیازی به تغییر منظم و مدل‌سازی در سمت گره‌های اینترنت اشیا نیست. بنابراین سرپار اضافی نیز برای پیش‌بینی تابش خورشید اعمال نمی‌شود.

با توجه به امکان استخراج قوانین در روش پیشنهادی، این مدل به صورت خودکار برای تشخیص آفلاین تابش به کار می‌رود و می‌تواند در برابر شکست بستر مخابراتی و قطعی ارتباطات کمک کننده باشد. در واقع با این روش، قوانین پیش‌بینی‌کننده می‌تواند جایگزین توسعه تکراری مدل‌ها شده و این می‌تواند به بهبود قابل توجه ارتباطات و کاهش ریسک ناشی از قطعی ارتباطات در برابر شکست بستر مخابراتی منجر شود.

۲-۶- مجموعه داده‌ها و روش ارزیابی

به منظور آزمایش روش پیشنهادی که در بخش قبل بیان شد، مجموعه داده‌های ارائه شده در یکی از چالش‌های ناسا در پیش‌بینی شدت تابش در نظر گرفته شده است که در تعدادی از کارهای مشابه مانند [۲۵] استفاده شده است. این مجموعه داده‌ها مشتمل بر بیش از ۳۰ هزار بردار داده است که دارای ۱۱ ستون (ویژگی) مختلف است و در اکثر پژوهش‌های اخیر به عنوان یک مجموعه داده‌ای استاندارد به منظور مقایسه روش‌ها استفاده شده است. در این پژوهش ویژگی‌های مربوط به تاریخ و زمان ثبت رکورد مربوط حذف شده‌اند تا مدل‌سازی صرفاً بر اساس پارامترهای آب و هوایی دیگر انجام شود. در نهایت خروجی هدف مقدار تابش و ورودی‌های مدل‌سازی عبارتند از،

▪ دما

▪ فشار

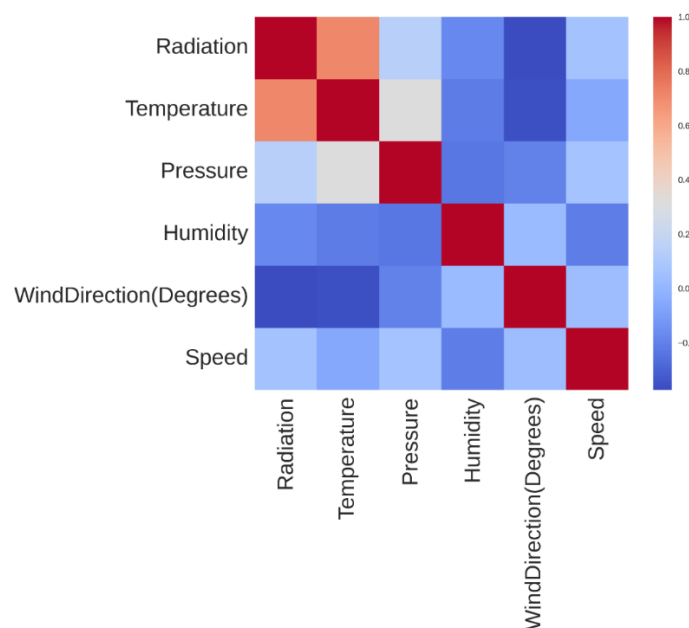
▪ رطوبت هوا

▪ جهت باد

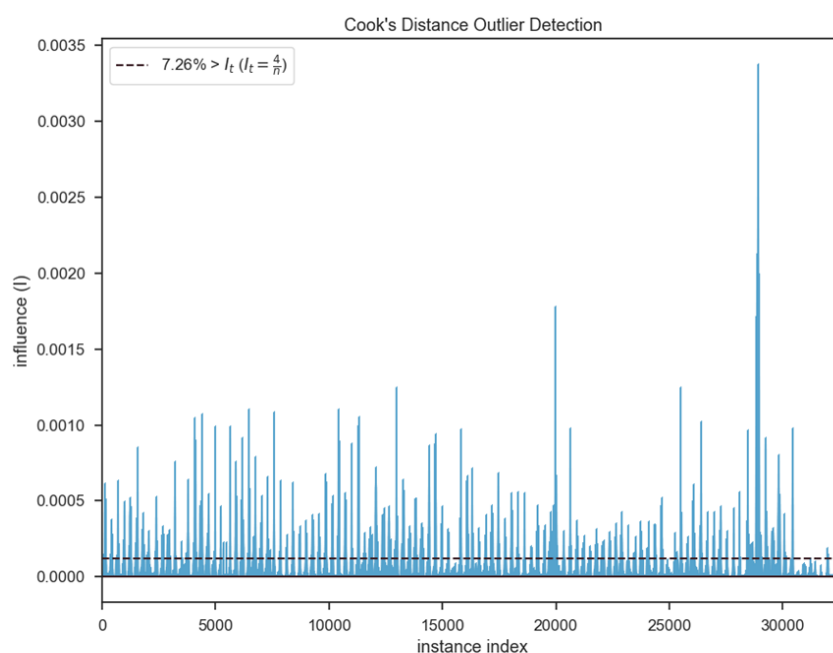
▪ سرعت باد

تحلیل ضرایب همبستگی پیرسون^۱ پارامترهای ورودی و خروجی در شکل ۳ نمایش داده شده است. از این نمودار می‌توانیم نتیجه بگیریم که هیچ رابطه کاملاً خطی بین مقادیر پارامترها وجود ندارد. لذا با توجه به این‌که تعداد پارامترها به نسبت کم است، حذف هیچ‌کدام از ورودی‌ها نیاز نیست. هر چند در ادامه در فعالیت انتخاب ویژگی ممکن است بعضی از این ویژگی‌ها حذف شوند اما در اینجا از هیچ یک از ورودی‌ها صرف نظر نمی‌کنیم.

¹ Pearson



شکل ۳: تحلیل همبستگی پیرسون
Figure 3. Pearson correlation analysis



شکل ۴: تحلیل داده‌های پرت با روش فاصله کوک
Figure 4. Analyzing outlier data with Cook's distance method

۳- نتایج شبیه‌سازی

در این بخش نتایج روش پیشنهادی را که به کمک زبان برنامه‌نویسی پایتون پیاده‌سازی شده است بررسی می‌کنیم. در مرحله پیش‌پردازش تحلیل کوک همان طور که در بخش روش پیشنهادی گفته شد انجام شده که نتایج آن در شکل ۴ نمایش داده شده است. بر این اساس ۷/۲ درصد از داده‌ها به عنوان داده پرت تشخیص داده شد و از مرحله آموزش مدل‌ها کنار گذاشته شد. بعد از حذف داده‌های پرت، بر مبنای آنچه در روش پیشنهادی بیان شد با اجرای تکرارهای الگوریتم خفاش، بهترین پیکره‌بندی برای پیش‌بینی شدت تابش به دست آمد. خروجی نهایی این بهینه‌سازی مدل جنگل تصادفی با ابرپارامترهای نمایش داده شده در جدول ۱ است.

جدول ۱: پارامترهای مدل نهایی

Table 1. parameters of the final model

نمونه لازم برای انشعاب	حداکثر تعداد ویژگی	حداکثر عمق	تعداد درخت تصمیم	ابر پارامتر
۳۲	۴	۲۵	۸۹	مقدار

مدل نهایی به دست آمده دارای امتیاز R^2 معادل ۰/۹۵۶ در مرحله آموزش و ۰/۹۴۸ برای داده‌های تست است که نشان‌دهنده یک دقت قابل قبول برای پیش‌بینی شدت تابش است. لازم به ذکر است که در تکرارهای الگوریتم بهینه‌سازی تعدادی از مدل‌های کاندید دقت بالاتری نیز از خود نشان دادند اما با توجه به اینکه فاصله دقت آموزش و تست در آن‌ها قابل توجه بود (بیش برآزش) و یا مدل پیچیدگی بالایی داشت (تعداد بالای درخت تصمیم)، این مدل‌ها با توجه به تابع برازشی که در این پژوهش تعریف کرده‌ایم به عنوان خروجی نهایی بهینه‌سازی انتخاب نشدند.

مدل نهایی جنگل تصادفی به دست آمده در این پژوهش دارای حداکثر عمق ۲۵ و تعداد درخت ۸۹ است، بنابراین استخراج همه‌ی قوانین برای پیش‌بینی شدت تابش به تعداد محدودی قانون منجر شده و می‌تواند به صورت آفلاین و مستقر در حافظه در دستگاه‌های اینترنت اشیاء مورد استفاده قرار گیرد.

همچنین به منظور اعتبارسنجی مدل نهایی از روش k-fold استفاده شد. این روش به کمک تقسیم داده‌ها به k بخش، هر بار یکی از بخش‌ها را به عنوان داده‌های اعتبارسنجی و بقیه بخش‌ها را به عنوان داده‌های آموزش استفاده کرده و مدل را با استفاده از داده‌های آموزش، آموزش داده و عملکرد آن را با داده‌های اعتبارسنجی ارزیابی می‌کند. این فرایند را k بار (در اینجا $k=10$) تکرار می‌کند و در هر مرحله، بخش‌های دیگر را به عنوان داده‌های آموزش و اعتبارسنجی استفاده می‌کند. سپس عملکرد مدل در هر بار تکرار، میانگین شده و به عنوان عملکرد نهایی مدل گزارش می‌شود. این روش اعتبارسنجی مدل را بهبود می‌بخشد و به دقت و استنباط قوی‌تری از عملکرد مدل در مواجهه با داده‌های تست می‌انجامد. نتیجه این الگوریتم اعتبارسنجی در مدل نهایی نشان‌دهنده انحراف معیار ۰/۰۱۴۸ در شاخص R^2 است. این عدد نشان می‌دهد که مدل به دست آمده از عمومیت بالایی برخوردار است.

جدول ۲: مقایسه با روش‌های موجود

Table 2. Comparison with existing methods

روش	میانگین امتیاز R^2 در ۱۰ تکرار	انحراف معیار R^2 در ۱۰ تکرار
روش پیشنهادی	۰/۹۵۶	۰/۰۰۱۴۸
شبکه‌های عصبی مصنوعی [۲]	۰/۹۴۸	۰/۰۰۹۴۲
شبکه‌های عصبی مصنوعی و تحلیل موجک [۳]	۰/۸۹۳	۰/۰۱۲۴۰
LSTM [۹]	۰/۹۴۱	۰/۰۱۱۰۷
شبکه‌های عصبی کانولوشنی [۱۱]	۰/۹۷۱	۰/۰۹۸۴۹
شبکه‌ی عصبی و الگوریتم ترکیبی PSO/GA [۱۲]	۰/۹۳۹	۰/۰۰۱۴۴
ماشین بردار پشتیبان [۱۳]	۰/۹۲۱	۰/۰۰۱۶۶

همچنین برخی دیگر از روش‌های ارائه شده بر روی داده‌های مشابه مورد آزمایش قرار گرفتند که مقایسه آن‌ها با روش پیشنهادی در جدول ۲ نمایش داده شده و نشان‌دهنده این واقعیت است که روش پیشنهادی علی‌رغم بهینه‌سازی برای حفظ سادگی مدل نهایی در بدترین حالت مشابه روش‌های موجود عمل کرده و در بسیاری از موارد از این روش‌ها دقیق‌تر است. در این مقایسه، تنها در یک مورد امتیاز روش پیشنهادی از سایر روش‌ها بر روی مجموعه داده مشابه کمتر است که با توجه انحراف معیار کمتر و همچنین سادگی بیشتر مدل بهینگی روش پیشنهادی قابل توجیه است. لازم به ذکر است که با توجه به یکسان نبودن مجموعه داده‌ها و همچنین معیارهای ارزیابی گزارش شده در پژوهش‌های موجود، این روش‌ها مجدداً بر اساس پارامترهای موجود در مقالات مربوط پیاده‌سازی شده و نتایج بر مجموعه داده‌های مشابه در این جدول گزارش شده است.

۴- نتیجه‌گیری

در این پژوهش، یک روش مبتنی بر درخت تصمیم به منظور پیش‌بینی شدت تابش ارائه شده‌است. روش پیش‌بینی با استفاده از الگوریتم فرا ابتکاری خفاش به منظور حفظ تعادل میان دقت مدل و سادگی و قابلیت پیاده‌سازی آن در دستگاه‌های اینترنت اشیا بهینه‌سازی شده‌است. در نهایت به یک مدل قوی که با معیار مربع-R دارای امتیاز ۰/۹۵ است و همچنین از نظر سادگی مدل گروهی تا حدود زیادی بهینه‌است، به دست آمد. لذا از روش پیشنهادی می‌توان به منظور ساختن مدل‌های آفلاین در محیط‌های نیروگاه‌های فتوولتائیک که با اینترنت اشیا مدیریت می‌شوند استفاده کرد. آنچه به‌عنوان آینده‌ی این روش پیشنهادی به منظور بهبود و گسترش نتایج آن می‌توان بیان نمود عبارتند از ارائه یک معماری جامع اینترنت اشیا برای نیروگاه‌های فتوولتائیک بر مبنای مدل ارائه شده در این پژوهش، ارائه یک مکانیزم هرس و بهینه‌سازی برای قوانین استخراج شده از مدل‌های مبتنی بر درخت و توسعه یک مجموعه داده‌های بومی از پارامترهای هواشناسی داخلی به منظور استفاده به عنوان ورودی روش پیشنهادی که می‌تواند کارایی مدل را برای نیروگاه‌های داخلی افزایش دهد.

مراجع

- [1] N. M. Kumar, K. Atluri and S. Palaparthi, "Internet of Things (IoT) in Photovoltaic Systems," *National Power Engineering Conference (NPEC)*, 2018, pp. 1-4, doi: 10.1109/NPEC.2018.8476807.
- [2] A. Mellit, M. Menghanem and M. Bendekhis, "Artificial neural network model for prediction solar radiation data: application for sizing stand-alone photovoltaic power system," *IEEE Power Engineering Society General Meeting*, 2005, San Francisco, CA, USA, 2005, pp. 40-44 Vol. 1, doi: 10.1109/PES.2005.1489526.
- [3] A. Angstrom, "Solar and terrestrial radiation: Report to the international commission for solar research on actinometric investigations of solar and atmospheric radiation," *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 1924, pp. 121-126, 1924, doi:10.1002/qj.49705021008.
- [4] J. Prescott, "Evaporation from a water surface in relation to solar radiation," *Transactions of the Royal Society of South Australia*, vol. 64, pp 114-118, 1940, doi: 10.4236/epe.2017.912045.
- [5] A. A. Trabea and M.M. Shaltout, "Correlation of global solar radiation with meteorological parameters over Egypt," *Renewable Energy*, vol. 21, pp. 297-308, Oct. 2000, doi:10.1016/S0960-1481(99)00127-5.
- [6] D.Yeboah-Amankwah and K.Agyeman, "Differential Ångstrom model for predicting insolation from hours of sunshine," *Solar Energy*, vol. 45, pp. 371-377, 1990, doi:10.1016/0038-092X(90)90158-9.
- [7] H. Ninomiya, "Study on application of amedas meteorological data to the simulation of building heat environment," University of Tokyo, 1994.
- [8] J. C . Cao and S. H. Cao, "Study of forecasting solar irradiance using neural networks with preprocessing sample data by wavelet analysis," *Energy*, vol. 31, pp. 3435-3445, Dec. 2006, doi: 10.1016/j.energy.2006.04.001.
- [9] X. Qing and Y. Niu, "Hourly day-ahead solar irradiance prediction using weather forecasts by LSTM," *Energy*, vol. 148, pp. 461-468, Apr. 2018, doi: 10.1016/j.energy.2018.01.177.
- [10] D. Pothineni, M. R. Oswald, J. Poland and M. Pollefeys, "KloudNet: Deep Learning for Sky Image Analysis and Irradiance Forecasting," *German Conference on Pattern Recognition*, 2018, pp. 535-551, doi:10.1007/978-3-030-12939-2_37.
- [11] J. Lago, K. D. Brabandere, F. D. Ridder and B. D. Schuttera, "Short-term forecasting of solar irradiance without local telemetry: A generalized model using satellite data," *SolarEnergy*, vol. 173, pp. 566-577, Oct. 2018, doi: 10.1016/j.solener.2018.07.050.
- [12] N. Dong, J. F. Chang, A. G. Wu and Z. K. Gao, "A novel convolutional neural network framework based

- solar irradiance prediction method,” *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 114, pp. 1-19, Jan. 2020, doi: 10.1016/j.ijepes.2019.105411.
- [13] N. Sharma, P. Sharma, D. Irwin and P. Shenoy, “Predicting solar generation from weather forecasts using machine learning,” *IEEE International Conference on Smart Grid Communications (SmartGridComm)*, 2011, pp. 528-533, doi: 10.1109/SmartGridComm.2011.6102379.
- [14] P. J. M. Ali and R. H. Faraj, “Data normalization and standardization: a technical report,” *Mach. Learn. Tech. Rep.*, vol. 1, no. 1, pp. 1-6, 2014, doi: 10.13140/RG.2.2.28948.04489.
- [15] Y.-Y. Song and L. Ying, “Decision tree methods: applications for classification and prediction,” *Shanghai archives of psychiatry*, vol. 27, no. 2, pp. 130-135, Apr. 2015, doi: 10.11919/j.issn.1002-0829.215044.
- [16] N. Bhargava, G. Sharma, R. Bhargava and M. Mathuria, “Decision tree analysis on j48 algorithm for data mining,” *Intrenational Journal of Advanced Research in Computer Science and Software Engineering*, vol. 3, no. 6, 2013.
- [17] D. Borup, B.J. Christensen, N.S. Mühlbach and M.S. Nielsen, “Targeting predictors in random forest regression,” *International Journal of Forecasting*, vol. 39, pp. 841–868, 2023, doi:10.1016/j.ijforecast.2022.02.010.
- [18] Y. Li *et al.*, “Random forest regression for online capacity estimation of lithium-ion batteries,” *Applied energy*, vol. 232, pp. 197-210, Dec. 2018, doi: 10.1016/j.apenergy.2018.09.182.
- [19] R. Seyghaly, J. Garcia, X. Masip-Bruin and M. M. Varnamkhasti, “Interference Recognition for Fog Enabled IoT Architecture using a Novel Tree-based Method,” *IEEE International Conference on Omni-layer Intelligent Systems (COINS)*, 2022, pp. 1-6, doi: 10.1109/COINS54846.2022.9854944.
- [20] G. Sembina, “Building a scoring model using the ADABOOST ensemble model,” *International Conference on Smart Information Systems and Technologies (SIST)*, 2022, doi:10.1109/sist54437.2022.9945713.
- [21] D. P. Solomatine and D. L. Shrestha, “AdaBoost.RT: a boosting algorithm for regression problems,” *IEEE International Joint Conference on Neural Networks (IEEE Cat. No.04CH37541)*, Budapest, Hungary, 2004, pp. 1163-1168 vol.2, doi: 10.1109/IJCNN.2004.1380102.
- [22] X. S. Yang, “A New Metaheuristic Bat-Inspired Algorithm,” *Nature Inspired Cooperative Strategies for Optimization (NICSO 2010)*, vol. 284, pp. 65–74, 2010, doi: 10.1007/978-3-642-12538-6_6.
- [23] M. Banerjee, “Cook's distance in linear longitudinal models,” *Communications in Statistics-Theory and Methods*, vol. 27, pp. 2973-2983, 1998, doi: 10.1080/03610929808832267.
- [24] J. Carmona, I. Lopez, J. Mateo, L. Jimenez and E. Aldana, “A distance-based method for outlier detection on high dimensional datasets,” *IEEE Latin America Transactions*, vol. 18, pp. 589–597, 2020, doi:10.1109/tla.2020.9082731.
- [25] E. -S. M. El-Kenawy *et al.*, “Advanced Ensemble Model for Solar Radiation Forecasting Using Sine Cosine Algorithm and Newton's Laws,” in *IEEE Access*, vol. 9, pp. 115750-115765, 2021, doi: 10.1109/ACCESS.2021.3106233.

COPYRIGHTS

©2024 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>



Vol. 13/ No. 52/Summer 2024

Research Article

Localization of Accessory Pathway in Patients with Wolff-Parkinson-White Syndrome Using Cross-Recurrence Plot of Precordial Leads

Sakineh Yahyazadeh Saravi, Ph.D candidate¹  | Nader Jafarnia Dabanloo, Assistant Professor^{2*}  | Ali Motie Nasrabadi, Professor³  | Alireza Ghorbani Sharif, MD, Cardiologist and Interventional Electrophysiologist⁴ 

¹Department of Biomedical Engineering, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran, yahyazadehs@yahoo.com

²Department of Biomedical Engineering, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran, jafarnia@srbiau.ac.ir

³Department of Biomedical Engineering, Shahed University, Tehran, Iran, nasrabadi@shahed.ac.ir

⁴The Arrhythmia Clinic Dr. Ghorbani Sharif, Tehran, Iran, ghorbanisharif@iranep.net

Correspondence

Nader Jafarnia Dabanloo, Assistant Professor, Department of Biomedical Engineering, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran, jafarnia@srbiau.ac.ir

Received: 17 April 2023

Revised: 11 August 2023

Accepted: 27 December 2023

Abstract

The non-invasive localization of accessory pathway (AP) in patients with Wolff-Parkinson-White (WPW) syndrome is typically performed upon physicians' diagnoses based on observing their electrocardiogram (ECG) signals, which are not always the same. Therefore, a high-accuracy automatic method can help minimize this gap regarding AP localization. This study was to develop a novel semi-automatic localization of AP in patients with WPW syndrome, using features selected from the cross-recurrence plot (CRP) of consecutive precordial leads on ECG. The study participants comprised of 31 patients with WPW syndrome (aged 8-69, with the mean age of 31.19 ± 14.69 , 32.3% female), receiving successful ablation therapy during the first session. The features extracted from the CRP, including laminarity (LAM), trapping time (TT), determinism (DET), and mean length of diagonal line (L) were then analyzed. The feature reduction, The classification and the cross-validation (CV) methods were sequential forward selection (SFS), the k-nearest neighbors (KNN) and the leave-one-out (LOO) respectively. The proposed method could differentiate the right and left APs in the patients with WPW syndrome with the accuracy value of 87% (sensitivity: 93.33%, specificity: 81.25%). These results were achieved by the LAM and L features from the CRP of (V1, V2) and (V3, V4), respectively.

Keywords: Wolff-Parkinson-White syndrome, Localization, Accessory pathway, Cross-recurrence plot.

Highlights

- The localization of APs with a semi-automatic approach using ECG signal was achieved non-invasively.
- The feature LAM yielded from the CRP of leads V1 and V2 was effective in the localization of APs.
- The feature L yielded from the CRP of leads V3 and V4 was effective in the localization of APs.

Citation: S. Yahyazadeh Saravi, N. Jafarnia Dabanloo, A. Motie Nasrabadi, and A. Ghorbani Sharif, "Localization of Accessory Pathway in Patients with Wolff-Parkinson-White Syndrome Using Cross-Recurrence Plot of Precordial Leads," *Journal of Southern Communication Engineering*, vol. 13, no. 52, pp. 45–64, 2024, doi: 10.30495/jce.2023.1983943.1199, [in Persian].

مقاله پژوهشی

بهره‌گیری از نقشه‌ی بازگشتی متقاطع لیدهای سینه‌ای، برای تشخیص محل مسیره‌های فرعی در بیماران دارای نشانگان ولف-پارکینسون-وایت

سکینه یحیی‌زاده ساروی^۱ | نادر جعفرنیا دابانلو^۲ | علی مطیع نصرآبادی^۳ | علیرضا قربانی شریف^۴

چکیده:

تعیین محل غیرتهاجمی راه فرعی (AP) در بیماران با سندروم ولف-پارکینسون-وایت (WPW) اغلب با تشخیص پزشک از طریق مشاهده سیگنال الکتروکاردیوگرام (ECG) انجام می‌شود و گاهی تشخیص پزشکان در این خصوص با هم متفاوت است. بنابراین یک روش خودکار با صحت بالا می‌تواند این تفاوت را کاهش دهد. هدف این مطالعه، تعیین محل نیمه‌خودکار AP در بیماران WPW با استفاده از ویژگی‌های استخراج شده از نقشه‌ی بازگشتی متقاطع (CRP) لیدهای سینه‌ای متوالی ECG است. شرکت‌کنندگان شامل ۳۱ بیمار WPW آشکار (۶۹-۸ سال، با میانگین سنی 31.2 ± 14.7 سال، $32/3\%$ خانم) هستند که در اولین جلسه، از طریق ابلیشن درمان شدند. ویژگی‌های استخراج شده از CRP لیدهای سینه‌ای متوالی، شامل لامیناریتی (LAM)، تریپ‌تایم (TT)، دترمینیسم (DET) و میانگین طول خطوط قطری (L) محاسبه شدند. برای کاهش ویژگی، روش جستجوی مستقیم ترتیبی (SFS)، برای طبقه‌بندی روش K-نزدیک‌ترین همسایه (KNN) و برای اعتبارسنجی متقابل (CV) روش LOO استفاده شد. روش ارائه شده توانست AP‌های راست و چپ را در بیماران WPW با صحت 87% (حساسیت: $93/33\%$ ، اختصاصیت: $81/25\%$) تمایز دهد. این نتیجه با استفاده از ویژگی‌های LAM و L استخراج شده به ترتیب از CRP لیدهای V1 و V2 و CRP لیدهای V3 و V4 به دست آمد.

کلید واژه‌ها: تعیین محل، راه فرعی، سندروم ولف-پارکینسون-وایت، نقشه‌ی بازگشتی متقاطع

^۱ گروه مهندسی پزشکی، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران، yahyazadehs@yahoo.com

^۲ گروه مهندسی پزشکی، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران، jafarnia@srbiu.ac.ir

^۳ گروه مهندسی پزشکی، دانشگاه شاهد، تهران، ایران، nasrabadi@shahed.ac.ir

^۴ کلینیک آریتمی دکتر قربانی شریف، تهران، ایران، ghorbanisharif@iranep.net

نویسنده مسئول

*نادر جعفرنیا دابانلو، دانشیار، گروه مهندسی پزشکی، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران، jafarnia@srbiu.ac.ir

تاریخ دریافت: ۲۸ فروردین ۱۴۰۲

تاریخ بازنگری: ۲۰ مرداد ۱۴۰۲

تاریخ پذیرش: ۶ دی ۱۴۰۲

<https://doi.org/10.30495/jce.2023.1983943.1199>

۱- مقدمه

سندروم WPW^۱، بیماری است که در آن بیمار علاوه بر شبکه‌ی هدایت اصلی قلب دارای یک یا چند مسیر هدایت الکتریکی اضافه (راه فرعی)^۲ بین دهلیز و بطن است. در شبکه‌ی هدایت اصلی قلب در فرد سالم، گره دهلیزی بطنی تنها راه انتقال ایمپالس‌های الکتریکی از دهلیز به بطن است. این گره دارای این خاصیت است که در انتقال این ایمپالس‌ها به بطن تأخیر ایجاد می‌کند. ولی در بیماری WPW راه فرعی با سرعت و بدون تأخیر ایمپالس‌های الکتریکی را از دهلیز به بطن منتقل می‌کند. که این موضوع باعث تغییراتی در شکل موج ECG^۳ می‌شود (بخش ضمائم، شکل ۱) [۱]. یکی از روش‌های درمان این بیماری،

^۱ Wolff-Parkinson-White syndrome

^۲ Accessory pathway

^۳ Electrocardiogram

سوزاندن^۱ یا فریزکردن^۲ نقطه‌ای از راه فرعی است که در سطح مقطع دهلیز و بطن قرار دارد. به این طریق جلوی هدایت از دهلیز به بطن گرفته می‌شود. در روش‌های مذکور کاتترها وارد خود قلب می‌شوند و با استفاده از سیگنال‌های درون قلبی تعیین محل^۳ راه فرعی به‌طور دقیق انجام می‌شود [۳، ۲]. در حین این عمل بیمار و پزشک تحت اشعه x فلوروسکوپی قرار می‌گیرند. تعیین محل راه فرعی قلب در بیماران WPW از روی ECG سطحی، می‌تواند نقطه شروع این عمل را به‌طور غیرتهاجمی تشخیص دهد و به درمان موفق کمک کند و همچنین با افزایش سرعت مکان‌یابی راه فرعی مضرات روش تهاجمی را برای بیمار و پزشک کاهش دهد [۴، ۵]. اکثر روش‌های مورد استفاده در مقالات، مبتنی بر الگوریتم‌هایی هستند که ویژگی‌هایشان به‌طور بصری و غیرخودکار استخراج می‌شود و بنابراین نظر متخصصین در به‌کارگیری این روش‌ها ممکن است تفاوت داشته باشد [۱، ۶-۱۲]. یکی از روش‌های بصری رایج در کلینیک برای تعیین محل راه فرعی آشکار در بیماران WPW، نحوه گذار^۴ موج QRS در لیدهای سینه‌ای است [۸، ۱۳]. لذا استخراج ویژگی‌هایی که بتواند به‌طور خودکار این نحوه‌ی گذار را کمی‌سازی کند، می‌تواند مفید باشد. به این منظور از روش شناخته شده‌ی نقشه‌ی بازگشتی متقاطع استفاده شد تا دینامیک پنهان بین لیدهای متوالی را کشف کند. این روش برای تحلیل وابستگی بین دو سیستم مختلف بکار می‌رود و تعمیمی از تابع کراس کرولیشن^۵ خطی است. روش CRP^۶ یک رویکرد برای روابط متقابل سری‌های زمانی فراهم می‌کند [۱۴]. در این روش، ابتدا سری‌های زمانی با در نظر گرفتن یک تأخیر مناسب (روش‌هایی برای محاسبه‌ی آن وجود دارد)، به فضای فاز^۷ (فضای سرهم‌بندی^۸) برده می‌شوند و بر اساس معیارهایی از جمله تعداد همسایه‌ها در فضای فاز، نقشه‌ی بازگشتی متقاطع بین آن سری‌های زمانی رسم می‌شود. ویژگی‌های شناخته‌شده‌ای این فضای فاز را کمی‌سازی می‌کنند. از جمله ویژگی‌های لامیناریتی^۹، تریپ تایم^{۱۰}، دترمینیسم^{۱۱} و میانگین طول خطوط قطری^{۱۲} [۱۵-۲۰]. این ویژگی‌ها در مقالات برای تشخیص بیماران فیبریلاسیون دهلیزی از افراد سالم و همین‌طور برای تشخیص مکان درایور فیبریلاسیون دهلیزی از روی ECG سطحی استفاده شده است [۲۱، ۲۲]. اما تاکنون این ویژگی‌ها برای تعیین محل راه فرعی استفاده نشده‌اند.

هدف این مطالعه ارزیابی مفید بودن ویژگی‌های لامیناریتی، تریپ تایم، دترمینیسم و میانگین طول خطوط قطری برای تعیین محل غیرتهاجمی و نیمه‌خودکار راه‌های فرعی راست و چپ در بیماران با سندروم WPW آشکار است. فرضیه ما این است که پارامترهای استخراج شده‌ی مذکور از CRP سگمنت‌های هم‌زمان از لیدهای سینه‌ای متوالی می‌تواند برای تعیین محل راه‌های فرعی مفید باشد. این مقاله در پنج بخش ارائه شد. در بخش مواد و روش‌ها (بخش ۲) به معرفی دادگان مورد مطالعه (بخش ۲-۱)، نحوه‌ی جمع‌آوری آن‌ها (بخش ۲-۲)، پیش‌پردازش (بخش ۲-۳) و نحوه‌ی ورودی دادن به الگوریتم (بخش ۲-۴) و شرح الگوریتم استخراج ویژگی (بخش ۲-۵) و شرح الگوریتم انتخاب ویژگی و طبقه‌بندی (بخش ۲-۶) پرداخته شد. پس از آن نتایج حاصل از انتخاب ویژگی و طبقه‌بندی گزارش شد (بخش ۳) و سپس به بحث (بخش ۴) و جمع‌بندی (بخش ۵) نتایج پرداخته شد.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- جمعیت مورد مطالعه

شرکت‌کنندگان شامل ۳۱ بیمار WPW با راه فرعی منفرد رو به جلو با رنج سنی ۶۹-۸ سال، با میانگین سنی $31/2 \pm 14/7$ سال (۳۲/۳٪ خانم) هستند. این افراد در سال‌های ۲۰۱۲ تا ۲۰۱۹ مورد عمل کاتتر ابلیشن یا کرایو ابلیشن در بیمارستان دی (تهران، ایران) قرار گرفته‌اند. از همه‌ی افراد رضایت‌نامه گرفته شده است.

¹ Catheter ablation

² Cryo ablation

³ Localization

⁴ Transition

⁵ Cross correlation

⁶ Cross recurrence plot

⁷ Phase space

⁸ Embedding space

⁹ Laminarity

¹⁰ Trapping time

¹¹ Determinism

¹² Average diagonal line length

بیماران با چند راه فرعی، بیماران با راه‌های فرعی آتریوفسیکولار^۱، اپیکاردیال^۲ و بیماران با سابقه‌ی ابلیشن قلبی، قبل از شروع مطالعه، کنار گذاشته شدند [۲۳]. دادگان و نتایج توسط یک پزشک فوق تخصص الکتروفیزیولوژی قلب، ارزیابی شدند. مکان راه‌های فرعی در نواحی اطراف دریچه‌ی میترال و سه‌لتی شامل جانبی چپ^۳، خلفی چپ^۴، خلفی سپتومی راست^۵، پاراهیسین^۶، خلفی سپتومی چپ^۷، سپتوم میانی^۸، خلفی راست^۹ می‌شدند. راه‌های فرعی پاراهیسین و سپتوم میانی جزء راه‌های فرعی سمت راستی در نظر گرفته شدند.

۲-۲- جمع‌آوری دادگان

سیگنال ECG ۱۲ لیدی در حال استراحت شرکت‌کنندگان (بصورت طاق باز)، قبل از ابلیشن (با استفاده از دستگاه بارد^{۱۰}) با فرکانس نمونه‌برداری ۲ کیلوهرتز به مدت ۱۰ ثانیه ثبت و بصورت فایل متنی ذخیره شد.

۲-۳- پیش‌پردازش

آرتیفکت‌های حرکتی سیگنال‌های ECG با استفاده از فیلتر میان‌گذر مرتبه‌ی ۴ با فرکانس قطع ۰/۵ تا ۱۰۰ هرتز حذف شدند. این فیلتر شامل دو فیلتر باتروث^{۱۱} مرتبه‌ی ۲ است. سپس با استفاده از به‌کارگیری فیلترها در جهت‌های مستقیم و معکوس سیگنال‌های با فاز صفر ایجاد شدند [۲۴]. انتخاب نوع و مرتبه فیلتر با توجه به مقاله لنیس^{۱۲} و همکاران انجام شد [۲۵]. به این دلیل که در آن مقاله حفظ قطعه‌ی ST در ECG (که قطعه‌ی کوتاهی است) اهمیت داشت و در مقاله ما حفظ موج دلتا که می‌توانست در برخی موارد موج کوتاهی باشد. با توجه به این که فیلترهای استفاده شده دارای فاز صفر هستند، لذا محل پیک‌ها بویژه پیک QRS و دامنه‌ی آن‌ها تغییری نمی‌کند و همچنین توجه شد که با انتخاب این فیلتر امواج کم پهن‌ا و کم دامنه‌ی دلتا بعد از فیلترینگ حفظ شود. در شکل ۱ و ۲ سیگنال مربوط به Lead II بیماری با راه فرعی پاراهیسین (سمت راستی) آورده شده است. همان‌طور که در شکل‌های مذکور مشاهده می‌شود فیلتر نویز را حذف می‌کند ولی اجزاء سیگنال به‌طور کامل حفظ می‌شود. در این شکل‌ها همچنین مشاهده می‌شود که سرعت هدایت راه فرعی در سیکل‌های مختلف قلبی یکسان نیست. در شکل ۲ مشاهده می‌شود هر دو سیکل قلبی در این بیمار دارای موج دلتا هستند. سیکل سمت راستی موج دلتای قوی‌تری دارد که به معنای پیش تحریک بیشتر و در نتیجه رپولاریزاسیون بیشتر در قسمت موج T است (در نتیجه موج T منفی می‌شود) و سیکل قلبی سمت چپ موج دلتای ضعیف‌تر و در نتیجه رپولاریزاسیون کمتری دارد (در نتیجه موج T مثبت باقی می‌ماند). این بیمار دارای یک راه فرعی است ولی میزان هدایت راه فرعی در دو ضریان مختلف او متفاوت است. در چنین بیماری، سیکلی به عنوان ورودی الگوریتم انتخاب می‌شود که موج دلتای قوی‌تری دارد [۱۲].

۲-۴- داده‌های ورودی به الگوریتم

ورودی الگوریتم یک سگمنت یا سه سگمنت مجزای متصل شده به هم و یا ۳ ثانیه از ECG هر بیمار شامل موج دلتا است. هر سگمنت از ابتدای موج P شروع می‌شود و تا انتهای موج T ادامه می‌یابد. این سگمنت‌ها توسط یک فرد آموزش‌دیده (به‌عنوان مثال یک پرستار آموزش‌دیده) که می‌تواند موج دلتا را تعیین کند، انتخاب می‌شود. توجه شود که موج دلتا با PVC^{۱۳} اشتباه نشود [۲۶]. در شکل ۳ و ۴ نمونه‌هایی از سگمنت‌های انتخاب شده برای دو بیمار نشان داده شده است که اولی دارای راه فرعی

¹ Atriofacicular

² Epicardial

³ Left lateral

⁴ Left posterior

⁵ Right posteroseptal

⁶ ParaHisian

⁷ Left posteroseptal

⁸ Midseptal

⁹ Right posterior

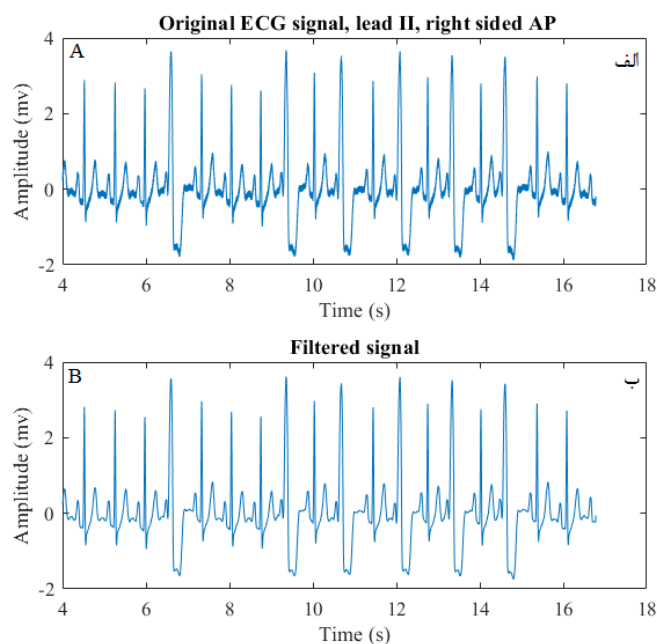
¹⁰ Brad system pro, Bard Electrophysiology, Boston, USA

¹¹ Butterworth

¹² Lenis

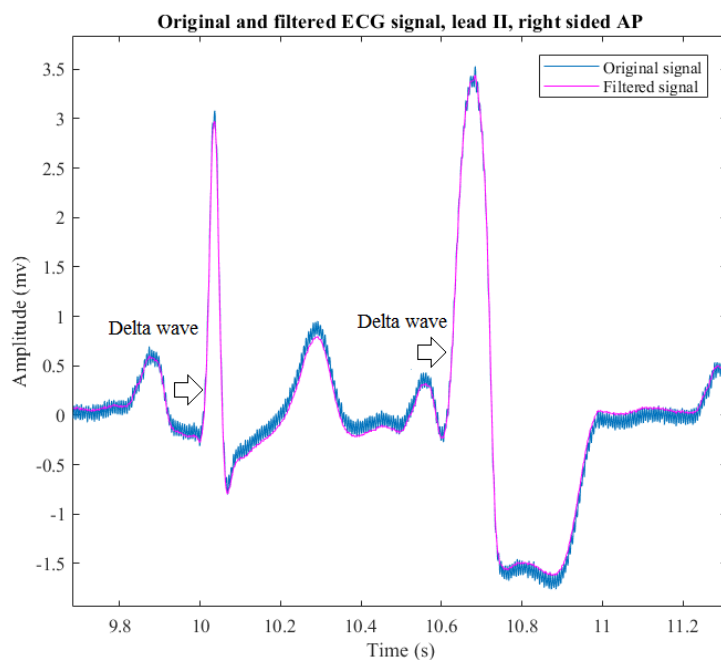
¹³ Premature ventricular contraction

سمت راستی (خلفی سپتومی راست) و دومی دارای راه فرعی سمت چپی (جانبی چپ) است. در شکل‌ها مشاهده می‌شود که پترن ECG در همه‌ی سیکل‌های قلبی یک شکل است. همچنین حضور موج دلتا و عدم حضور موج Q در شکل ۱ مشخص است.



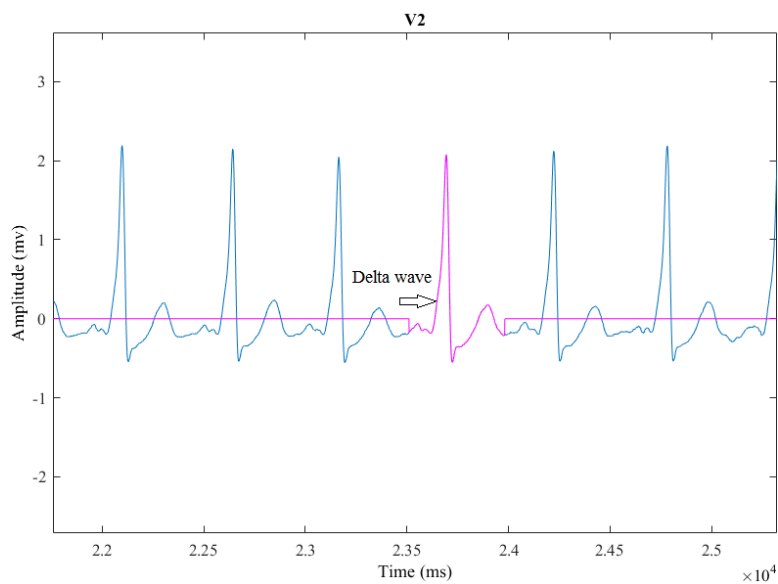
شکل ۱: سیگنال ECG یک شرکت‌کننده با راه فرعی در ناحیه‌ی پاراهیسین (راه فرعی سمت راستی). (الف)، سیگنال ECG اولیه و (ب) سیگنال ECG فیلتر شده است.

Figure 1. The ECG signal of a participant with the AP in the paraHisian region (right-sided AP): (A) Original ECG signal and (B) Filtered ECG signal.

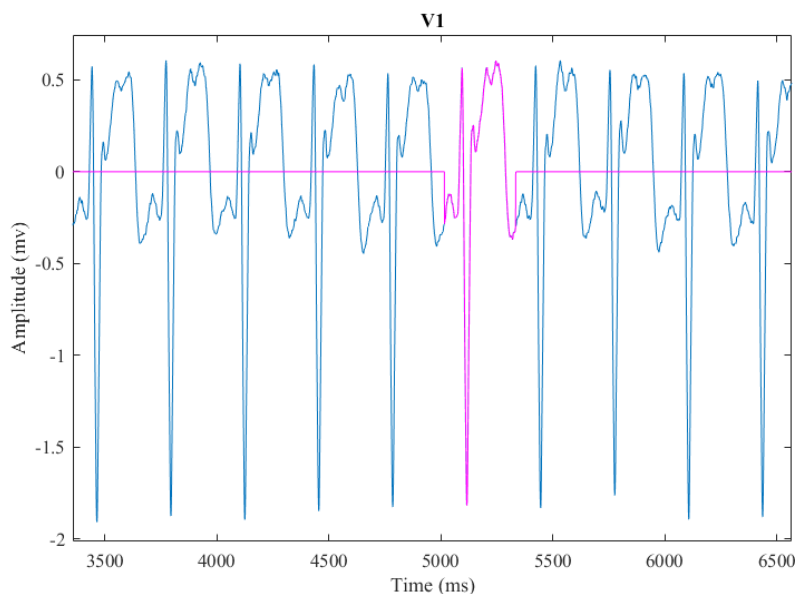


شکل ۲: سیگنال ECG اولیه (آبی رنگ) و سیگنال فیلتر شده‌ی آن (صورتی رنگ).

Figure 2. Original ECG signal (blue) and filtered ECG signal (pink).



شکل ۳: سیگنال V2 از شرکت‌کننده با راه فرعی خلفی سیتومی راست. رنگ صورتی سگمنت انتخاب شده برای استخراج ویژگی را نشان می‌دهد.
Figure 3. The signal of lead V2 from a participant with right posteroseptal AP. The selected segment for the feature extraction was denoted in pink.



شکل ۴: رنگ آبی سیگنال V1 از شرکت‌کننده با راه فرعی جانبی چپ و رنگ صورتی سگمنت انتخاب شده برای استخراج ویژگی را نشان می‌دهد.
Figure 4. The signal of lead V1 for a participant with left lateral AP was shown in blue and the selected segment for the feature extraction was shown in pink.

تمام سیگنال‌های استفاده شده دارای نسبت سیگنال به نویز^۱ (SNR) بالای ۱۰ هستند و سیگنال‌های با SNR کمتر در مطالعه وارد نشدند. SNR با رابطه‌ی ۱ به دست می‌آید [۲۸، ۲۷، ۵۰].

$$SNR = 10 \log_{10} \left(\frac{\sum_{n=0}^{N-1} \hat{x}^2[n]}{\sum_{n=0}^{N-1} (x[n] - \hat{x}[n])^2} \right) \quad (1)$$

¹ Signal to noise ratio

۵-۲- استخراج ویژگی

در این مطالعه استخراج ویژگی از روی CRP لیدهای سینه‌ای متوالی انجام شد. روش CRP اختلافات محلی سیر تکاملی دینامیکی دو ترژکتوری^۱ نزدیک به هم را آشکار می‌کند [۱۵]. در این مطالعه برای سری زمانی یک سگمنت از ECG هر فرد (که u_i نامیده می‌شود)، بردارهای فضای فاز x_i با استفاده از تأخیر تیکن^۲ بازسازی شد (رابطه‌ی ۲ و ۳).

$$\bar{x}(t) = \bar{x}_i \in R^d \quad (i = 1, \dots, N, t = i\Delta t) \quad (2)$$

که Δt نرخ نمونه‌برداری است و بنابراین u_i با بعد d و تأخیر τ بازسازی می‌شود،

$$\bar{x}_i = (u_i, u_{i+\tau}, \dots, u_{i+(d-1)\tau}) \quad (3)$$

به طریق مشابه $\bar{y}_j$ به طول M تعریف می‌شود [۲۹].

در دو سیستم دینامیکی که هریک توسط ترژکتوری‌های $\bar{x}_i$ و $\bar{y}_j$ و فضای سرهم‌بندی d بعدی نشان داده می‌شوند، CRP توسط رابطه‌ی ۴ بیان می‌شود که در آن، N و M تعداد حالت‌های در نظر گرفته شده‌ی $\bar{x}_i$ و $\bar{y}_j$ ، و i و j گام‌های زمانی در داخل پنجره‌ی زمانی برداشته شده از سیگنال هستند [۳۰]. $\Theta(\cdot)$ تابع هویساید^۳ و ε ، آستانه‌ی فاصله و $\|\cdot\|$ یک نرم^۴ است [۲۹].

$$CRP_{i,j}^{\bar{x},\bar{y}}(\varepsilon) = \Theta(\varepsilon - \|\bar{x}_i - \bar{y}_j\|), i = 1, 2, \dots, N, j = 1, 2, \dots, M \quad (4)$$

مقدار ε بستگی به کاربرد دارد. در این مطالعه ε طوری در نظر گرفته شده که نرخ بازگشت ثابت باشد [۳۲، ۳۱]. همچنین، CRP بین سیگنال مربوط به یک سگمنت زمانی از یک بیمار در لید V_k با سیگنال مربوط به همان سگمنت زمانی در لید V_{k+1} ، برای k با مقادیر ۱، ۲ تا ۵ برای بعد سرهم‌بندی $d=2$ بدست آمد [۳۳-۳۵]. میزان تأخیر τ به عنوان اولین جایی که تابع اتوکواریانس برابر $1/e$ شود (که e عدد اولیر است) در نظر گرفته شد و $\bar{x}$ میانگین نمونه‌های x_i است (رابطه‌ی ۵) [۳۶].

$$ACVT(\tau) = \sum_{i=1}^{N-\tau} [(x_i - \bar{x})(x_{i+\tau} - \bar{x})] \quad (5)$$

نقطه‌ای از ترژکتوری $\bar{y}$ در j که در همسایگی نقطه‌ای از ترژکتوری $\bar{x}$ در i قرار می‌گیرد، در CRP این دو ترژکتوری یک نقطه سیاه در مختصات (i, j) ایجاد می‌کند [۳۷]. ویژگی‌های DET، LAM، TT و L از CRP بدست آمده از زوج لیدهای $(V1, V2)$ ، $(V2, V3)$ ، $(V3, V4)$ ، $(V4, V5)$ و $(V5, V6)$ استخراج می‌شود (روابط ۶ تا ۹).

در این معادلات، فراوانی توزیع خطوط قطری، $P(l)$ و خطوط عمودی $P(v)$ نامیده شده است. ویژگی DET، مقداری از نقاط بازگشت که به شکل خطوط قطری هستند نسبت به کل نقاط بازگشت است (رابطه ۶) [۱۵، ۳۷].

$$DET(\varepsilon) = \frac{\sum_{l=l_{\min}}^N IP(\varepsilon, l)}{\sum_{l=1}^N R_{i,j}(\varepsilon)} \quad (6)$$

در این رابطه، $l_{\min}$ حداقل طول یک خط قطری از پیش تعیین شده، l طول یک خط قطری و v طول یک خط عمودی است. یک خط قطری به طول l به معنی آن است که یک سگمنت ترژکتوری در طول l گام زمانی به سگمنت دیگری از ترژکتوری در زمان متفاوتی نسبتاً نزدیک باشد. بنابراین، این خطوط مربوط به واگرایی قطعات ترژکتوری هستند. میانگین طول خطوط قطری (L) از رابطه‌ی ۷ بدست می‌آید [۳۷].

$$L(\varepsilon) = \frac{\sum_{l=l_{\min}}^N IP(\varepsilon, l)}{\sum_{l=l_{\min}}^N P(\varepsilon, l)} \quad (7)$$

ویژگی L میانگین زمانی هست که دو سگمنت ترژکتوری به هم نزدیک باشند و می‌تواند به عنوان میانگین زمان پیش‌بینی تفسیر شود [۳۷].

¹ Trajectory

² Taken

³ Heaviside

⁴ Norm

$$TT(\varepsilon) = \frac{\sum_{v=v_{\min}}^N vP(\varepsilon, v)}{\sum_{v=v_{\min}}^N P(\varepsilon, v)} \quad (۸)$$

ویژگی TT میانگین طول ساختارهای عمودی است. معیار TT حاوی اطلاعاتی درباره‌ی میزان و طول فازهای لامینار است (رابطه ۸). در این رابطه $v_{\min}$ حداقل طول یک خط عمودی از پیش تعیین شده است [۳۸].

$$LAM(\varepsilon) = \frac{\sum_{v=v_{\min}}^N vP(\varepsilon, v)}{\sum_{v=1}^N vP(\varepsilon, v)} \quad (۹)$$

ویژگی LAM، نسبت نقاط بازگشتی که ساختارهای عمودی می‌سازند به همه نقاط بازگشت را نشان می‌دهد (رابطه ۹). این کمیت همچنین احتمال رخداد حالت‌های لامینار در سیستم را نشان می‌دهد. ولی طول فازهای لامینار را توصیف نمی‌کند [۳۸].

بردار ویژگی، شامل ویژگی‌های معرفی شده در روابط ۶ تا ۹ برای CRP لیدهای سینه‌ای متوالی شامل عناصر $P_1, P_2, \dots, P_{20}$ تعریف شد. نحوه‌ی نام‌گذاری ویژگی‌ها در جدول ۱ آورده شده است. برای مثال P_{10} ، ویژگی تریپ‌تایم بدست آمده از CRP (V_3, V_4) است.

جدول ۱: نحوه‌ی نام‌گذاری ویژگی‌های بدست آمده از CRP لیدهای سینه‌ای.

Table 1. Naming features extracted from CRPs of precordial leads).

	CRP(V1,V2)	CRP(V2,V3)	CRP(V3,V4)	CRP(V4,V5)	CRP(V5,V6)
LAM	P_1	P_5	P_9	P_{13}	P_{17}
TT	P_2	P_6	P_{10}	P_{14}	P_{18}
DET	P_3	P_7	P_{11}	P_{15}	P_{19}
L	P_4	P_8	P_{12}	P_{16}	P_{20}

۲-۶- انتخاب ویژگی و طبقه‌بندی

انتخاب ویژگی و طبقه‌بندی با استفاده از ترکیب روش‌های SFS^۱ و LOO^۲ انجام شد که LO-SFS نامیده شد. روش SFS برای کاهش حجم محاسبات و بهبود صحت طبقه‌بندی بکار رفت. در الگوریتم SFS، روش طبقه‌بندی KNN^۳ [۵۱] و روش اعتبارسنجی متقابل^۴ LOO بکار رفت. از روش LOO به دلیل کم بودن نسبی تعداد نمونه‌ها استفاده شد. در این مطالعه روش LOO در دو مرحله (دو بار) بکار رفت. روش LOO در حلقه‌ی بیرونی (LOO بیرونی) و LOO در حلقه‌ی داخلی (LOO داخلی). در LOO در حلقه‌ی بیرونی در هر گام، داده‌ی یک فرد کنار گذاشته شد. انتخاب ویژگی با استفاده از روش SFS برای سایر افراد انجام شد. بنابراین در هر گام در LOO بیرونی، یک «بردار از ویژگی‌های انتخاب شده»، به ازای فرد کنار گذاشته شده تعیین شد. بخش LOO داخلی برای تعیین مجموعه دادگان تست و آموزش برای طبقه‌بند مورد استفاده در الگوریتم SFS استفاده شد. سپس یک هیستوگرام رسم شد که تعداد حضور یک ویژگی (در تمام بردارهای ویژگی انتخاب شده) را بر حسب شماره ویژگی نشان می‌داد. با کمک این هیستوگرام ویژگی‌های پرتکرار تعیین شدند. این ویژگی‌ها بیشترین قدرت تعمیم‌دهی را نسبت به سایر ویژگی‌های مورد مطالعه برای دادگان تست آینده دارند [۵].

شایان توجه است که استفاده در یک مرحله از روش LOO برای انتخاب ویژگی‌های مناسب کافی نخواهد بود. به این دلیل که در روش SFS بکار رفته انتخاب ویژگی براساس صحت طبقه‌بندی دادگان تست انجام شده است. در نتیجه دادگان تست دیده می‌شوند و در آن صورت ویژگی‌های انتخاب شده منحصرأ بر روی مجموعه دادگان ما کاربردی هستند و نمی‌توانند به مطالعات

¹ Sequential forward selection

² Leave-one-out

³ K-nearest neighbour

⁴ Cross validation

دیگر تعمیم پیدا کنند که اتفاق مطلوبی نیست. برای حل این مساله از روش LOO در دو مرحله برای تعمیم‌دهی الگوریتم‌ها استفاده شده است [۵].

در طبقه‌بندی‌های مذکور، مقادیر صحت، حساسیت و اختصاصیت با توجه به روابط ۱۰ تا ۱۲ محاسبه شد [۳۹] که در آن مثبت صحیح (TP): فرد به درستی دارای راه فرعی سمت چپی تشخیص داده شده است. مثبت کاذب (FP): فرد به اشتباه دارای راه فرعی سمت چپی تشخیص داده شده است. منفی صحیح (TN): فرد به درستی دارای راه فرعی سمت راستی تشخیص داده شده است. منفی کاذب (FN): فرد به اشتباه دارای راه فرعی سمت راستی تشخیص داده شده است.

$$Accuracy(\%) = \frac{TP + TN}{TP + TN + FP + FN} \times 100 \quad (10)$$

$$Sensitivity(\%) = \frac{TP}{TP + FN} \times 100 \quad (11)$$

$$Specificity(\%) = \frac{TN}{TN + FP} \times 100 \quad (12)$$

۳- نتیجه‌گیری

انتخاب ویژگی با روش شرح داده شده در بخش ۲-۶ برای سه حالت استخراج ویژگی، یعنی تک سگمنت، سه سگمنت مجزای متصل به هم و ۳ ثانیه سیگنال پیوسته‌ی ECG انجام شد و نتایج در ادامه آورده شده است.

۳-۱- استخراج ویژگی از یک سگمنت ECG

نتیجه استخراج ویژگی از یک سگمنت ECG در شکل ۵ نشان داده شده است. با توجه به این شکل، ویژگی‌های ۱ و ۱۲ پرتکرارترین ویژگی‌ها برای طبقه‌بندی راه‌های فرعی راست و چپ هستند. این ویژگی‌ها هم به صورت منفرد و هم به صورت هم‌زمان باهم به طبقه‌بند داده شدند و نتایج در جدول ۲ آورده شده است.

جدول ۲: نتیجه‌ی طبقه‌بندی با استفاده از ویژگی‌های پرتکرار بدست آمده از هیستوگرام شکل ۱.

Table 2. The result of classification using the most frequent features obtained from the histogram of Figure 1.			
KNN			
ویژگی ۱	ویژگی ۱۲	ویژگی ۱ و ۱۲	
۵۱/۶۱٪	۷۷/۴۲٪	۸۷٪	صحت طبقه‌بندی با ۱، ۳، ۵ k

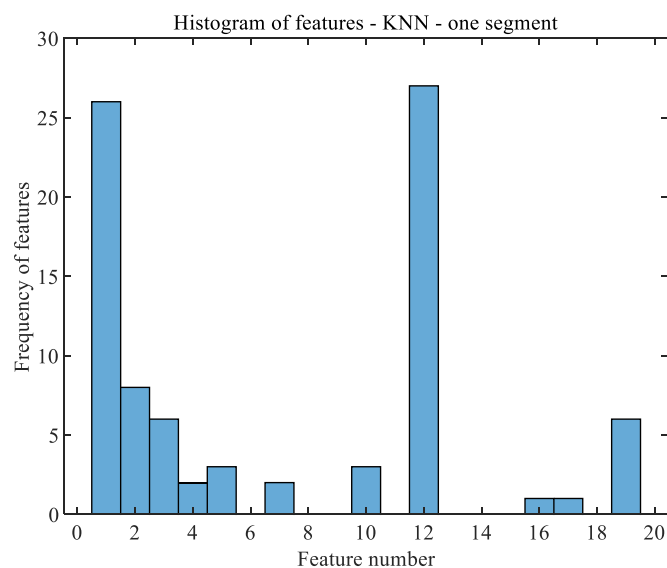
با توجه به جدول ۲، ویژگی ۱، لامیناریتی بدست آمده از CRP لیدهای V1 و V2 و ویژگی ۱۲، میانگین طول خطوط قطری بدست آمده از CRP لیدهای V3 و V4 است. جدول ۲ نشان می‌دهد که با استفاده هم‌زمان از این دو ویژگی در طبقه‌بندی‌کننده، صحت^۱ طبقه‌بندی ۸۷٪ بدست می‌آید (حساسیت^۲: ۹۳/۳۳٪ و اختصاصیت^۳: ۸۱/۲۵٪).

شکل ۶ و ۷ سیگنال و CRP یک بیمار با راه فرعی به ترتیب سمت راستی (خلفی سپتومی راست) و سمت چپی (جانبی چپ) را نشان می‌دهد. در شکل ۶-الف مشاهده می‌شود در گذار از V1 به V2 موج دلتا تغییر علامت داشته است. همچنین در CRP آن فازهای لامینار کمتری (شکل ۶-ب) نسبت به حالت گذار از V1 به V2 در شکل ۷-ب وجود دارد که در آن موج دلتا تغییر علامت نداشته است. در گذار از V3 به V4 در شکل ۶-ج شکل موج تغییر خاصی نداشته و بنابراین در CRP آن ساختار قطری طولانی ایجاد شده است (شکل ۶-د) و در شکل ۷-د تفاوت در دامنه شکل موج باعث شده ساختارهای قطری کوتاه‌تری ایجاد شود.

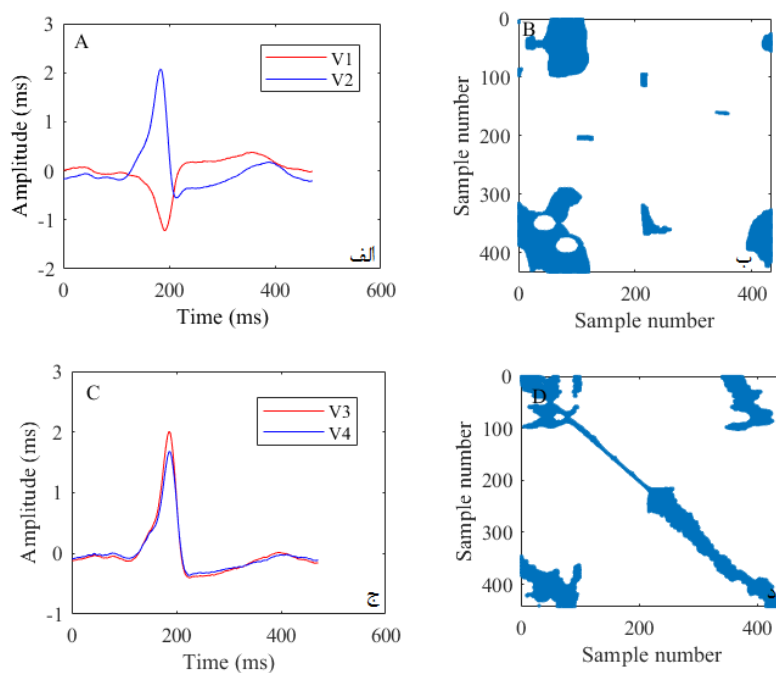
¹ Accuracy

² Sensitivity

³ Specificity

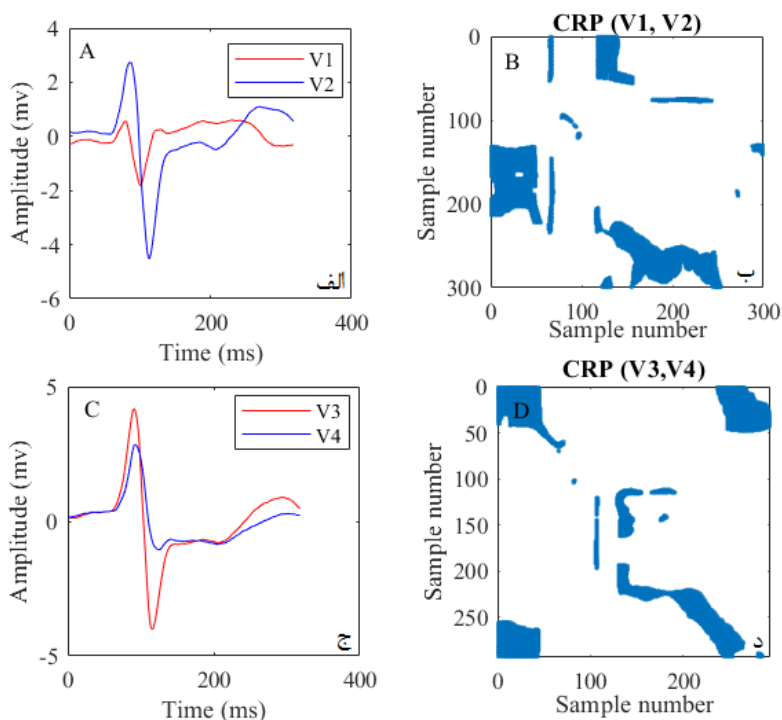


شکل ۵: هیستوگرام فراوانی ویژگی بر حسب شماره‌ی ویژگی در شرایطی که استخراج ویژگی از یک سگمنت از سیگنال انجام شده باشد.
Figure 5. The histogram of the frequency of features versus feature number extracted from one segment of the ECG signal.



شکل ۶: (الف) سیگنال مربوط به یک سگمنت زمانی از لیدهای V1 و V2 از یک شرکت‌کننده با راه فرعی سمت راستی (خلفی سیتومی راست) (همان شرکت‌کننده‌ی شکل ۳)، (ب) CRP بین V1 و V2 (ج) سیگنال مربوط به همان سگمنت زمانی از لیدهای V3 و V4، از همان بیمار، (د) CRP بین همان سگمنت‌ها از لیدهای V3 و V4.

Figure 6. (A) The signals of a segment in the time domain from leads V1 and V2 for a participant with right-sided AP (right posteroseptal) (the same participant in Figure 3), (B) CRP between leads V1 and V2, (C) the signal related to the same time domain segment from leads V3 and V4, from the same participant, and (D) CRP between the same segment from leads V3 and V4.

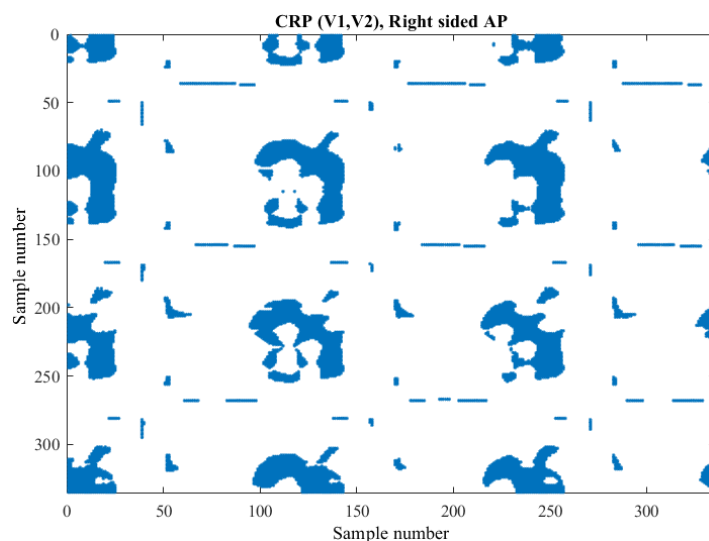


شکل ۷: (الف) سیگنال مربوط به یک سگمنت زمانی از لیدهای V1 و V2 از یک شرکت‌کننده با راه فرعی سمت چپی (چپ جانبی) (همان شرکت‌کننده‌ی شکل ۴)، (ب) CRP بین V1 و V2 (ج) سیگنال مربوط به همان سگمنت زمانی از لیدهای V3 و V4، از همان بیمار، (د) CRP بین همان سگمنت‌ها از لیدهای V3 و V4.

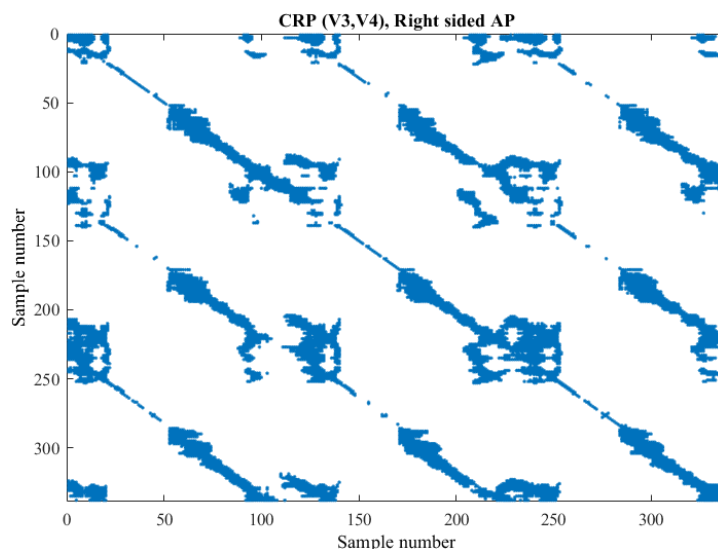
Figure 7. (A) The signals of a segment in the time domain from leads V1 and V2 from a participant with left-sided AP (left lateral) (the same participant in Figure 4), (B) CRP between leads V1 and V2, (C) the signal related to the same time domain segment from leads V3 and V4, from the same participant, and (D) CRP between the same segment from leads V3 and V4.

۳-۲- استخراج ویژگی از سه سگمنت مجزای متصل به هم

در این حالت الگوریتم با استفاده از سه سگمنت مجزا که به هم متصل شدند، پیاده سازی شد (شکل ۸ و ۹). نتایج نشان می‌دهد استفاده از سه سگمنت متصل به هم صحت طبقه‌بندی را قدری کاهش می‌دهد (۸۴٪). نتیجه در جدول ۳ آورده شده است. ویژگی‌های بهینه برای رسیدن به این صحت، ۵ ویژگی پرتکرار اولویت‌دار یعنی ویژگی‌های ۱، ۴، ۵، ۱۲ و ۱۳ بدست آمد (شکل ۱۰).

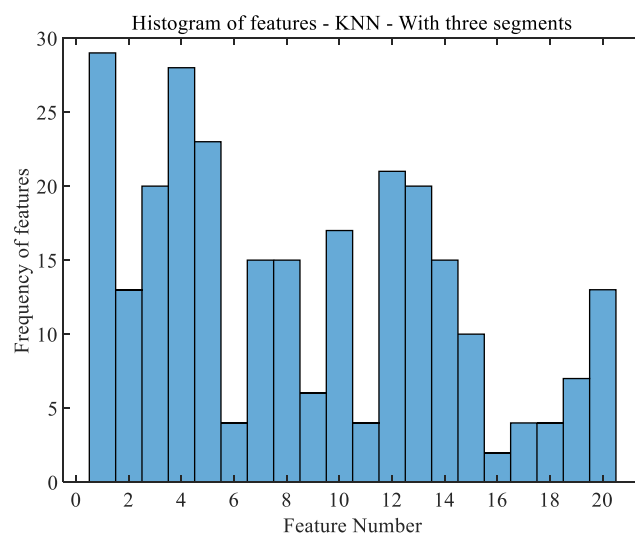


شکل ۸: CRP (V1, V2) در شرکت‌کننده با راه فرعی سمت راستی (خلفی سپتومی راست)
Figure 8. CRP(V1,V2) in a participant with right-sided AP (right posteroseptal).



شکل ۹: CRP (V3,V4) در همان شرکت کننده‌ی شکل ۸.

Figure 9. CRP(V3,V4) from the same participant in Figure 8.



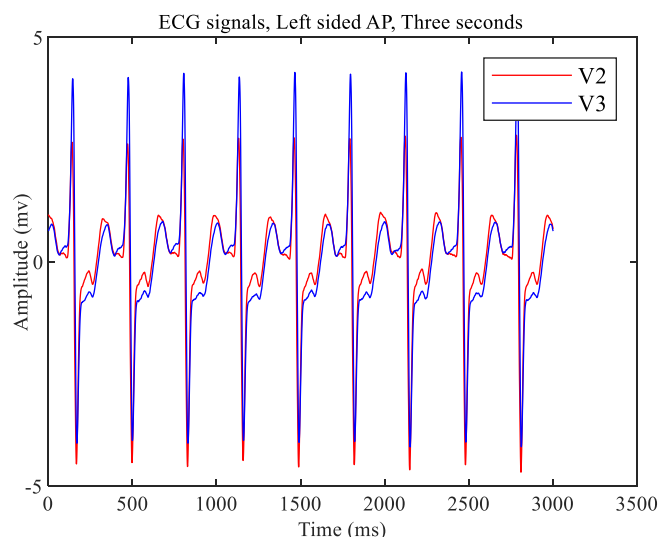
شکل ۱۰: نتیجه‌ی انتخاب ویژگی با استفاده از ویژگی‌های به دست آمده از سه سگمنت مجزای متصل به هم.

Figure 10. The result of feature selection using features extracted from three separate signals placed one after the other.

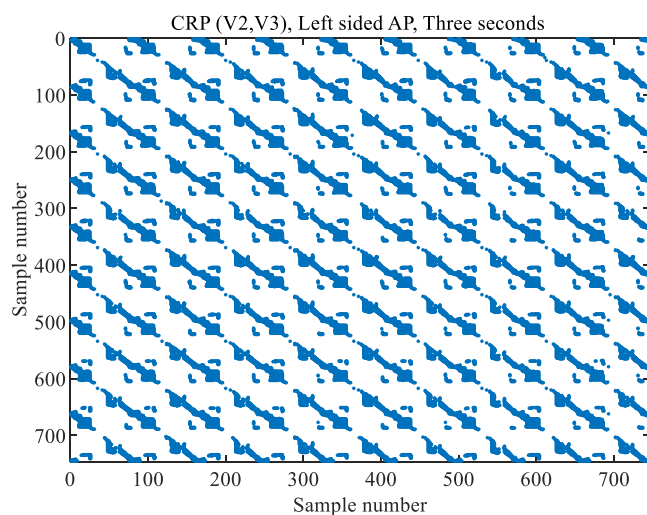
۳-۳- استخراج ویژگی از سه ثانیه از سیگنال ECG

در این حالت الگوریتم با استفاده از سه ثانیه از سیگنال ECG اجرا شد. در دادگان ما با توجه به تفاوت نرخ ضربان قلب^۱، در افراد مختلف بین ۳ تا ۹ سیکل در بازه‌ی زمانی ۳ ثانیه‌ای مشاهده شد. در شکل ۱۱ نمونه‌ای از سیگنال‌های یک شرکت‌کننده با راه فرعی سمت چپی و در شکل ۱۲ نقشه بازگشتی متقاطع آن‌ها آورده شده است.

^۱ Heart rate



شکل ۱۱: نمونه‌ای از ۳ ثانیه از سیگنال ECG در یک شرکت‌کننده با راه فرعی سمت چپی (چپ جانبی).
Figure 11. An example of a three-second ECG signal in a participant with left- sided AP (left lateral).

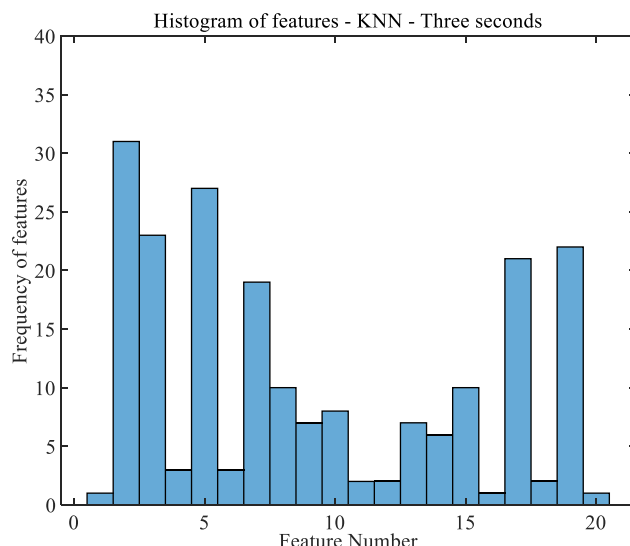


شکل ۱۲: نقشه‌ی بازگشتی متقاطع سیگنال‌های نشان داده شده در شکل ۱۱
Figure 12. The cross-recurrence plot of the signals depicted in Figure 11.

در شرایط استخراج ویژگی از ۳ ثانیه از سیگنال ECG، با ۵ ویژگی اولویت‌دار یعنی بردار ویژگی‌های ۲، ۳، ۵، ۱۷ و ۱۹ به صحت طبقه‌بندی ۶۸٪ رسیدیم.

همچنین نتایج انتخاب ویژگی و طبقه‌بندی با روش آزمون تی استیودنت^۱ در جدول ۳ آورده شده است. میانگین ویژگی‌های ۱، ۲، ۳، ۴، ۵، ۷، ۱۵، ۱۸ و ۱۹ در کلاس راست و چپ با یکدیگر اختلاف معنادار داشته‌اند (مقدار p -کوچکتر از ۰/۰۵ بوده است).

¹ Student's t-test



شکل ۱۳: هیستوگرام فراوانی ویژگی بر حسب شماره‌ی ویژگی، در شرایطی که استخراج ویژگی از ۳ ثانیه از سیگنال انجام شده باشد.

Figure 13. The histogram of the frequency of feature versus feature number extracted from three-second ECG signal.

جدول ۳: نتیجه‌ی طبقه‌بندی با استفاده از روش‌های مختلف کاهش ویژگی.

Table 3. The results of classification with different methods of feature reduction.

روش کاهش ویژگی	تعداد سگمنت	ویژگی‌ها	صحت طبقه‌بندی
بدون کاهش ویژگی	۱	۱، ۲، ۳، ...، ۲۰	۶۱٪
آزمون تی استیودنت	۱	۱، ۲، ۳، ۴، ۵، ۷، ۱۵، ۱۸، ۱۹	۶۶٪
LO_SFS_KNN فاصله‌ی اقلیدسی	۱	۱، ۱۲	۸۷٪
LO_SFS_KNN فاصله‌ی کسینوسی	۱	۱، ۲، ۱۹	۸۴٪
LO_SFS_KNN فاصله‌ی اقلیدسی	۳ سگمنت متصل به هم	۱، ۴، ۵، ۱۲، ۱۳	۸۴٪
LO_SFS_KNN فاصله‌ی اقلیدسی	۳ ثانیه سیگنال ECG	۲، ۳، ۵، ۱۷، ۱۹	۶۸٪

۴- بحث

این مطالعه نشان می‌دهد تعیین محل نیمه‌خودکار AP از روی ECG سطحی برای راه‌های فرعی راست و چپ با ۸۷٪ صحت امکان‌پذیر است. ویژگی لامیناریتی بدست آمده از CRP لیدهای V1 و V2 به همراه ویژگی میانگین طول خطوط قطری بدست آمده از CRP لیدهای V3 و V4 به عنوان ویژگی‌های مورد استفاده در طبقه‌بند KNN می‌توانند با استفاده از یک سیکل ECG باعث تمایز راه‌های فرعی راست و چپ شوند. مقالات مختلف از مجموعه‌های مختلفی از لیدهای ECG برای طبقه‌بندی راه‌های فرعی استفاده کرده‌اند [۱، ۴-۶، ۹-۱۱، ۴۳]. بخصوص در برخی مقالات پلاریته QRS در لید V1 برای تمایز راست و چپ مورد توجه بوده است [۱۱]. ناکانو^۱ و همکاران از مورفولوژی QRS در لید syn-V4R (که ترکیب خطی از لیدهای I، II، V1 تا V6 بوده، با عنوان لید V4 سمت راستی مصنوعی بازسازی شده) برای تمایز راست، سپتوم و چپ استفاده کرده است و به صحت طبقه‌بندی ۹۵٪ رسیده است [۱۱]. البته طبقه‌بندی آن‌ها خودکار نبوده است.

مطالعات قبلی ۲ تا ۱۴ ناحیه را برای تعیین محل راه‌های فرعی انتخاب کرده‌اند [۱-۴، ۷، ۳۳-۳۷]. در این مطالعه تنها دو مکان اصلی راست و چپ تعیین شده است. این تشخیص به نحوه‌ی کاترگذاری اولیه در قلب کمک می‌کند.

تعیین محل خودکار راه فرعی از روی ECG سطحی در مقاله‌ی دیگری نیز بررسی شده است. سنونر^۲ و همکاران از شبکه عصبی برای پیش‌بینی ۱۴ مکان راه فرعی استفاده کردند و به صحت ۷۷٪ رسیدند [۴۵]. از نتایجی که آن‌ها گزارش کردند به این نتیجه رسیدیم که صحت طبقه‌بندی آن‌ها برای راه‌های فرعی راست و چپ بر روی داده‌های آموزش و ارزیابی داخلی‌شان در مکان

¹ Nakano

² Senoner

راه‌های فرعی مشترک با ما، ۸۷٪ بوده است که این نتیجه، با نتیجه‌ی بدست آمده در مطالعه‌ی ما یکسان است. در بیماری WPW، در برخی از بیماران گاهی یک سگمنت شامل موج دلتا است و یک یا چند سگمنت بعدی از همان سیگنال شامل موج دلتا نیستند [۴۶]. در چنین بیمارانی پیدا کردن طول بازه‌ی پیوسته از سیگنال که در آن همه شرکت‌کنندگان سگمنت‌های متوالی شامل موج دلتا داشته باشند ممکن نیست. با توجه به اینکه حضور موج دلتا در هر سیکل نشان دهنده‌ی فعال بودن راه فرعی در آن سیکل است، لذا برای سیگنال‌های پیوسته‌ی ECG شامل چند سیکل، نیاز به دادگان بیشتری برای آموزش طبقه‌بند است؛ چون تنوع‌های بسیاری را شامل می‌شود. همچنین استفاده از سیگنال ECG پیوسته شامل چند سیکل، تفاوت در نرخ ضربان در بیماران مختلف را نیز به الگوریتم اضافه می‌کند، (بعضی از بیماران WPW دارای تاکی کاردی فوق بطنی (SVT) هستند و بعضی از بیماران دارای فیبریلاسیون دهلیزی^۱ (AF) و غیره). به همین علت اضافه شدن اطلاعات فرکانسی (نرخ ضربان قلب) در سیگنال سه ثانیه‌ای صحت طبقه‌بندی را پایین آورده است. چون برای پوشش دادن آن تفاوت‌ها نیاز به دادگان آموزشی خیلی بیشتری بوده است که چنین دادگانی در اختیار نداشتیم.

با مقایسه‌ی صحت‌های به دست آمده در حالت یک سیکل (۸۷٪)، سه سیکل (۸۴٪) و کل ECG ۳ ثانیه‌ای (۶۸٪)، حالت یک سیکل که نیمه‌خودکار است نسبت به حالت کل ECG که کاملاً خودکار است، از نظر صحت و سرعت استخراج ویژگی برتری دارد (در حالت یک سیکل مدت زمان استخراج ویژگی برای هر بیمار حدود ۱ دقیقه و در حالت ۳ ثانیه‌ای، ۲ ساعت و نیم است). بطور خلاصه، روش ما می‌تواند تعیین محل راه‌های فرعی راست و چپ را به‌طور نیمه‌خودکار انجام دهد و این پتانسیل را دارد که صحت و قابلیت تکرارپذیری را نسبت به روش‌های رایج بهبود بخشد.

بالاتر بردن صحت برای تعیین محل راه فرعی دارای چالش‌هایی است. از جمله دلایل آن، تفاوت در مکان آناتومیکی قلب در قفسه‌ی سینه (عمودی یا افقی قرارگرفتن آن)، تفاوت در محل الکتروگذاری، ضخامت پوست و بافت چربی قرار گرفته بین الکترودهای ECG و قلب، تفاوت در سرعت هدایت راه‌های فرعی، تنوع در عرض موج دلتا و تنوع در میزان ترکیب شدن‌های متفاوت سرعت‌های هدایت راه فرعی و گره AV است.

نتیجه به دست آمده در اینجا معادل با بالاترین نتیجه به دست آمده در مقالات برای روش‌های خودکار-نیمه‌خودکار است. این یک الگوریتم نیمه‌خودکار غیرتهاجمی کمک تشخیصی برای حدس اولیه جستجو است و جستجوی دقیق راه فرعی با استفاده از کاتترگذاری درون قلب و مطالعه الکتروفیزیولوژی انجام می‌شود.

در مطالعات آینده قصد داریم تعداد شرکت‌کنندگان مطالعه را افزایش دهیم و تنوع‌های مختلف WPW که در این مطالعه بررسی نشده بودند را وارد مطالعه کنیم. همچنین قصد داریم از تک سیکل‌های جداگانه برای طبقه‌بندی استفاده کنیم و از نتیجه‌ی نهایی رای‌گیری کنیم یا همین روش استخراج ویژگی را برای CRP متقابل لیدهای I، II، III، aVR، aVL و aVF هم انجام دهیم و از نتیجه‌ی طبقه‌بند بهینه به دست آمده و دو طبقه‌بند مورد استفاده در این مقاله (یک سیکل و سه سیکل) نیز رای‌گیری کنیم و نتیجه رای‌گیری را به عنوان صحت نهایی با نتیجه طبقه‌بند تک سیکل مقایسه کنیم. همچنین از ویژگی‌های بدست آمده از داده‌های قلبی دیگر علاوه بر ECG نیز برای افزایش صحت طبقه‌بندی کمک بگیریم. در این مطالعه از ویژگی‌های موفولوژیک برای تعیین محل راه فرعی استفاده نشده است، در حالی که در مقالات این ویژگی‌ها نیز مورد توجه بوده است [۴-۶، ۱۰، ۴۱، ۴۷]. بنابراین در مطالعات آینده قصد داریم با برازش یک مدل ریاضی به یک سگمنت ECG ویژگی‌های موفولوژیکی از سیگنال استخراج کنیم (پارامترهای مدل را به عنوان ویژگی در نظر بگیریم). و با روش انتخاب ویژگی و طبقه‌بندی مطرح شده در این مقاله طبقه‌بند بهینه‌ای با استفاده از آن ویژگی‌ها به دست آوریم و بین نتیجه طبقه‌بند ذکر شده و طبقه‌بندهای این مقاله نیز رای‌گیری کنیم. یا با استفاده‌ی هم‌زمان از ویژگی‌های موفولوژیک و آشوب‌گونه به نتایج طبقه‌بندی بهتری برسیم.

۵- جمع‌بندی

ویژگی لامیناریتی به دست آمده از CRP لیدهای V1 و V2 به همراه ویژگی میانگین طول خطوط قطری به دست آمده از CRP لیدهای V3 و V4 می‌تواند برای تعیین محل نیمه‌خودکار قلب در بیماری با سندروم WPW بکار روند.

¹ Atrial fibrillation

۶- ضمائم

منظور از لیدهای سینه‌ای متوالی هر دو لید مجاور هم از V1 تا V6 در ثبت ECG استاندارد است (شکل ۱۴).

V1: در فضای بین دنده‌ای چهارم در لبه راست استرنوم^۱

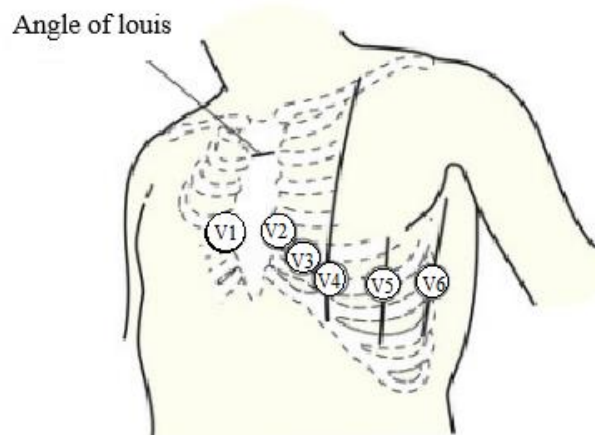
V2: در فضای بین دنده‌ای چهارم در لبه چپ استرنوم

V3: بین V2 و V4

V4: در فضای بین دنده‌ای پنجم در خط مید کلاویکلار چپ^۲

V5: هم سطح V4 در خط اگزیلاری قدامی چپ^۳

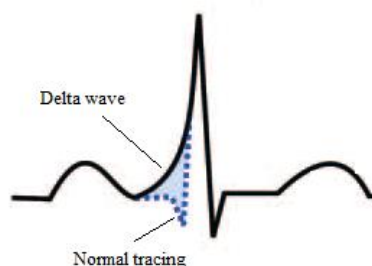
V6: هم سطح V4 در خط مید اگزیلاری چپ^۴ [۴۸]



شکل ۱۴: محل قرارگیری لیدهای سینه‌ای در ثبت ECG استاندارد. لیدهای متوالی V1 تا V6 می‌باشند [۴۸].

Figure 14. The position of precordial leads in standard ECG recording; V1 to V6: Consecutive precordial leads.

اگر جهت راه فرعی از دهلیز به بطن باشد «رو به جلو» نامیده می‌شود. چون راه فرعی مثل گره دهلیزی بطنی در ارسال ایمپالس‌ها تأخیر ایجاد نمی‌کند، لذا از طریق راه فرعی ایمپالس‌ها سریع‌تر از حالت طبیعی به قلب می‌رسند و بخشی از قلب زودتر تحریک می‌شود (پیش تحریک). این مساله باعث ایجاد شکم در ابتدای QRS می‌شود که موج دلتا نامیده می‌شود. در شکل ۱۵ تأثیر راه فرعی بر روی سیگنال ECG طبیعی نشان داده شده است. نقطه‌چین‌های آبی سیگنال طبیعی و خط پر مشکی رنگ سیگنال بیمار WPW است. اگر میزان هدایت راه فرعی زیاد باشد، دپولاریزاسیون بیشتر و در نتیجه رپولاریزاسیون بیشتری خواهیم داشت و در چنین شرایطی موج دلتای پهن و موج T معکوس خواهیم داشت.



شکل ۱۵: تأثیر راه فرعی رو به جلو بر روی سیگنال ECG یک بیمار WPW و مقایسه این سیگنال با سیگنال ECG سالم. سیگنال نقطه‌چین آبی،

سیگنال ECG طبیعی و سیگنال مشکی، سیگنال یک بیمار WPW با یک راه فرعی رو به جلو است [۴۹].

Figure 15. The effect of anterograde AP on the ECG signal of a WPW patient and comparison of the signal with a healthy ECG signal; The blue dotted line signal is a normal ECG signal, and the black signal is the signal of a WPW patient with an anterograde accessory pathway.

¹ Right sternal margin

² Left midclavicular line

³ Left anterior axillary line

⁴ Left midaxillary line

سپاسگزاری

از دانشگاه آزاد واحد علوم و تحقیقات تهران به خاطر حمایت‌هایشان و از آقای دکتر مهرداد دادگستر به خاطر راهنمایی‌های ارزشمندشان کمال قدردانی و تشکر را داریم. همچنین از خانم داوودآبادی و خانم ثقفی در کلینیک آریتمی و آقای هدایتی در بیمارستان دی بخاطر حمایت‌هایشان سپاسگزاریم.

مراجع

- [1] C. M. Teixeira, T. A. Pereira, A. M. Lebreiro and S. A. Carvalho, "Accuracy of the electrocardiogram in localizing the accessory pathway in patients with Wolff-Parkinson-White pattern," *Arq. Bras. Cardiol.*, vol. 107, no. 4, pp. 331–338, 2016, doi: 10.5935/abc.20160132.
- [2] D. J. Fox, G. J. Klein, A. C. Skanes, L. J. Gula, R. Yee and A. D. Krahn, "How to identify the location of an accessory pathway by the 12-lead ECG," *Heart Rhythm*, vol. 5, no. 12, pp. 1763–1766, 2008, doi: 10.1016/j.hrthm.2008.09.012.
- [3] S. C. Sporton, M. J. Earley, A. W. Nathan and R. J. Schilling, "Electroanatomic versus fluoroscopic mapping for catheter ablation procedures: a prospective randomized study," *J. Cardiovasc. Electrophysiol.*, vol. 15, no. 3, pp. 310–315, 2004, doi: 10.1111/j.1540-8167.2004.03356.x.
- [4] P. Iturralde, V. Araya-Gomez, L. Colin, S. Kershenovich, A. de Micheli and J. A. Gonzalez-Hermosillo, "A new ECG algorithm for the localization of accessory pathways using only the polarity of the QRS complex," *J. Electrocardiol.*, vol. 29, no. 4, pp. 289–299, 1996, doi: 10.1016/S0022-0736(96)80093-8.
- [5] S. Yahyazadeh, N. Jafarnia, A. Motie and A. Ghorbani, "Biomedical Signal Processing and Control A novel feature extraction method for the localization of accessory pathways in patients with Wolff-Parkinson-White syndrome," *Biomed. Signal Process. Control*, vol. 88, no. PA, p. 105640, 2024, doi: 10.1016/j.bspc.2023.105640.
- [6] M. S. Arruda *et al.*, "Development and validation of an ECG algorithm for identifying accessory pathway ablation site in Wolff-Parkinson-White syndrome," *J. Cardiovasc. Electrophysiol.*, vol. 9, no. 1, pp. 2–12, 1998, doi: 10.1111/j.1540-8167.1998.tb00861.x.
- [7] R. E. Gregg, S. H. Zhou and A. M. Dubin, "Automated detection of ventricular pre-excitation in pediatric 12-lead ECG," *J. Electrocardiol.*, vol. 49, no. 1, pp. 37–41, 2016, doi: 10.1016/j.jelectrocard.2015.08.006.
- [8] A. P. Fitzpatrick, R. P. Gonzales, M. D. Lesh, G. W. Modin, R. J. Lee and M. M. Scheinman, "New Algorithm for the Localization of Accessory Atrioventricular Connections Using a Baseline Electrocardiogram," *JACC*, vol. 23, no. 1, pp. 107–116, 1994, doi: 10.1016/0735-1097(94)90508-8.
- [9] B. Xie *et al.*, "Localization of accessory pathways from the 12-lead electrocardiogram using a new algorithm," *Am. J. Cardiol.*, vol. 74, no. 2, pp. 161–165, 1994, doi: 10.1016/0002-9149(94)90090-6.
- [10] C.-E. Chiang *et al.*, "An accurate stepwise electrocardiographic algorithm for localization of accessory pathways in patients with Wolff-Parkinson-White syndrome from a comprehensive analysis of delta waves and R/S ratio during sinus rhythm," *Am. J. Cardiol.*, vol. 76, no. 1–2, pp. 40–46, 1995, doi: 10.1016/S0002-9149(99)80798-X.
- [11] M. Nakano *et al.*, "Estimation of the accessory pathway location of the manifest Wolff-Parkinson-White syndrome using synthesized right-sided chest leads," *J. Interv. Card. Electrophysiol.*, vol. 59, no. 1, pp. 43–48, 2020, doi: 10.1007/s10840-019-00648-2.
- [12] T. Pambrun *et al.*, "Maximal Pre-Excitation Based Algorithm for Localization of Manifest Accessory Pathways in Adults," *JACC Clin. Electrophysiol.*, vol. 4, no. 8, pp. 1052–1061, 2018, doi: 10.1016/j.jacep.2018.03.018.
- [13] P. Pascale *et al.*, "The 'double transition': a novel electrocardiogram sign to discriminate posteroseptal

- accessory pathways ablated from the right endocardium from those requiring a left-sided or epicardial coronary venous approach,” *Eur. Soc. Cardiol.*, vol. 0, pp. 1–9, 2020, doi: 10.1093/europace/euaa200.
- [14] A. Meyers, M. Buqammaz and H. Yang, “Cross-recurrence analysis for pattern matching of multidimensional physiological signals,” *Chaos*, vol. 30, no. 12, 2020, doi: 10.1063/5.0030838.
- [15] N. Marwan, M. C. Romano, M. Thiel and J. Kurths, “Recurrence plots for the analysis of complex systems,” *Phys. Rep.*, vol. 438, no. 5–6, pp. 237–329, 2007, doi: 10.1016/j.physrep.2006.11.001.
- [16] N. Marwan, M. Thiel, N. R. Nowaczyk, N. Marwan, M. Thiel and N. R. Nowaczyk, “Cross Recurrence Plot Based Synchronization of Time Series,” *Nonlinear Process. Geophys.*, no. 1040, pp. 101–107, doi: 10.5194/npg-9-325-2002.
- [17] M. Calderón-Juárez, I. B. Cruz-Vega, G. H. González-Gómez and C. Lerma, “Nonlinear Dynamics of Heart Rate Variability after Acutely Induced Myocardial Ischemia by Percutaneous Transluminal Coronary Angioplasty,” *Entropy*, vol. 25, no. 3, 2023, doi: 10.3390/e25030469.
- [18] M. Aceves-fernandez, “Methodology Proposal of ADHD Classification of Children based on Cross Recurrence Plots,” *Nonlinear Dyn.*, vol. 104, pp. 1491-1505, 2021, doi: 10.21203/rs.3.rs-163507/v1.
- [19] A. Khosla, P. Khandnor and T. Chand, “A novel method for EEG based automated eyes state classification using recurrence plots and machine learning approach,” *Concurr. Comput. Pract. Exp.*, vol. 34, no. 13, p. e6912, 2022, doi: 10.1002/cpe.6912.
- [20] S. Chandrasekharan, J. E. Jacob, A. Cherian and T. Iype, “Exploring recurrence quantification analysis and fractal dimension algorithms for diagnosis of encephalopathy,” *Cogn. Neurodyn.*, pp. 1–14, 2023, doi: 10.1007/s11571-023-09929-z.
- [21] G. Luongo *et al.*, “Non-Invasive Identification of Atrial Fibrillation Driver Location Using the 12-lead ECG: Pulmonary Vein Rotors vs. other Locations,” *Proc. Annu. Int. Conf. IEEE Eng. Med. Biol. Soc. EMBS*, 2020, pp. 410–413, doi: 10.1109/EMBC44109.2020.9176135.
- [22] S. Saraswat, G. Srivastava and S. Shukla, “Wavelet transform based feature extraction and classification of atrial fibrillation arrhythmia,” *Biomed. Pharmacol. J.*, vol. 10, no. 4, pp. 1715–1725, 2017, doi: 10.13005/bpj/1284.
- [23] P. Maury, Q. Voglimacci-Stephanopoli, F. Mandel, P. Parlier, M. Beneyto and A. Rollin, “High-density mapping of atrial insertion of right lateral retrograde decremental accessory pathway: 3D illustration of accessory atrioventricular conduction network,” *Hear. Case Reports*, vol. 8, no. 2, pp. 114–118, 2022, doi: 10.1016/j.hrcr.2021.11.010.
- [24] L. Mahidhar and A. Kumari, “Case Teaching of MATLAB Implementation of FIR Filter with an Overview of Filter Analogies,” *Int. J. Res. Eng. Sci. Manag.*, vol. 5, no. 12, pp. 70–75, 2022.
- [25] G. Lenis, N. Pilia, A. Loewe, W. H. W. Schulze and O. Dössel, “Comparison of baseline wander removal techniques considering the preservation of ST changes in the ischemic ECG: a simulation study,” *Comput. Math. Methods Med.*, vol. 2017, Article ID : 9295029, 2017, doi: 10.1155/2017/9295029.
- [26] Y. M. Cha, G. K. Lee, K. W. Klarich and M. Grogan, “Premature ventricular contraction-induced cardiomyopathy: A treatable condition,” *Circ. Arrhythmia Electrophysiol.*, vol. 5, no. 1, pp. 229–236, 2012, doi: 10.1161/CIRCEP.111.963348.
- [27] C. L. Dye, “Atrial tachycardia in Wolff-Parkinson-White syndrome: Conversion to normal sinus rhythm with lidocaine*,” *Am. J. Cardiol.*, vol. 24, no. 2, pp. 265–268, 1969, doi: 10.1016/0002-9149(69)90414-7.
- [28] F. A. Castaño, A. M. Hernández and G. Soto-romero, “Assessment of artifacts reduction and denoising techniques in Electrocardiographic signals using Ensemble Average-based method,” *Comput. Methods Programs Biomed.*, vol. 182, 2019, doi: 10.1016/j.cmpb.2019.105034.

- [29] S. Schinkel, N. Marwan and J. Kurths, "Order patterns recurrence plots in the analysis of ERP data," *Cogn. Neurodyn.*, vol. 1, no. 4, pp. 317–325, 2007, doi: 10.1007/s11571-007-9023-z.
- [30] S. Li and A. Adelmann, "Review of Time Series Forecasting Methods and Their Applications to Particle Accelerators," *Phys. Rev. Accel. Beams*, vol. 26, no. 2, p. 24801, 2022, doi: 10.1103/PhysRevAccelBeams.26.024801.
- [31] B. M. Mathunjwa, Y. Lin, C. Lin, M. F. Abbod and J. Shieh, "ECG arrhythmia classification by using a recurrence plot and convolutional neural network," *Biomed. Signal Process. Control*, vol. 64, p. 102262, 2021, doi: 10.1016/j.bspc.2020.102262.
- [32] E. Tzinis, G. Paraskevopoulos, C. Baziotis and A. Potamianos, "Integrating Recurrence Dynamics for Speech Emotion Recognition," *arXiv*, pp. 1–5, 2018, doi: 10.48550/arXiv.1811.04133.
- [33] S. Parvaneh, M. -R. Hashemi-Golpayegani, M. Firoozabadi and M. Haghjoo, "Predicting the spontaneous termination of atrial fibrillation based on Poincare section in the electrocardiogram phase space," *J. Eng. Med.*, vol. 226, no. 1, pp. 3–20, 2011, doi:10.1177/0954411911425839.
- [34] V. Gupta, "A novel method of cardiac arrhythmia detection in electrocardiogram signal," *nt. J. Medical Engineering and Informatics*, vol. 12, no. 5, pp. 489–499, 2020, doi: 10.1504/IJMEI.2020.109943.
- [35] S. K. Nayak, A. Bit, A. Dey, B. Mohapatra and K. Pal, "A Review on the Nonlinear Dynamical System Analysis of Electrocardiogram Signal," *J. Healthc. Eng.*, vol. 2018, 2018, doi: 10.1155/2018/6920420.
- [36] R. Carvajal, N. Wessel, M. Vallverdú, P. Caminal and A. Voss, "Correlation dimension analysis of heart rate variability in patients with dilated cardiomyopathy," *Comput. Methods Programs Biomed.*, vol. 78, no. 2, pp. 133–140, 2005, doi: 10.1016/j.cmpb.2005.01.004.
- [37] N. Marwan, A. Groth and J. Kurths, "Quantification of order patterns recurrence plots of event related potentials," *Chaos and Complexity Letters*, vol. 2, no. 2, pp. 301–314, 2007.
- [38] N. Marwan and A. Meinke, "Extended recurrence plot analysis and its application to ERP data," *Int. J. Bifurc. Chaos*, vol. 14, no. 02, pp. 761–771, 2004, doi: 10.1142/S0218127404009454.
- [39] A. G. S. Fatemeh Mohammadi, A. Sheikhan and F. Razzazi, "Non-invasive localization of the ectopic foci of focal atrial tachycardia by using ECG signal based sparse decomposition algorithm," *Biomed. Signal Process. Control*, vol. 71, no. Part B, p. 103179, 2022, doi: 10.1016/j.bspc.2021.103014.
- [40] A. d'Avila, J. Brugada, V. Skeberis, E. Andries, E. Sosa and P. Brugada, "A fast and reliable algorithm to localize accessory pathways based on the polarity of the QRS complex on the surface ECG during sinus rhythm," *Pacing Clin. Electrophysiol.*, vol. 18, no. 9, pp. 1615–1627, 1995, doi: 10.1111/j.1540-8159.1995.tb06983.x.
- [41] A. P. Fitzpatrick *et al.*, "New algorithm for the localization of accessory atrioventricular connections using a baseline electrocardiogram," *J. Am. Coll. Cardiol.*, vol. 23, no. 1, pp. 107–116, 1994, doi: 10.1111/j.1540-8159.1995.tb06983.x.
- [42] R. Liu and J. Chen, "Pre-excitation syndrome with a change in terminal QRS vector," *Acta Cardiol.*, vol. 5385, no. May, pp. 219–221, 2017, doi: 10.1080/AC.68.2.2967285.
- [43] L. Boersma, E. GARCÍA-MORAN, L. Mont and J. Brugada, "Accessory pathway localization by QRS polarity in children with Wolff-Parkinson-White syndrome," *J. Cardiovasc. Electrophysiol.*, vol. 13, no. 12, pp. 1222–1226, 2002, doi: 10.1046/j.1540-8167.2002.01222.x.
- [44] J. J. R. Kuncheva and I. Ludmila, "On feature selection protocols for very low-sample-size data," *Pattern recognition*, 2018, doi: 10.1016/j.patcog.2018.03.012.
- [45] T. Senoner *et al.*, "Identifying the location of an accessory pathway in pre-excitation syndromes using an artificial intelligence-based algorithm," *J. Clin. Med.*, vol. 10, no. 19, 2021., doi: 10.3390/jcm10194394.

- [46] F. J. Neumann *et al.*, “2019 ESC Guidelines for the diagnosis and management of chronic coronary syndromes,” *Eur. Heart J.*, vol. 41, no. 3, pp. 407–477, 2020, doi: 10.1093/eurheartj/ehz425.
- [47] N. Taguchi *et al.*, “A simple algorithm for localizing accessory pathways in patients with Wolff-Parkinson-White syndrome using only the R/S ratio,” *J. Arrhythmia*, vol. 30, no. 6, pp. 439–443, 2014, doi: 10.1016/j.joa.2013.10.006.
- [48] D. P. Zipes, P. Libby, R. O. Bonow, D. L. Mann and G. F. Tomaselli, *Braunwald’s Heart disease*, 2018.
- [49] J. A. Drezner, “Standardised criteria for ECG interpretation in athletes : a practical tool,” *Br. J. Sports Med.*, vol. 46, pp. 6–9, 2012, doi: 10.1136/bjsports-2012-091703.
- [50] A. Szfadoust and H. Momenzadeh-Haghighi, “Improved SNR in Location with UWB Using Power Control Algorithms,” *Journal of Southern Communication Engineering*, vol. 9, no. 33, pp. 69-74, 2019 [in persian].
- [51] N. Cheraghi-Shirazi, R. Hamzehyan and A. Masoomi, “The Comparison of Classification Algorithms for Remote Sensing Images,” *Journal of Southern Communication Engineering*, vol. 5, no. 17, pp. 31-38, 2015 [in persian].

COPYRIGHTS

©2024 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>



Vol. 13/ No.52/Summer 2024

Research Article

The Crossed-Dipole Antenna with Torang-shaped Parasitic Elements and Circular Polarization for GPS Application

Amir Siahcheshm, Assistant Professor^{1*} 

¹Assistant Professor, Department of Electrical Engineering, Salmas Branch, Islamic Azad University, Salmas, Iran,
amir.siahcheshm@iau.ac.ir

Correspondence

Amir Siahcheshm, Assistant Professor,
Department of Electrical Engineering, Salmas Branch, Islamic Azad University, Salmas, Iran,
amir.siahcheshm@iau.ac.ir

Received: 26 November 2023

Revised: 22 December 2023

Accepted: 20 January 2024

Abstract

This paper presents a circularly polarized (CP) printed crossed-dipole antenna for Global Positioning System (GPS) receptions in the L1 (1575 MHz) band. Its structure consists of two orthogonally printed dipoles, two integrated baluns to feed the dipoles, and a feed network connected to the baluns. The feeding network comprises a Branch-Line Coupler with two quadrature outputs. Accordingly, providing two orthogonal dipoles with a 90-degree phase difference leads to right-handed circular polarization (RHCP), a must for GPS applications. Four Torang-shaped parasitic elements have been used in the upper part of the dipole arms to improve the circular polarization of the antenna. Based on the practical results obtained with the technique, the antenna's Axial Ratio (AR) bandwidth is increased by about 21%. At the same time, the purity of the circular polarization can also be seen. The experimental results show that the proposed GPS antenna has an impedance bandwidth of 46.28% (from 1.327 to 2.126 GHz), an axial ratio bandwidth of 41.36% (from 1.329 to 2.022 GHz), and a maximum gain of 6.40 dB. The dimensions of the proposed antenna are compact, and this antenna has a stable radiation pattern. In the last step, the proposed GPS antenna is fabricated and tested in the antenna laboratory.

Keywords: Crossed Dipole Antenna, Parasitic Element, Circular Polarization, GPS.

Highlights

- In this research, a new design of orthogonal printed dipole antennas with circular polarization is presented.
- This antenna is useful for use in global positioning system receivers in the 1575 MHz band.
- In this design, four Torang-shaped parasitic elements are used to improve the circular polarization of the antenna.
- According to the practical results obtained with the used technique, the bandwidth of the axial ratio of the antenna has increased by about 21%.
- The purity of circular polarization of antenna has been improved by using Torang-shaped parasitic elements.

Citation: A. Siahcheshm, "The Crossed-Dipole Antenna with Torang-shaped Parasitic Elements and Circular Polarization for GPS Application," *Journal of Southern Communication Engineering*, vol. 13, no. 52, pp. 65–80, 2024, doi: 10.30495/jce.2024.2002047.1239, [in Persian].

آنتن دوقطبی متعامد دارای المان‌های پارازیتیک ترنج شکل با قابلیت قطبش دایروی و کاربرد در سیستم موقعیت‌یاب جهانی

امیر سیاه‌چشم^{*۱} 

چکیده:

این مقاله یک آنتن دوقطبی چاپی متعامد با قطبش دایروی برای گیرنده های سیستم موقعیت‌یاب جهانی (Global Positioning System) در باند L1 (۱۵۷۵ مگاهرتز) را ارائه می‌دهد. ساختار آنتن متشکل از دو عدد دوقطبی چاپی است که بصورت متعامد نسبت به یکدیگر قرار گرفته‌اند و شامل دو بالن یکپارچه برای تغذیه دوقطبی‌ها و یک شبکه تغذیه متصل به بالن‌ها است. در این طراحی، شبکه تغذیه از یک تزویجگر شاخه‌ای (Branch-Line Coupler) با دو خروجی مربعی (Quadrature Outputs) تشکیل یافته است. بر این اساس، تغذیه دو دوقطبی متعامد با اختلاف فاز ۹۰ درجه منجر به قطبش دایروی راست‌گرد می‌شود که برای کاربردهای سیستم موقعیت‌یاب جهانی امری الزامی است. با هدف بهبود قطبش دایروی آنتن، از چهار عدد المان پارازیتیک ترنج شکل در قسمت فوقانی بازوهای دوقطبی استفاده شده است. طبق نتایج عملی به دست آمده با تکنیک بکار گرفته‌شده، پهنای باند نسبت محوری (Axial Ratio) آنتن در حدود ۲۱٪ افزایش یافته و هم‌زمان خلوص قطبش دایروی آنتن نیز بهبود قابل ملاحظه‌ای داشته است. نتایج تجربی تأیید می‌کنند که آنتن پیشنهادی برای سیستم موقعیت‌یاب جهانی دارای پهنای باند امیدانسی ۴۶/۲۸٪ (از ۱/۳۲۷ تا ۲/۱۲۶ گیگاهرتز)، پهنای باند نسبت محوری ۴۱/۳۶٪ (از ۱/۳۲۹ تا ۲/۰۲۲ گیگاهرتز) و حداکثر بهره ۶/۴۰ دسی‌بل است. ابعاد آنتن پیشنهادی کوچک بوده و این آنتن دارای الگوی تشعشعی پایدار است. در گام آخر آنتن پیشنهادی برای سیستم موقعیت‌یاب جهانی در آزمایشگاه آنتن ساخت و تست شده است.

کلیدواژه‌ها: آنتن دوقطبی متعامد، المان پارازیتیک، سیستم موقعیت‌یاب جهانی، قطبش دایروی.

^{*۱} استادیار، گروه مهندسی برق، واحد سلماس، دانشگاه آزاد اسلامی، سلماس، ایران،
amir.siahcheshm@iau.ac.ir

نویسنده مسئول

^{*۱} استادیار، گروه مهندسی برق، واحد سلماس، دانشگاه آزاد اسلامی، سلماس، ایران،
amir.siahcheshm@iau.ac.ir

تاریخ دریافت: ۵ آذر ۱۴۰۲

تاریخ بازنگری: ۱ دی ۱۴۰۲

تاریخ پذیرش: ۳۰ دی ۱۴۰۲

<https://doi.org/10.30495/jce.2024.2002047.1239>

۱-مقدمه

امروزه آنتن‌های دارای قطبش دایروی^۱ طیف وسیعی از کاربردهای ماهواره‌ای را در محدوده فرکانسی باند L دارا می‌باشند [۱-۳]. در سال‌های اخیر، طرح‌های متنوعی از آنتن‌های با قطبش دایروی باند L معرفی و بررسی شده‌اند بطوری که در آنها از تکنیک‌های مختلفی استفاده شده و هر کدام دارای کاربردهای متعددی هستند [۴-۸]. در مرجع [۴]، یک آنتن با قطبش دایروی

¹ Circular Polarization (CP)

دوگانه (دایروی راستگرد و چپگرد) که بر اساس دوقطبی‌های متعامد طراحی شده است، برای کاربردهای ماهواره‌ای باند L (۱/۱-۶ گیگاهرتز) پیشنهاد شده است. در منبع [۵] نیز یک آنتن پچ^۱ آرایه‌ای دارای قطبش دایروی معرفی شده است که در ۱/۲۱-۱/۴۰ گیگاهرتز برای کاربردهای راداری باند L کار می‌کند. در این طرح، آرایه شامل ۱۶ المان پچ مستطیلی است که یک آرایه ۴×۴ را تشکیل می‌دهد. اما طرح دیگری که در مرجع [۶] ارائه شده است شامل یک آنتن با قطبش دایروی است که از طریق خط انتقال با ساختاری ساده دارای چیدمان تشعشی راستگرد/چپگرد برای کاربردهای ماهواره‌ای قابل حمل در باند L (۱/۶۲۹-۱/۶۴۱ گیگاهرتز) استفاده می‌شود. همچنین یک آنتن قطبش دایروی جدید در باند L برای استفاده در کاربردهای راداری با سطح مقطع راداری^۲ پایین در منبع [۷] ارائه شده است که از ساختارهای میکرواستریپ^۳ استفاده کرده و دارای پهنای باند امپدانسی^۴ ۱/۹۷-۲/۰۶ گیگاهرتز است. علاوه بر این، یک آنتن قطبش دایروی با قابلیت تنظیم مجدد فرکانس در مرجع [۸] پیشنهاد شده است به طوری که می‌تواند در سیستم‌های ناوبری و دریافت لینک ماهواره‌ای به ترتیب در باند فرکانسی (۱۵۷۰-۱۶۵۰ مگاهرتز) و (۲۰۵۰-۲۲۲۵ مگاهرتز، ۲۶۳۰-۲۷۳۰ مگاهرتز) با کنترل و تنظیم بایاس جریان مستقیم^۵ دیودها استفاده شود. از آنجایی که سیگنال آنتن در کاربردهای ماهواره‌ای از لایه یونیسفر عبور می‌کند و هم‌زمان به دلیل تأثیر پدیده چرخش فارادی بر امواج رادیویی در قطبش خطی^۶، ویژگی قطبش دایروی آنتن به گزینه‌ای محبوب در سیستم‌های ارتباطی بی‌سیم به ویژه برای لینک‌های رادیویی بین ایستگاه‌های زمینی و ماهواره‌ها تبدیل شده است [۹]. علاوه بر این، آنتن‌های با قطبش دایروی در مقایسه با آنتن‌های دارای قطبش خطی مزایای زیادی دارند، مانند قابلیت غلبه بر مشکل محو شونده‌گی چند مسیری که منجر به افزایش کیفیت لینک رادیویی می‌شود و همچنین تحمل شرایط نامساعد جوی در کاربردهای ماهواره‌ای با استفاده از قطبش دایروی ممکن خواهد بود [۱۰، ۱۱]. تکنیک‌ها و ساختارهای مختلفی برای آنتن‌های قطبش دایروی طراحی و گزارش شده است، از جمله آنتن قطبش دایروی شکافدار مربعی با پچ حلقوی^۷ [۱۲]، آنتن شکافی دارای قطبش دایروی متشکل از دو اسلات بیضی^۸ [۱۳]، آنتن قطبش دایروی آرایه‌ای با شبکه تغذیه دارای تزویج کننده‌های جهت‌دار [۱۴] و آنتن قطبش دایروی با قابلیت تنظیم مجدد پرتو که توسط تغییر حالت شبکه تغذیه انجام می‌گیرد [۱۵]. یک تکنیک متفاوت برای تولید عملیات قطبش دایروی استفاده از دو عدد دوقطبی متعامد با بکارگیری رویکرد تغذیه دوگانه است [۱۶]. عموماً در این روش برای تولید دو سیگنال تغذیه مربعی، از تزویج کننده‌های شاخه‌ای استفاده شده و بدین ترتیب دو سیگنال خروجی دارای فازهای متعامد می‌شوند [۱۷].

در حال حاضر، آنتن‌های دوقطبی قطبش دایروی در سیستم‌های ناوبری بی‌سیم مانند سیستم موقعیت‌یاب جهانی بسیار مورد توجه هستند [۱۸-۲۱]. عملاً سیستم موقعیت‌یاب جهانی یک سامانه ناوبری است که از چندین ماهواره تشکیل شده که در مدار متوسط زمین^۹ قرار دارند و موقعیت جغرافیایی یک کاربر را با سیگنال‌های مایکروویو فراهم می‌کنند [۲۲]. سه باند فرکانسی عملیاتی محبوب برای سیستم موقعیت‌یاب جهانی به نام‌های L1 (۱/۵۷۵ گیگاهرتز)، L2 (۱/۲۲۷ گیگاهرتز) و L5 (۱/۱۷۶ گیگاهرتز) تعریف شده‌اند. در مرجع [۲۳] برای گیرنده‌های سیستم موقعیت‌یاب جهانی باند L1 یک آنتن قطبش دایروی از نوع دوقطبی که شامل دو عدد دوقطبی متعامد، دو بالن یکپارچه و یک تزویج کننده هیبریدی ۹۰ درجه می‌باشد، ارائه شده است. تزویج کننده با استفاده از خروجی‌های مربعی، دوقطبی‌ها را تحریک نموده و عملیات قطبش دایروی را در این طرح پیاده می‌کند. به‌طور مشابه، یک آنتن GPS میکرواستریپ کوچک برای باند فرکانسی L1 در منبع [۲۴] پیشنهاد شده است، با این تفاوت که این آنتن دارای یک تغذیه منفرد بوده و عملکرد قطبش دایروی آن با تنظیم اندازه ساختار زمین ناقص فراکتالی^{۱۰} بدست می‌آید. علاوه بر این، همکاری باندهای مختلف فرکانسی در سیستم موقعیت‌یاب جهانی، باعث بهبود پایداری سرویس ناوبری، افزایش کیفیت موقعیت‌یابی و دقت بالای آن می‌گردد. در مرجع [۲۵] یک آنتن قطبش دایروی از نوع پچ انباشته برای گیرنده‌های

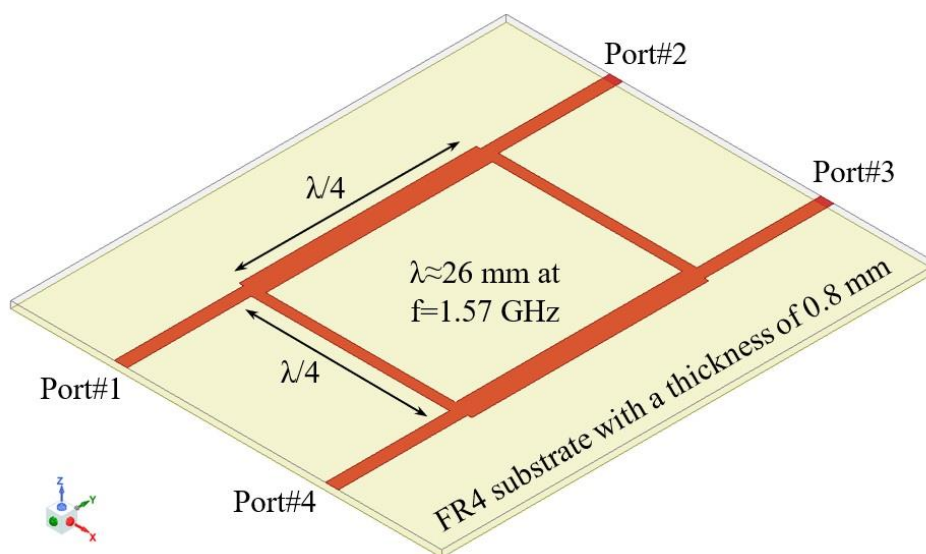
¹ Patch antenna² Radar Cross Section (RCS)³ Microstrip⁴ Impedance Bandwidth (IBW)⁵ Direct Current (DC)⁶ Linear Polarization (LP)⁷ Circular Polarization Square Slot Antenna (CPSSA)⁸ Circular Polarization Elliptical Slot Antenna (CPESA)⁹ Medium Earth Orbit (MEO)¹⁰ Fractal Defected Ground Structure (FDGS)

سیستم موقعیت‌یاب جهانی شامل باندهای فرکانسی L1، L2 و L5 بررسی شده است. این مقاله طراحی جدیدی از یک آنتن دوقطبی متعامد با قطبش دایروی را برای کاربردهای باند L (۹۱۳/۷-۱۵۱۳/۱ مگاهرتز) ارائه می‌کند. همچنین در سال‌های اخیر، مطالعات زیادی در خصوص سیستم‌های موقعیت‌یاب جهانی و طرز عملکرد آن‌ها و نیز بررسی روش‌های مبتنی بر بهینه‌سازی آن‌ها انجام گرفته است [۲۶-۲۸].

آنتن پیشنهادی در این مقاله با بکارگیری دوقطبی‌های متعامد به همراه یک تزویج‌کننده مربعی برای دستیابی به عملکرد قطبش دایروی توسعه یافته است. دوقطبی‌ها توسط دو عدد بالن متصل به یک تزویج‌کننده، تغذیه می‌شوند تا الگوی تشعشعی را پایدار نمایند. همچنین عملکرد قطبش دایروی آنتن با بکارگیری المان‌های پارازیتیک بهبود قابل توجهی در حدود ۳۷۹ مگاهرتز از خود به نمایش می‌گزارد. آنتن با قطبش دایروی پیشنهادی در این تحقیق دارای حداکثر بهره ۴۰/۶ دسی‌بل و ابعاد ۱۱۰×۱۱۳×۴۲/۲۵ میلی‌متر مکعب است. آنتن پیشنهادی را می‌توان در سیستم‌های موقعیت‌یاب جهانی باند L1 (۱۵۷۵ گیگاهرتز) و رادار هواشناسی در باند فرکانسی ۲/۱۲۶-۱/۳۲۷ گیگاهرتز استفاده کرد.

۲- آنتن دوقطبی متعامد با تغذیه تزویج‌گر شاخه‌ای

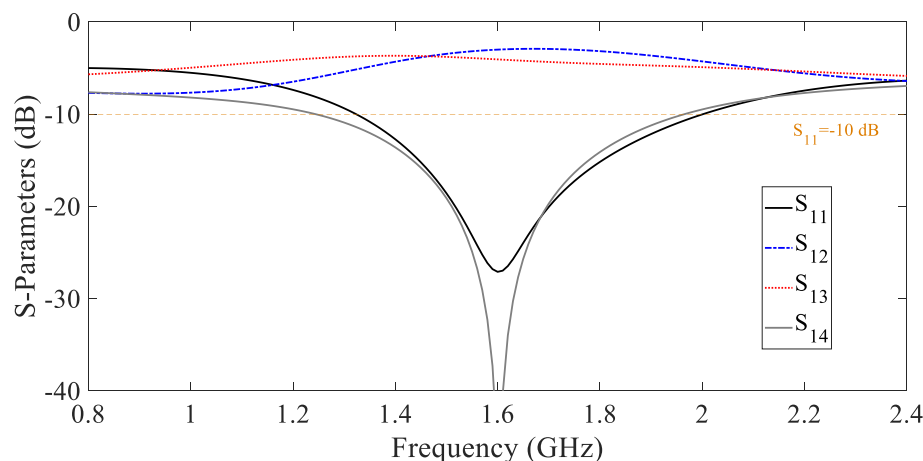
از اهداف اصلی این مطالعه، دستیابی به تطبیق امپدانس خوب و ویژگی‌های تشعشعی عالی در طراحی آنتن دوقطبی با قطبش دایروی می‌باشد. در این ساختار از دو عدد دوقطبی متعامد که توسط یک شبکه تغذیه تحریک می‌شوند، برای تولید تشعشع به صورت قطبش دایروی استفاده می‌شود. شبکه تغذیه دارای یک تزویج‌کننده ۳ دسی‌بل از نوع شاخه‌ای است که شامل دو خروجی با دامنه مساوی و اختلاف فاز ۹۰ درجه می‌باشد. شکل و ابعاد مرتبط با تزویج‌کننده در شکل ۱ نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌کنید یک زیرلایه از جنس FR4 و ابعاد ۶۰×۶۰ میلی‌متر مربع و ضخامت ۰/۸ میلی‌متر در پیکربندی تزویج‌کننده استفاده شده است.



شکل ۱: پیکربندی تزویج‌کننده شاخه‌ای

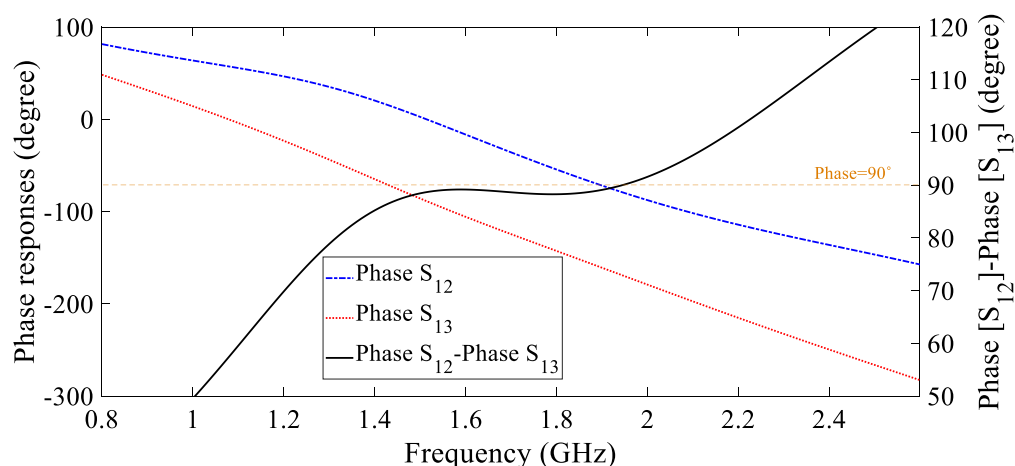
Figure 1. Branch-line coupler configuration

نتایج شبیه‌سازی مربوط به تزویج‌کننده شاخه‌ای در شکل‌های ۲ و ۳ نشان داده شده‌اند، بطوری که این نمودارها دامنه افت انتقالی، افت بازگشتی و اختلاف فاز بین دو خروجی مربعی را به ترتیب ۳/۵۲- دسی‌بل، ۴۵- دسی‌بل و ۸۹/۰۶ درجه در فرکانس کاری سیستم موقعیت‌یاب جهانی نمایش می‌دهند.



شکل ۲: نتایج شبیه‌سازی شده پارامترهای پراکندگی مربوط به تزویج‌کننده شاخه‌ای

Figure 2. Simulated S-parameters of the branch-line coupler



شکل ۳: نتایج شبیه‌سازی شده پاسخ فاز مربوط به تزویج‌کننده شاخه‌ای

Figure 3. Simulated phase response of the branch-line coupler

همان‌طوری که در شکل ۱ قابل مشاهده است، ساختار تزویج‌کننده در بخش تحتانی صفحه زمین قرار گرفته است به طوری که خروجی‌های آن از طریق دو سوراخ بر روی صفحه زمین و دو هادی در درون سوراخ‌ها مستقیماً به بازوهای گاما^۱ شکل بال‌های یکپارچه لحیم‌کاری شده‌اند. هندسه آنتن دوقطبی متعامد پیشنهادی دارای تشعشع قطبش دایروی در شکل ۴ مشاهده می‌شود. آنتن از دو عدد دوقطبی و دو بال متصل به آن‌ها که به‌صورت متعامد نسبت به هم قرار گرفته‌اند، تشکیل می‌شود. همچنین زیرلایه اصلی آنتن شامل صفحه زمین و یک شبکه تغذیه در قسمت تحتانی آن می‌باشد. دوقطبی‌های متعامد در بخش تحتانی ۴ عدد زیرلایه قرار دارند. این زیرلایه‌ها در قسمت بالایی بال‌ها واقع شده و دوقطبی‌ها به آن‌ها لحیم می‌شوند. نهایتاً همه قسمت‌ها بر روی زیرلایه اصلی نصب می‌شوند. قطبش دایروی در تشعشع آنتن با چیدمان دوقطبی‌ها به‌صورت متعامد و همچنین تغذیه آن‌ها با دامنه یکسان و اختلاف فاز ۹۰ درجه فراهم می‌گردد. تمامی زیرلایه‌های استفاده شده از جنس FR4 با ضخامت ۰/۸ میلی‌متر و ثابت دی‌الکتریک نسبی ۴/۴ هستند. بریدگی‌های مستطیلی شکلی که دارای طول‌های مختلف و مناسبی هستند در بخش‌های تحتانی و فوقانی ساختار بال‌ها ایجاد شده‌اند تا به‌صورت متعامد در داخل یکدیگر قرار بگیرند. در نهایت یک صفحه زمین به ابعاد ۱۱۳×۱۱۰ میلی‌متر مربع در بخش تحتانی دوقطبی‌ها و در فاصله‌ای حدود ربع طول موج فرکانس مرکزی آنتن، به‌عنوان منعکس‌کننده قرار گرفته است. در واقع فاصله یک آنتن دوقطبی متعامد چاپی با تغذیه بال‌های یکپارچه از سطح زمین،

^۱Γ

یک پارامتر حیاتی است که می‌تواند بر عملکرد آنتن تأثیر فراوانی بگذارد. اغلب فواصل بهینه بر اساس اهداف طراحی‌ها و کاربردهای مورد نظر، تعیین می‌شوند. برخی ملاحظات برای انتخاب پارامتر فاصله وجود دارند که عبارت‌اند از:

(۱) بکارگیری مناسب بالن:

بالن یکپارچه با هدف تبدیل یک خط انتقال نامتعادل به متعادل و همچنین تطبیق امپدانس طراحی شده است. فاصله بین دوقطبی متعامد و صفحه زمین باید به گونه‌ای انتخاب شود که ساختار بالن و اتصال آن به بازوهای دوقطبی به صورت مناسبی انجام شده و تطبیق امپدانس مطلوب حاصل شود.

(۲) دستیابی به پترن تشعشی مناسب:

فاصله دوقطبی‌ها از سطح زمین می‌تواند بر روی پترن تشعشی آنتن تأثیر بگذارد. لذا در تعیین این فاصله، پترن تشعشی آنتن لحاظ گردیده و یک انتخاب ایده‌آل برای آن انجام می‌شود.

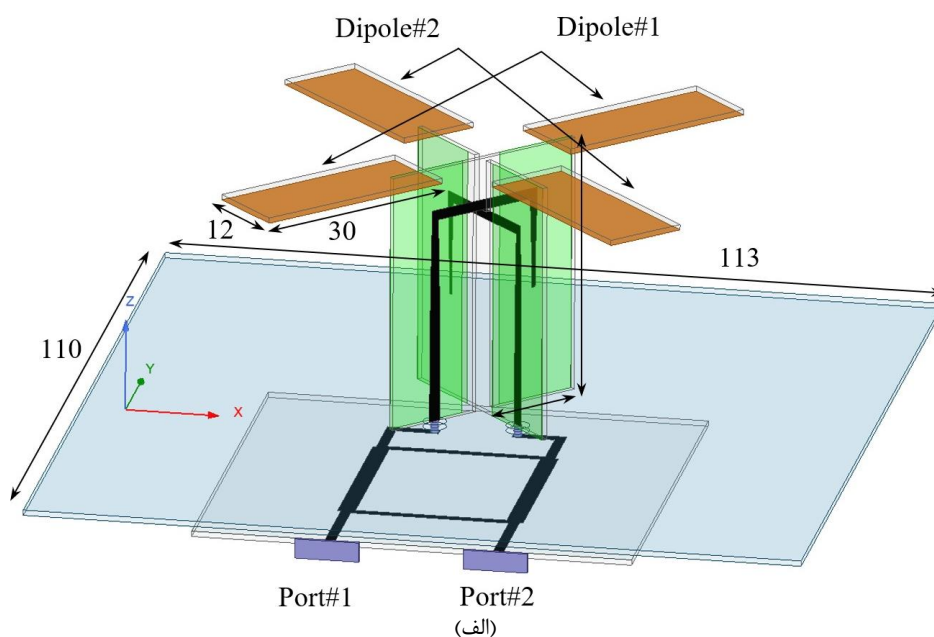
(۳) تطبیق امپدانس آنتن:

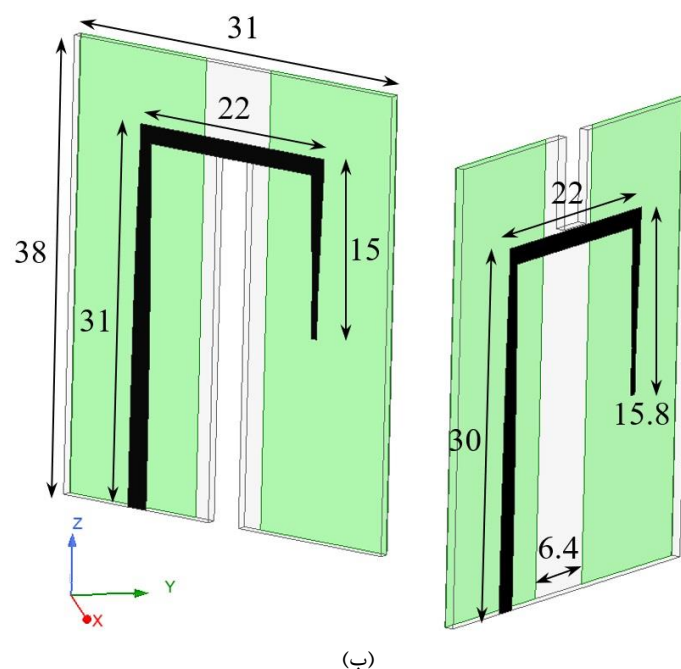
فاصله بین دوقطبی‌ها و صفحه زمین غالباً می‌تواند بر تطبیق امپدانس آنتن تأثیر بگذارد. لذا برخی از فواصل ممکن است منجر به تطبیق امپدانس بهتری شود که به طبع آن باعث بهبود عملکرد آنتن نیز خواهد شد. از سوی دیگر، اجزای آنتن ممکن است تحت تأثیر نزدیکی به صفحه زمین قرار بگیرند و جهت دستیابی به تطبیق امپدانس مورد نظر، تنظیماتی روی آن‌ها لازم‌الاجرا شود.

(۴) کنترل پترن تشعشی آنتن:

فاصله از سطح زمین می‌تواند برای کنترل پترن تشعشی آنتن دوقطبی متعامد استفاده شود. برای مثال، افزایش فاصله ممکن است به کاهش اثرات زمین و تغییر شکل پترن در زاویه ارتفاع تأثیرگذار باشد.

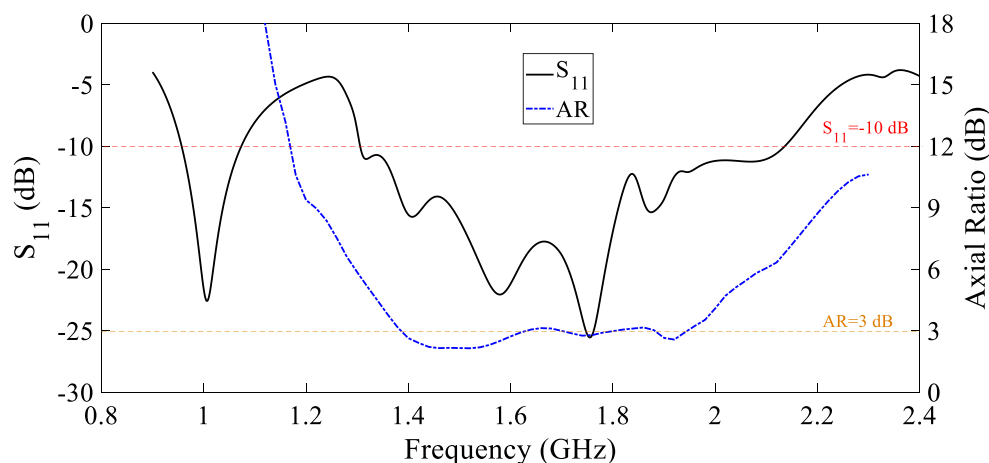
همان‌طور که توضیح داده شد، توجه به این نکته ضروری است که فاصله بهینه ممکن است برای طرح‌ها و کاربردهای مختلف، متفاوت باشد. بنابراین، ترکیبی از شبیه‌سازی، آزمایش و طراحی ممکن است برای تنظیم دقیق فاصله آنتن دوقطبی متعامد چایی با تغذیه بالن یکپارچه از سطح زمین ضروری باشد. اما آنچه که بیشتر از همه مد نظر می‌باشد و در این نوع از طراحی آنتن‌ها استفاده می‌شود، انتخاب فاصله در حدود ربع طول موج می‌باشد. لذا در طراحی ارائه شده برای این مقاله نیز، انتخاب اولیه برای فاصله بین دوقطبی‌ها و صفحه زمین در حدود ربع طول موج در فرکانس مرکزی آنتن می‌باشد (حدوداً ۳۲ میلی‌متر). با انتخاب اولیه فاصله و انجام شبیه‌سازی‌های متعدد و تحلیل‌های پارامتریک و همچنین بررسی تأثیر فواصل مختلف بر روی عملکرد بهینه آنتن، در نهایت این فاصله برابر با ۳۸ میلی‌متر انتخاب گردید.





شکل ۴: (الف) پیکربندی آنتن دوقطبی متعامد پیشنهادی (ب) ساختار بالن‌ها
Figure 4. (a) Configuration of the proposed crossed-dipole, and (b) configuration of the baluns

نتایج شبیه‌سازی آنتن با بکارگیری نرم افزار HFSS Ver. 15 و بر اساس روش اجزای محدود انجام گرفته است. در شکل ۵، افت بازگشتی و نسبت محوری شبیه‌سازی شده آنتن دوقطبی متعامد پیشنهادی نمایش داده شده است. این شکل نشان می‌دهد که آنتن باند فرکانسی ۲/۱۳۵-۱/۳۰۴ گیگاهرتز را با معیار افت بازگشتی کوچکتر از -۱۰ دسی‌بل ($S_{11} \leq -10$ dB) به راحتی پوشش می‌دهد. علاوه بر این، پهنای باند نسبت محوری شبیه‌سازی شده آنتن در این شکل قابل مشاهده است. در واقع، پهنای باند نسبت محوری شبیه‌سازی شده تقریباً به اندازه ۳۱۴ مگاهرتز از فرکانس ۱/۳۸۴ گیگاهرتز تا ۱/۶۹۸ گیگاهرتز را پوشش می‌دهد. با توجه به نتایج، آنتن پیشنهادی باند L1 سیستم موقعیت‌یاب جهانی را به‌طور کامل با قطبش دایروی پوشش می‌دهد.



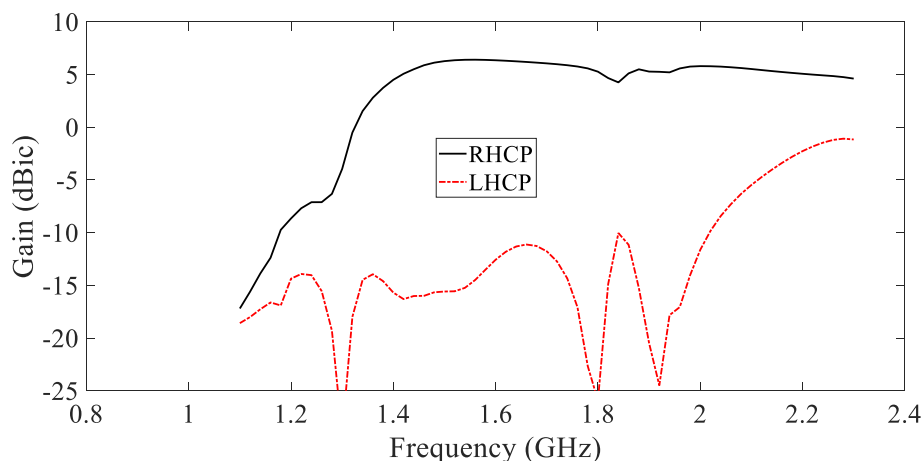
شکل ۵: افت بازگشتی و نسبت محوری آنتن دوقطبی متعامد پیشنهادی
Figure 5. Simulated return loss and AR of the proposed crossed-dipole antenna

در شکل ۶ نتایج مربوط به بهره‌های با قطبش دایروی راستگرد^۲ و قطبش دایروی چپگرد^۳ آنتن دوقطبی متعامد پیشنهادی نمایش داده شده‌اند. با توجه به این منحنی، پیک بهره آنتن ۶/۴۱ دسی‌بل در فرکانس ۱/۵۵۵ گیگاهرتز است.

¹ High-Frequency Structure Simulator

² Right-Hand Circular Polarization (RHCP)

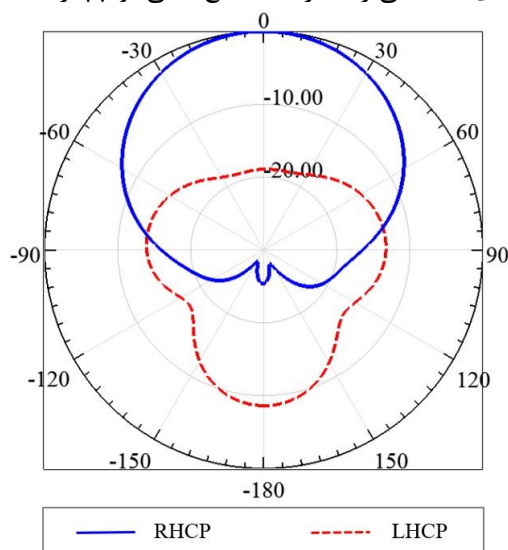
³ Left-Hand Circular Polarization (LHCP)



شکل ۶: بهره‌های با قطبش دایروی راستگرد و چپگرد شبیه‌سازی شده آنتن دوقطبی متعامد پیشنهادی

Figure 6. Simulated RHCP and LHCP gains of the proposed crossed-dipole antenna

علاوه بر این، در شکل ۷ الگوهای شبیه‌سازی شده نرمالیزه شده مربوط به قطبش دایروی راستگرد و چپگرد آنتن دوقطبی متعامد پیشنهادی نشان داده شده‌اند. با توجه به الگوها، آنتن دوقطبی متعامد پیشنهادی دارای تشعشع قطبش دایروی راستگرد بوده و نتایج الگوی پایداری از آنتن را نمایش می‌دهند. همچنین، در فرکانس مرکزی باند L1 سیستم‌های موقعیت‌یاب جهانی اختلاف بیش از ۱۹ دسی‌بل بین الگوهای تشعشعی راستگرد (تشعشع اصلی) و چپگرد (تشعشع متعامد) مشاهده می‌شود.



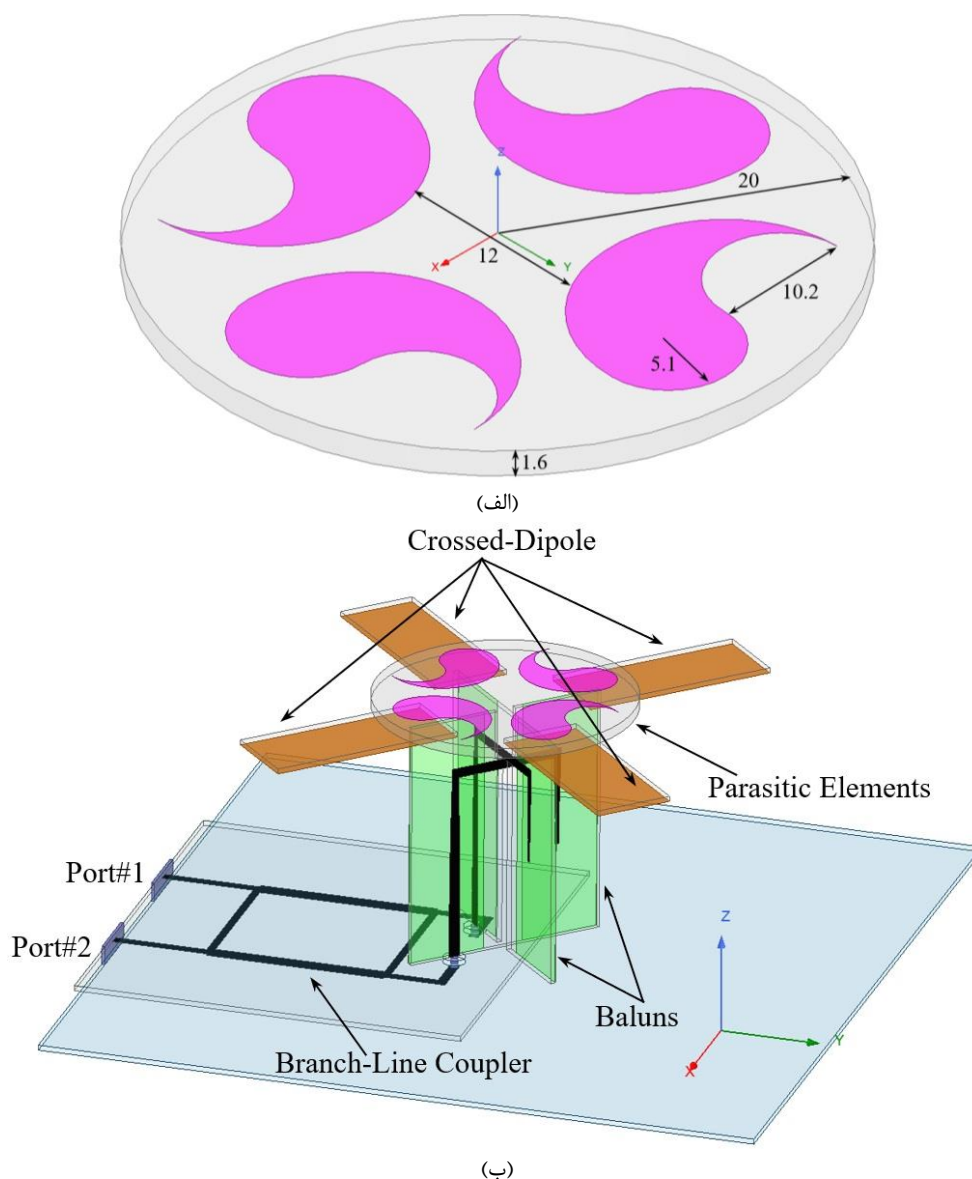
شکل ۷: الگوهای نرمالیزه شبیه‌سازی شده مربوط به قطبش دایروی راستگرد و چپگرد آنتن دوقطبی متعامد پیشنهادی در فرکانس ۱/۵۷۵ گیگاهرتز

Figure 7. Simulated normalized RHCP and LHCP radiation patterns of the proposed crossed-dipole antenna at 1.575 GHz frequency

۳- آنتن دوقطبی متعامد با استفاده از المان‌های پارازیتیک

نتایج آنتن دوقطبی متعامد در بخش قبل نشان می‌دهند که ساختار آنتن نیاز به بهینه‌سازی دارد. با اینکه در مرحله قبل، فرایند تولید قطبش دایروی با موفقیت انجام شد، ولی منحنی مربوط به نسبت محوری آنتن بسیار نزدیک به خط ۳- دسی‌بل بوده و ساختار آنتن با توجه به نتایج، این پتانسیل را از خود نشان می‌دهد که نتایج رضایت بخش‌تری به نمایش بگذارد. لذا جهت بهبود قطبش دایروی آنتن، از چهار عدد المان پارازیتیک ترنج شکل در بالای بازوهای دوقطبی استفاده شده است. در حقیقت، با ساختار ارائه شده، جریان‌هایی در المان‌های پارازیتیک توسط بازوهای دوقطبی، القا می‌شود. با توجه به ساختار دایروی المان‌های پارازیتیک، جریان‌های القا شده در المان‌های پارازیتیک ترنج شکل، به صورت چرخشی عمل کرده و این موضوع باعث بهبود عملکرد قطبش دایروی آنتن می‌گردد. باید توجه کرد که برای دستیابی به بهترین عملکرد قطبش دایروی، ابعاد المان‌های پارازیتیک توسط یک سری تحلیل‌های پارامتریک تنظیم می‌شوند. اشکال ترنج شکل به سادگی توسط یک دایره با شعاع ۱۰/۲

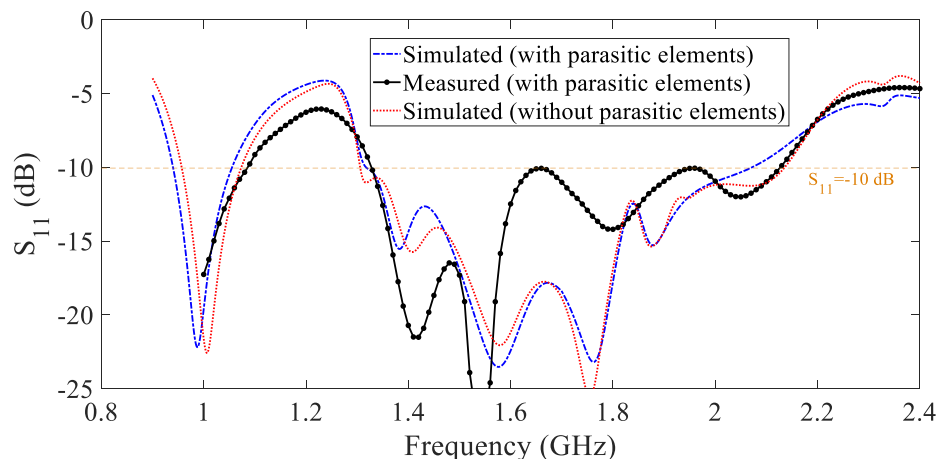
میلی‌متر و دو دایره با شعاع ۵/۱ میلی‌متر ایجاد می‌شوند. در شکل ۸ ساختار المان‌های پارازیتیک و پیکربندی آنتن دوقطبی متعامد به همراه المان‌های پارازیتیک نمایش داده شده است. زیرلایه مورد استفاده در ساختار المان‌های پارازیتیک از نوع FR4 با ضخامت ۱/۶ میلی‌متر می‌باشد.



شکل ۸: (الف) ساختار المان‌های پارازیتیک (ب) پیکربندی آنتن دوقطبی متعامد پیشنهادی با المان پارازیتیک

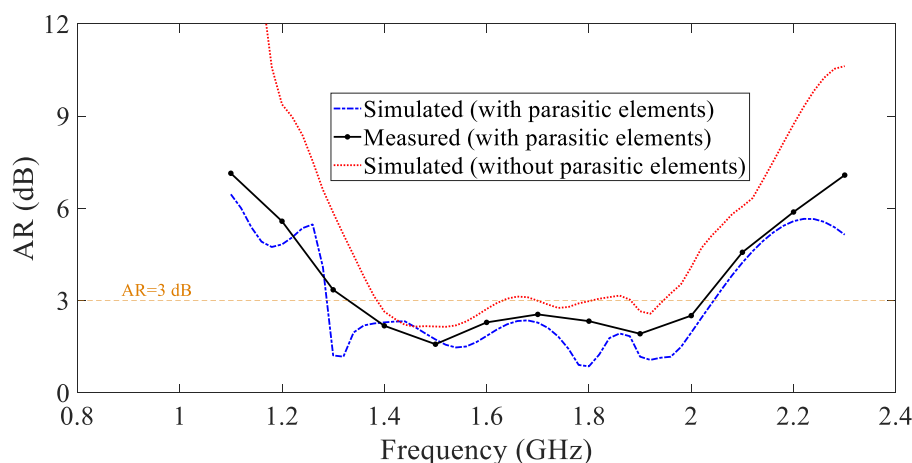
Figure 8. (a) Configuration of the parasitic elements, and (b) configuration of the proposed crossed-dipole antenna with parasitic elements

در شکل‌های ۹ تا ۱۱ نتایج آنتن دوقطبی متعامد پیشنهادی با المان‌های پارازیتیک نمایش داده شده است. با توجه به شکل ۹، آنتن پیشنهادی با المان‌های پارازیتیک دارای پهنای باند امیدانسی شبیه‌سازی شده ۴۴/۴۹٪ (۲/۰۶۹-۱/۳۱۶ گیگاهرتز) است که تقریباً با پهنای باند امیدانسی آنتن بدون المان‌های پارازیتیک همخوانی دارد. این بدان معنی است که حضور المان‌های پارازیتیک بر روی پهنای باند امیدانسی آنتن تأثیر چشمگیری نمی‌گذارد. برای اثبات عملکرد آنتن، یک نمونه‌ی اولیه از آنتن دوقطبی متعامد پیشنهادی با المان‌های پارازیتیک، پیاده‌سازی و آزمایش شده است. در این تحقیق یک تحلیلگر شبکه Agilent (E8363C) برای استخراج نتایج اندازه‌گیری استفاده شده است. همچنین شکل ۹ مقایسه بین پهنای باند امیدانسی شبیه‌سازی شده و اندازه‌گیری شده آنتن پیشنهادی با المان‌های پارازیتیک را نمایش می‌دهد.



شکل ۹: افت بازگشتی شبیه‌سازی شده و تست شده آنتن دوقطبی متعامد پیشنهادی با/بدون المان‌های پارازیتیک
Figure 9. Simulated and measured return loss for the proposed crossed-dipole antenna with/without parasitic elements

با توجه به نتایج آزمایشگاهی، پهنای باند امپدانسی آنتن ۷۹۹ مگاهرتز اندازه‌گیری شده است که از فرکانس ۱/۳۲۷ گیگاهرتز تا ۲/۱۲۶ گیگاهرتز را با معیار افت بازگشتی کوچک‌تر از -10 دسی‌بل شامل می‌شود. همچنین در شکل ۱۰ مقایسه بین پهنای باند قطبش دایروی شبیه‌سازی شده و اندازه‌گیری شده آنتن پیشنهادی با المان‌های پارازیتیک را نشان می‌دهد. با توجه به نتایج آزمایشگاهی، پهنای باند قطبش دایروی آنتن ۶۹۳ مگاهرتز اندازه‌گیری شده است که از فرکانس ۱/۳۲۹ گیگاهرتز تا ۲/۰۲۲ گیگاهرتز را با معیار نسبت محوری کوچک‌تر از ۳ دسی‌بل شامل می‌شود. این در حالی است که پهنای باند قطبش دایروی آنتن بدون المان‌های پارازیتیک ۳۱۴ مگاهرتز بود و با افزودن المان‌های پارازیتیک، افزایشی در حدود ۲۱٪ در پهنای باند قطبش دایروی آنتن مشاهده می‌گردد. همچنین نتایج نشان می‌دهند که خلوص قطبش دایروی آنتن با افزودن المان‌های پارازیتیک بصورت قابل توجهی افزایش یافته است.

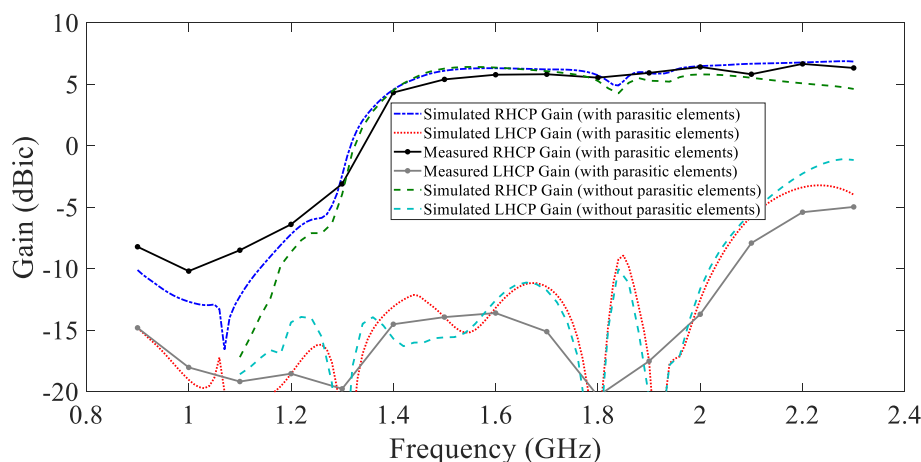


شکل ۱۰: پهنای باند قطبش دایروی شبیه‌سازی شده و تست شده آنتن دوقطبی متعامد پیشنهادی با/بدون المان‌های پارازیتیک
Figure 10. Simulated and measured AR bandwidth for the proposed crossed-dipole antenna with/without parasitic elements

در شکل ۱۱، بهره شبیه‌سازی شده مربوط به قطبش دایروی راستگرد و چپگرد آنتن دوقطبی متعامد پیشنهادی در دو حالت با و بدون المان‌های پارازیتیک و همچنین بهره اندازه‌گیری شده این آنتن در جهت حداکثر تشعشع (زاویه‌های سمتی و ارتفاعی مساوی صفر^۱) نمایش داده شده است. با توجه به نتایج آزمایشگاهی، بیشینه بهره قطبش دایروی راستگرد آنتن دوقطبی پیشنهادی با المان‌های پارازیتیک ۶/۴۰ دسی‌بل در فرکانس ۲ گیگاهرتز گزارش شده است. این مقدار بهره برای آنتن گیرنده

^۱ $\phi=0^\circ$ & $\theta=0^\circ$

سیستم موقعیت‌یاب جهانی بسیار مناسب و قابل قبول است و به ویژه در شرایط بد آب و هوایی می‌تواند سیگنال مورد نیاز سیستم برای موقعیت‌یابی را فراهم نماید.



شکل ۱۱: بهره‌های قطبش دایروی راستگرد و چپگرد شبیه‌سازی شده و تست شده آنتن دوقطبی متعامد پیشنهادی با/بدون المان‌های پارازیتیک
Figure 11. Simulated and measured RHCP and LHCP gains of the proposed crossed-dipole antenna with/without parasitic elements

همچنین الگوهای تشعشعی نرمالیزه شده مربوط به قطبش دایروی راستگرد و چپگرد شبیه‌سازی شده و اندازه‌گیری شده در فرکانس ۱/۵۷۵ گیگاهرتز در شکل ۱۲ (الف) ارائه شده است که نشان می‌دهد آنتن دوقطبی پیشنهادی به همراه المان‌های پارازیتیک، دارای تشعشع قطبش دایروی راستگرد یک طرفه در باند فرکانسی کاری سیستم موقعیت‌یاب جهانی است. همچنین اختلاف بین بیشینه مقدار دامنه الگوی تشعشعی راستگرد و چپگرد آنتن در جهت حداکثر تشعشع (زاویه‌های سمتی و ارتفاعی مساوی صفر) برابر با ۱۴/۷۱ دسی‌بل گزارش شده است. هر گونه اختلاف بین نتایج شبیه‌سازی و اندازه‌گیری شده ممکن است به خطاهای تجربی در فرآیند ساخت و اندازه‌گیری آنتن مربوط شود. همچنین الگوهای تشعشعی E-plane و H-plane آنتن پیشنهادی در فرکانس ۱/۵۷۵ گیگاهرتز در شکل ۱۲ (ب) نمایش داده شده‌اند. با توجه به شکل، مشاهده می‌گردد که الگوهای Co و Cross آنتن در این فرکانس به دلیل وجود قطبش دایروی بر روی هم منطبق شده‌اند.

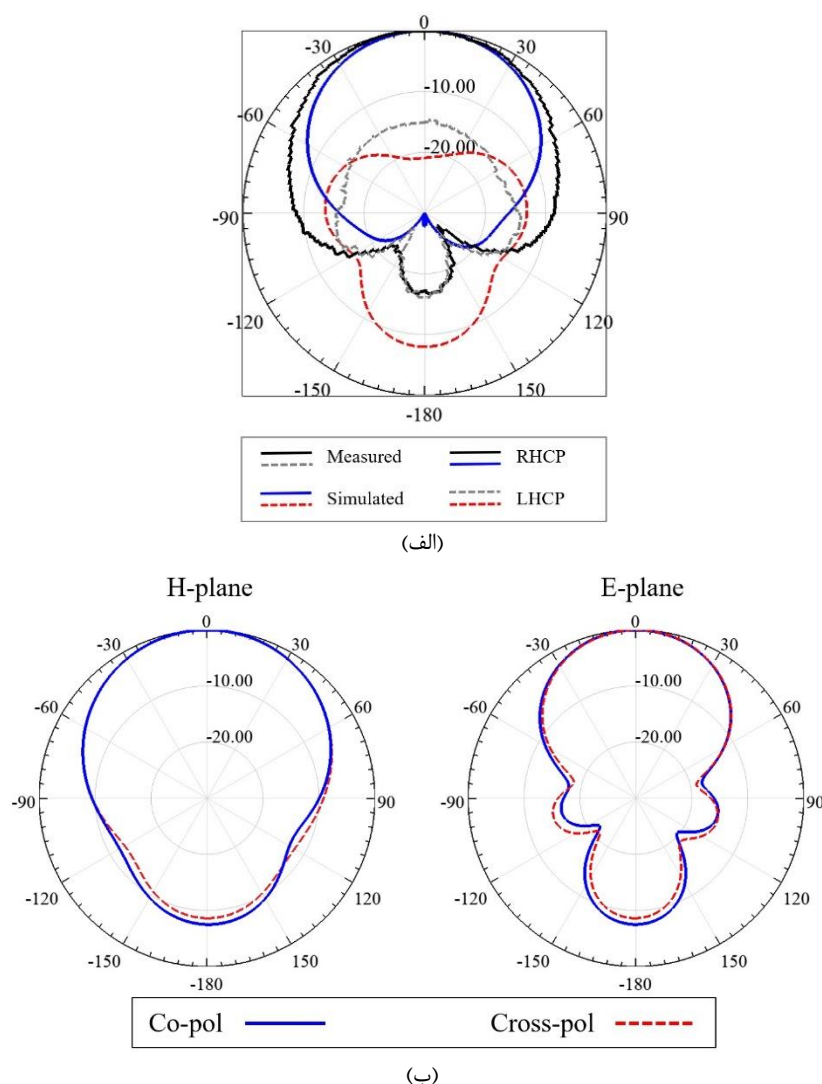
المان‌های پارازیتیک، عناصر مضاعفی هستند که به ساختار آنتن الحاق می‌شوند تا ویژگی‌های تشعشعی آن را اصلاح کرده و عملکردش را از نظر بهره، الگوی تشعشعی و قطبش بهبود بخشند. هنگامی که المان‌های پارازیتیک برای بهبود قطبش دایروی به یک آنتن دوقطبی متعامد با تغذیه مربعی اضافه می‌شوند، نقش مهمی در شکل دادن به الگوی تشعشعی و دستیابی به ویژگی‌های قطبش مطلوب، ایفا می‌کنند. موارد ذیل را می‌توان جهت تشریح عملکرد المان‌های پارازیتیک بر روی دوقطبی‌ها لحاظ نمود:

(۱) بهبود قطبش دایروی:

افزودن المان‌های پارازیتیک، ویژگی‌های مطلوب مرتبط با قطبش دایروی آنتن را افزایش می‌دهد. در واقع قطبش دایروی از ایجاد اختلاف فاز ۹۰ درجه بین دو جزء متعامد (افقی و عمودی) موج الکترومغناطیسی به دست می‌آید. به این ترتیب المان‌های پارازیتیک به دستیابی و حفظ این اختلاف فاز کمک شایانی می‌نمایند.

(۲) تعامل با عناصر آنتن:

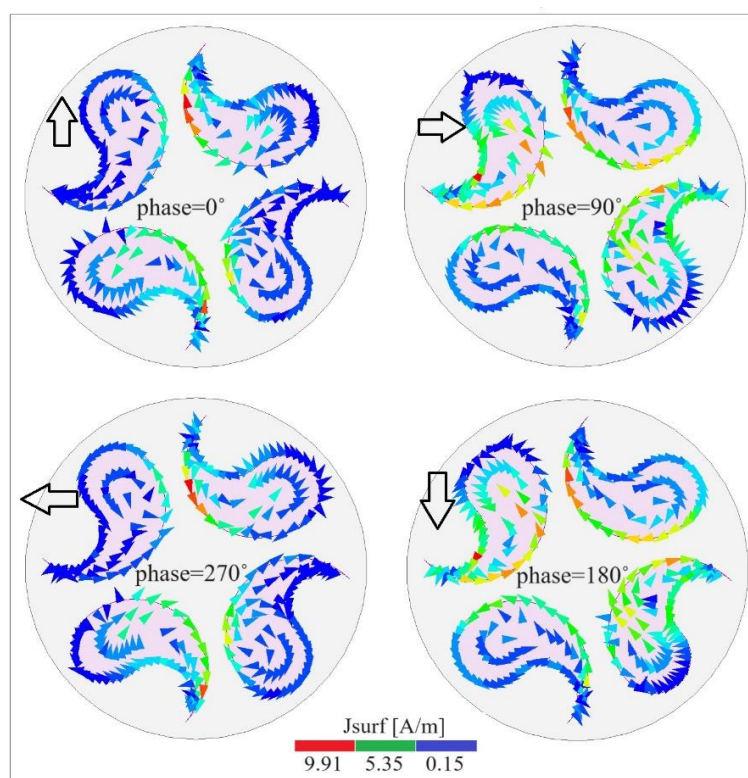
المان‌های پارازیتیک با دوقطبی‌های متعامد برهمکنش کرده و باعث می‌شوند جریان‌ها و ولتاژهای روی دوقطبی‌ها تغییر نمایند. این تعامل در جهت دستیابی به قطبش دایروی مطلوب و الگوی تشعشعی مناسب کمک می‌کند.



شکل ۱۲: الگوهای تشعشعی نرمالیزه شده، (الف) قطبش دایروی راستگرد و چپگرد و (ب) H-plane و E-plane آنتن پیشنهادی در فرکانس ۱/۵۷۵ گیگاهرتز

Figure 12. (a) the RHCP and LHCP, and (b) E-plane and H-plane normalized radiation patterns of the proposed antenna at 1.575 GHz frequency

در طراحی ارائه شده از چهار عدد المان پارازیتیک ترنج شکل در بالای دوقطبی‌های متعامد استفاده شده است. همان‌طور که در توزیع جریان‌های سطحی بر روی المان‌های پارازیتیک در شکل ۱۳ نشان داده شده است، پیکربندی ویژه و منحصر به فردی که المان‌های ترنج شکل دارند، باعث چرخش مناسب جریان بر روی این المان‌ها شده است. چرخش جریان‌های سطحی روی این المان‌ها و چیدمان مناسب آن‌ها به صورت دایروی در بخش فوقانی دوقطبی‌های متعامد، قطبش دایروی آنتن را بهبود داده و خلوص قطبش را نیز افزایش می‌دهد. ساختار المان‌های ترنج شکل طوری هستند که از یک بخش پهن و یک بخش باریک تشکیل می‌شوند. این موضوع باعث جهت‌گیری بهینه جریان‌های سطحی بر روی این المان‌ها شده و باعث ایجاد چرخش مورد نظر برای جریان‌های سطحی می‌گردد. به این ترتیب دو عامل جداگانه در ایجاد و تقویت قطبش دایروی آنتن تشکیل می‌شود. عامل اول و اصلی، استفاده از دوقطبی‌های متعامد دارای تغذیه مربعی که اساس ایجاد قطبش دایروی در این طراحی به حساب می‌آید. عامل دوم، چرخش جریان‌های سطحی بر روی المان‌های پارازیتیک در بالای دوقطبی‌های متعامد می‌باشد. با این توضیحات، عامل دوم بیشتر وظیفه تقویت و افزایش خلوص قطبش دایروی آنتن را بر عهده داشته و نتیجه آن به صورت افزایش پهنای باند قطبش دایروی آنتن نمایان می‌گردد.

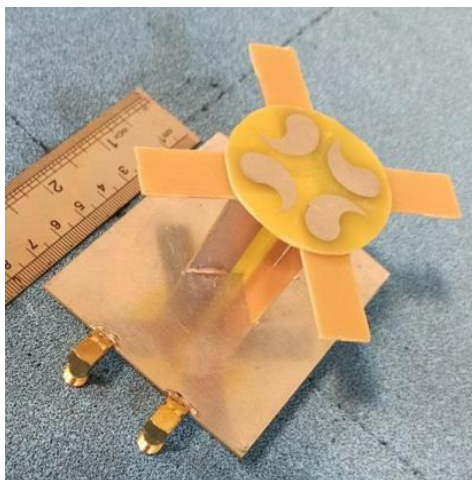


شکل ۱۳: توزیع جریان‌های سطحی بر روی المان‌های پارازیتیک در فرکانس ۱/۵۷۵ گیگاهرتز و در فازهای مختلف
Figure 13. Distribution of surface currents on parasitic elements at a frequency of 1.575 GHz and in different phases

۴- پیاده‌سازی و اندازه‌گیری آنتن در آزمایشگاه

آنتن دوقطبی متعامد با المان‌های پارازیتیک پیشنهادی پس از طی مراحل بهینه‌سازی و استخراج پارامترهای فیزیکی نهایی، ساخته شد و در آزمایشگاه آنتن و میکروویو دانشگاه ارومیه تحت تست و اندازه‌گیری قرار گرفت. سه تصویر در شکل ۱۴ نمایش داده شده‌اند که اولی مربوط به ساختار نهایی نمونه اولیه از آنتن مونتاژ شده پیشنهادی می‌باشد. برای مونتاژ و اتصال قسمت‌های مختلف این آنتن، زیرلایه‌های بالن‌ها که به صورت عمودی کنار هم قرار دارند، عمود بر سطح زمین قرار گرفته و زیرلایه‌های بالایی حاوی بازوهای دوقطبی به آن‌ها لحیم شده‌اند. همچنین یک زیرلایه شامل المان‌های پارازیتیک نیز در بالای دوقطبی‌ها قرار دارد. دو عدد کانکتور از نوع SMA به دو پورت تزویجگر شاخه‌ای لحیم‌کاری می‌شوند تا کابل کوکسیال به پورت یک و بار ۵۰ اهمی به پورت دوم اتصال یابند. در تصاویر دوم و سوم شکل ۱۴، به ترتیب فرایند تست پهنای باند امپدانس آنتن توسط دستگاه تحلیل گر شبکه و فرایند اندازه‌گیری پارامترهای تشعشی آنتن در اتاق ضد انعکاس آزمایشگاه آنتن نشان داده شده است.

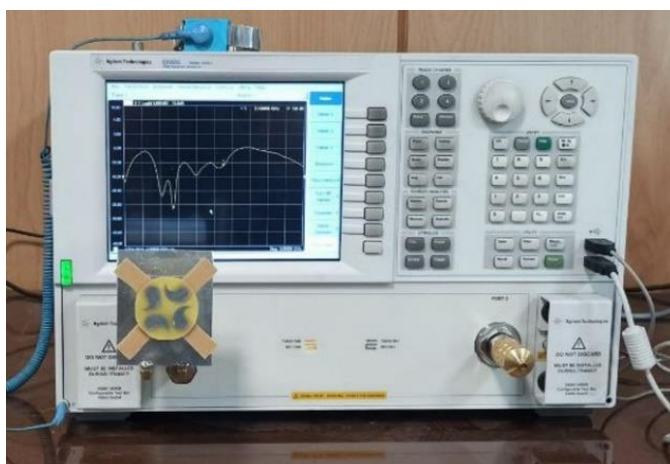
به عنوان آخرین بخش از مقاله، نتایج به دست آمده از طراحی ارائه شده در این مقاله با کارهای مشابه که در سال‌های اخیر معرفی شده‌اند [۱۸]، [۲۳]، [۲۴] و [۲۹] مورد مقایسه قرار گرفت. به همین منظور در جدول ۱، خلاصه‌ای از عملکرد آنتن‌های مشابه با عملکرد آنتن پیشنهادی مقایسه و بررسی شده است. نتایج حاکی از آن هستند که آنتن پیشنهادی در این مقاله، با در نظر گرفتن ویژگی‌های مرتبط با ابعاد، پهنای باند امپدانس و قطبش دایروی، بیشترین بهره را ارائه می‌دهد.



(الف)



(ج)



(ب)

شکل ۱۴: (الف) عکس آنتن ساخته شده، (ب) آنتن متصل به تحلیل گر شبکه و (ج) آنتن در اتاق ضد انعکاس
Figure 13. (a) Photograph of the fabricated antenna, (b) antenna connected to the VNA and (c) antenna in the anechoic chamber

جدول ۱: مقایسه آنتن پیشنهادی با آنتن‌های مشابه

Table 1. Comparison of the proposed antenna with similar antennas

مرجع	ابعاد [میلی متر مکعب]	بیشینه بهره [دسی بل]	پهنای باند قطبش دایروی [مگا هرتز]	پهنای باند امپدانسی [مگا هرتز]	نوع آنتن
[۱۸]	$14 \times 14 \times 5$	۶	۱۹۷۰-۱۲۱۰	۲۰۱۰-۱۰۱۰	آنتن دو قطبی متقاطع با شبکه تغذیه نابرابر
[۲۳]	$113 \times 113 \times 4$	۵/۷۲	۱۹۳۸-۱۳۰۷	۲۲۱۰-۱۲۶۰	آنتن دوقطبی متقاطع با کوپلر شاخه ای
[۲۴]	$45 \times 45 \times 3/18$	۲/۲	۱۵۷۸-۱۵۷۲	۱۵۸۸-۱۵۵۸	آنتن میکرواستریپ با ساختار فراکتالی در زمین
[۲۹]	$14 \times 14 \times 38/8$	۳/۱	۱۴۳۹-۱۰۷۸	۱۴۹۵-۹۰۷	آنتن دوقطبی متقاطع با صفحه زمین جعبه‌ای شکل
این مقاله	$110 \times 113 \times 42/25$	۶/۴	۱۶۹۸-۱۳۸۴	۲۱۳۵-۱۳۰۴	آنتن دوقطبی متعامد با المان‌های پارازیتیک ترنج شکل

۵- نتیجه گیری

در این مقاله، شبیه سازی و ساخت یک آنتن دوقطبی چاپی متعامد دارای تغذیه از نوع تزویجگر شاخه ای برای گیرنده های سیستم موقعیت یاب جهانی در باند فرکانسی L1 (۱۵۷۵ مگاهرتز) ارائه شده است. با قرار دادن دوقطبی ها به صورت متعامد و استفاده از تکنیک تغذیه مربعی و همچنین بکارگیری یک صفحه زمین به عنوان بازتابنده، آنتن پیشنهادی به تشعشع قطبش دایروی راستگرد یک طرفه در باند فرکانس کاری دست یافته است. طبق نتایج، آنتن دوقطبی چاپی متعامد پیشنهادی دارای پهنای باند امپدانسی ۲/۱۳۵-۱/۳۰۴ گیگاهرتز با معیار افت بازگشتی کوچکتر از ۱۰- دسی بل و پهنای باند نسبت محوری به بزرگی ۳۱۴ مگاهرتز (۱/۶۹۸-۱/۳۸۴ گیگاهرتز) با معیار نسبت محوری کوچکتر از ۳ دسی بل است. منحنی قطبش دایروی آنتن بسیار نزدیک به خط ۳ دسی بل بوده و خلوص پایینی دارد که این مشکل با اضافه کردن چهار عدد المان پارازیتیک ترنج شکل به قسمت فوقانی دوقطبی ها حل می شود. با توجه به نتایج آزمایشگاهی، استفاده از المان های پارازیتیک در بالای دوقطبی های متعامد، پهنای باند قطبش دایروی ۶۹۳ مگاهرتز از فرکانس ۱/۳۲۹ گیگاهرتز تا ۲/۰۲۲ گیگاهرتز را با معیار نسبت محوری کوچکتر از ۳ دسی بل برای آنتن نتیجه می دهد. یعنی با افزودن المان های پارازیتیک، افزایشی در حدود ۲۱٪ در پهنای باند قطبش دایروی آنتن مشاهده می شود. الگوی آنتن پیشنهادی پایدار بوده و این آنتن با بیشینه بهره ای معادل ۶/۴۰ دسی بل برای کاربردهای موقعیت یابی جهانی در باند فرکانسی ۱/۵۷۵ گیگاهرتز مناسب است. آنتن دوقطبی متعامد دارای المان های پارازیتیک پیشنهادی ساخته شد و در آزمایشگاه آنتن تحت تست و اندازه گیری قرار گرفت. نتایج تست و شبیه سازی همخوانی خوبی را با هم به نمایش گذاشتند.

سپاسگزاری

نویسندگان مقاله از آزمایشگاه تحقیقاتی آنتن و میکروویو شمال غرب^۱ در دانشگاه ارومیه برای حمایت های فنی تشکر می کنند.

مراجع

- [1] R. Xu, J.-Y. Li and J. Liu, "A design of broadband circularly polarized C-shaped slot antenna with sword-shaped radiator and its array for L/S-band applications," in *IEEE Access*, vol. 6, pp. 5891–5896, 2018, doi:10.1109/access.2017.2788008
- [2] A. Siahcheshm, J. Nourinia, Ch. Ghobadi and M. Shokri, "Circularly polarized printed helix antenna for L- and S-bands applications," *Radioengineering*, vol. 29, no. 1, pp. 67–73, 2020, doi:10.13164/re.2020.0067.
- [3] S. Fu, S. Fang, Z. Wang and X. Li, "Broadband circularly polarized slot antenna array fed by asymmetric CPW for L-band applications," *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 8, pp. 1014–1016, 2009, doi:10.1109/lawp.2009.2031662.
- [4] H. Govindarajan et al., "Design of a compact dual circular-polarized antenna for L-band Satellite Applications," *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 19, no. 4, pp. 547–551, 2020, doi:10.1109/lawp.2020.2971322.
- [5] M. Sekhar, E. K. Kumari and A. N. V. R. Kumar, "Wideband high-gain circularly polarized planar antenna array for L band Radar," *IEEE International Conference on Computational Intelligence and Computing Research (ICCIC)*, 2017, pp. 1-4, doi:10.1109/iccic.2017.8524447.
- [6] M. Ameen and R. K. Chaudhary, "Electrically small circularly polarized antenna using vialess CRLH-TL and fractals for L-band Mobile Satellite Applications," *Microwave and Optical Technology Letters*, vol. 62, no. 4, pp. 1686–1696, 2019, doi:10.1002/mop.32213.
- [7] T. Hong, W. Jiang, S. X. Gong and Y. Liu, "Research on the L-band circularly polarized antenna with low RCS level," *Journal of Electromagnetic Waves and Applications*, vol. 26, no. 14–15, pp. 1947–1955, 2012,

¹ Northwest Antenna & Microwave Research Laboratory (NAMRL)

- doi:10.1080/09205071.2012.722751.
- [8] M. Sun, Z. Zhang, F. Zhang and A. Chen, "L/S Multiband Frequency-reconfigurable antenna for satellite applications," *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 18, no. 12, pp. 2617–2621, 2019, doi:10.1109/lawp.2019.2945624.
 - [9] E. Brookner, W. Hall and R. Westlake, "Faraday loss for L-band Radar and communications systems," *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, vol. AES-21, no. 4, pp. 459–469, 1985, doi:10.1109/taes.1985.310634.
 - [10] M. Shokri V. Rafii, S. Karamzadeh, Z. Amiri and B. Virdee, "Miniaturised ultra-wideband circularly polarised antenna with modified ground plane," *Electronics Letters*, vol. 50, no. 24, pp. 1786–1788, 2014, doi:10.1049/el.2014.3278.
 - [11] R. Xu *et al.*, "Analysis and design of Ultrawideband circularly polarized antenna and array," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 68, no. 12, pp. 7842–7853, 2020, doi:10.1109/tap.2020.2998922.
 - [12] H. Shirzad, M. Shokri, Z. Amiri, S. Asiaban and B. Virdee, "Wideband circularly polarized square slot antenna with an annular patch," *Microwave and Optical Technology Letters*, vol. 56, no. 1, pp. 229–233, 2013, doi:10.1002/mop.28016.
 - [13] S. Mohammadi, J. Nourinia, C. Ghobadi, J. Pourahmadazar and M. Shokri, "Compact broadband circularly polarized slot antenna using two linked elliptical slots for C-band applications," *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 12, pp. 1094–1097, 2013, doi:10.1109/lawp.2013.2280457.
 - [14] A. Siahcheshm, J. Nourinia and Ch. Ghobadi, "Circularly polarized antenna array with a new sequential phase feed network utilizing directional coupler," *AEU - International Journal of Electronics and Communications*, vol. 93, pp. 75–82, 2018, doi:10.1016/j.aeue.2018.06.006.
 - [15] W. Lin, H. Wong and R. W. Ziolkowski, "Circularly polarized antenna with reconfigurable broadside and conical beams facilitated by a mode switchable feed network," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 66, no. 2, pp. 996–1001, 2018, doi:10.1109/tap.2017.2784452.
 - [16] W.-J. Yang, Y.-M. Pan and S.-Y. Zheng, "A compact broadband circularly polarized crossed-dipole antenna with a very low profile," *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 18, no. 10, pp. 2130–2134, 2019, doi:10.1109/lawp.2019.2938597.
 - [17] R.-Y. Sun and Q.-H. Chen, "Quadrature feed wideband circularly polarized cylindrical dielectric resonator antenna," *Journal of Electromagnetic Waves and Applications*, vol. 28, no. 8, pp. 1011–1017, 2014, doi:10.1080/09205071.2014.902339.
 - [18] R. Tripathy, S. R. Patre, S. Sravan Kumar and S. P, "High Gain Cylindrical Cavity-Backed Crossed Dipole Antenna," *IEEE Wireless Antenna and Microwave Symposium (WAMS)*, Ahmedabad, India, 2023, pp. 1-5, doi: 10.1109/WAMS57261.2023.10242859.
 - [19] Z. Su, K. Klionovski, H. Liao, Y. Chen, A. Z. Elsherbeni and A. Shamim, "Antenna-on-Package Design: Achieving Near-Isotropic Radiation Pattern and Wide CP Coverage Simultaneously," in *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 69, no. 7, pp. 3740-3749, July 2021, doi: 10.1109/TAP.2020.3044134.
 - [20] P. Shah and S. Kumar, "Compact Dual Circularly Polarized Swastika Shaped Antenna for L-band Small Satellite Applications," *12th International Conference on Computing Communication and Networking Technologies (ICCCNT)*, Kharagpur, India, 2021, pp. 1-4, doi: 10.1109/ICCCNT51525.2021.9579943.
 - [21] A. Christodoulides and A. Feresidis, "3D Printed Anisotropic Metamaterial Substrates for Antenna Applications," *Antenna Measurement Techniques Association Symposium (AMTA)*, Daytona Beach, FL, USA, 2021, pp. 1-4, doi: 10.23919/AMTA52830.2021.9620598.

- [22] Z. N. Chen, *Handbook of Antenna Technologies*. Singapore: Springer Singapore, 2020.
- [23] M. Pourbagher, J. Nourinia and Ch. Ghobadi, "Circularly polarized printed crossed-dipole antenna using branch-line feed network for GPS applications," *AEU - International Journal of Electronics and Communications*, vol. 120, p. 153226, 2020, doi:10.1016/j.aeue.2020.153226.
- [24] K. Wei, J. Y. Li, L. Wang, R. Xu and Z. J. Xing, "A new technique to design circularly polarized microstrip antenna by fractal defected ground structure," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 65, no. 7, pp. 3721–3725, 2017, doi:10.1109/tap.2017.2700226.
- [25] O. P. Falade, M. U. Rehman, Y. Gao, X. Chen and C. G. Parini, "Single feed stacked patch circular polarized antenna for triple band GPS receivers," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 60, no. 10, pp. 4479–4484, 2012. doi:10.1109/tap.2012.2207354.
- [26] X. Tian and Z. Du, "Dual-Feed Shared-Radiator Metal-Frame Full-Screen Mobile Phone Antenna for GPS and LTE Bands With a Dual-Function Capacitor," in *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 71, no. 10, pp. 8314-8319, Oct. 2023, doi: 10.1109/TAP.2023.3294750.
- [27] R. Sadiq, M. B. Qureshi and M. M. Khan, "De-convolution and De-noising of SAR Based GPS Images Using Hybrid Particle Swarm Optimization," in *Chinese Journal of Electronics*, vol. 32, no. 1, pp. 166-176, January 2023, doi: 10.23919/cje.2021.00.138.
- [28] H. Zhang, H. Xiong, S. Hao, G. Yang, M. Wang and Q. Chen, "A Novel Multidimensional Hybrid Position Compensation Method for INS/GPS Integrated Navigation Systems During GPS Outages," in *IEEE Sensors Journal*, vol. 24, no. 1, pp. 962-974, 1 Jan.1, 2024, doi: 10.1109/JSEN.2023.3324019.
- [29] M. Pourbagher, Ch. Ghobadi, J. Nourinia and R. Naderali, "Wideband Circularly Polarized Antenna with Metallic Walls for L-Band Applications," *Circuit World*, vol. 48, no. 4, pp. 502-510, 2022. doi: 10.1108/CW-10-2020-0271.

COPYRIGHTS

©2024 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>



Vol. 13/ No. 52/Summer 2024

Research Article

Demand Side Management Based on Model Predictive Control in Microgrid in Grid Connected Mode

Masoud Bonyani, Ph.D Student¹  | Mohammad Mehdi Ghanbarian, Assistant Professor^{2*}  | Mohsen Simab, Assistant Professor³ 

¹Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, University of Marvdasht, Iran, masoudbonyani@miau.ac.ir

²Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, Islamic Azad University, Kazerun Branch, Kazerun, Iran, mm.ghanbarian@iau.ac.ir

³Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, Islamic Azad University, Marvdasht Branch, Marvdasht, Iran, mo.simab@iau.ac.ir

Correspondence

Mohammad Mehdi Ghanbarian, Assistant Professor of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, Islamic Azad University, Marvdasht Branch, Marvdasht, Iran, mm.ghanbarian@iau.ac.ir

Received: 21 August 2022

Revised: 15 January 2023

Accepted: 21 February 2023

Abstract

In this article, the control method of the economic predictive model for the use of the efficiency tariff of the photovoltaic backup system, diesel generator and microgrid, connected to the grid using the closed loop control system, the optimal open loop control, and also through the control and strengthening of the primary open loop has been. The main goal of this study is to minimize the power grid energy and fuel costs by evaluating the limits related to the level of fuel level in diesel fuel tanks. In addition to complying with the restrictions among the controllable variables, this control method also meets the load requirements. In order to obtain the benefits of feedback and predict the optimal power timing as a back-up energy system control problem, as well as the diesel generator connected to the microgrid, it is modeled based on the linear programming structure. Specifically, analysis is divided into two groups. The first case in the alternative model is when: outage occurs between 7 AM and 6 PM and the other in the grid energy state occurs when the grid is available for more than 24 hours. Energy performance shows, cost savings and income, in the control of daily economic forecasting model has improved. As long as, daily energy saving is up to 52%, while diesel energy is up to 85%. Optimum operation control can be well associated with uncertainty and disturbance in the result.

Keywords: Demand side management, Microgrid, Renewable energy resources, Model predictive control.

Highlights

- Using a photovoltaic backup system and a diesel generator connected to the microgrid.
- Assessment of limits to fuel level in diesel tanks.
- Predictive model control algorithm to determine optimal values of future control inputs in a closed loop system.
- Gray Wolf Optimization Algorithm by Investigating Smart Grid Complexity with Uncertainties Related to PHEV Charging Behavior.

Citation: M. Bonyani, MM. Ghanbarian, and M. Simab, "Demand Side Management Based on Model Predictive Control in Microgrid in Grid Connected Mode," Journal of Southern Communication Engineering, vol. 13, no. 52, pp. 81–103, 2024, doi:10.30495/jce.2023.1996352.1280, [in Persian].

مدیریت تقاضا در یک ریز شبکه متصل به شبکه با استفاده از کنترل مدل پیش‌بین

مسعود بنیانی^۱ | محمد مهدی قنبریان^{۲*} | محسن سیماب^۳ ID

چکیده:

در این مقاله، از روش کنترل مدل پیش‌بین اقتصادی برای کنترل و بهره‌برداری بهینه از تعرفه سیستم‌های فتوولتائیک، دیزل ژنراتور و ریز شبکه‌ها با دو شرایط جزیره‌ای و متصل به شبکه، استفاده شده است. به منظور داشتن عملکرد بهینه، از روش‌های کنترلی شامل سیستم کنترل حلقه بسته، کنترل بهینه حلقه باز و تقویت حلقه‌ی باز اولیه استفاده شده است. هدف اصلی این مقاله به حداقل رساندن انرژی شبکه‌ی برق و هزینه‌های سوخت از طریق ارزیابی محدودیت‌های مربوط به سطح تراز سوخت در مخازن سوخت دیزلی می‌باشد. در روش‌های کنترلی استفاده شده علاوه بر انطباق با محدودیت‌ها در بین متغیرهای قابل کنترل، الزامات بار نیز برآورده می‌شود. به منظور به دست آوردن مزایای بازخورد و پیش‌بینی، زمان‌بندی توان بهینه به عنوان یک مسئله کنترل سیستم انرژی پشتیبان و نیز دیزل ژنراتور متصل به ریز شبکه بر اساس ساختار برنامه‌ریزی خطی مدل‌سازی شده است. به طور خاص، تجزیه و تحلیل به دو گروه تقسیم می‌شود. اولین مورد در مدل جایگزین زمانی است که خاموشی بین ساعت ۷ صبح الی ۶ بعدازظهر اتفاق می‌افتد و دیگری در حالتی است که کل شبکه در ۲۴ ساعت در دسترس می‌باشد. بررسی وضعیت مصرف انرژی نشان می‌دهد، صرفه‌جویی در هزینه و بالا رفتن درآمد، با استفاده از روش پیشنهادی بهبود یافته است. به طوری که، صرفه‌جویی در مصرف انرژی روزانه می‌تواند تا ۵۲ درصد باشد. در حالی که مصرف انرژی دیزل تا ۸۵ درصد کاهش می‌یابد. کنترل عملیات بهینه می‌تواند به خوبی با عدم قطعیت و اختلال در نتیجه استفاده از روش‌های کنترلی ارائه شده، همراه باشد.

کلید واژه‌ها: ریز شبکه، کنترل مدل پیش‌بینی، مدیریت تقاضا، منابع انرژی تجدیدپذیر

^۱ دانشجوی دکتری مهندسی برق، دانشکده فنی مهندسی،

دانشگاه مرودشت، ایران،
masoudbonyani@miau.ac.ir

^۲ استادیار گروه برق، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد کازرون، کازرون، ایران،
mm.ghanbarian@iau.ac.ir

^۳ استادیار گروه برق، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد مرودشت، مرودشت، ایران،
mo.simab@iau.ac.ir

نویسنده مسئول

* محمد مهدی قنبریان، استادیار گروه برق، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد کازرون، کازرون، ایران،
mm.ghanbarian@iau.ac.ir

تاریخ دریافت: ۳۰ مرداد ۱۴۰۱

تاریخ بازنگری: ۲۵ دی ۱۴۰۱

تاریخ پذیرش: ۲ اسفند ۱۴۰۱

<https://doi.org/10.30495/jce.2023.1996352.1280>

۱-مقدمه

توسعه شبکه انتقال یکی از مهم‌ترین بخش‌های سیستم قدرت محسوب می‌شود که وظیفه آن تعیین پیکربندی بهینه برای شبکه بر اساس تقاضای بار در افق برنامه‌ریزی است [۲۶]. هدف از مسئله توزیع بار اقتصادی یافتن یک طرح مطلوب، برای خروجی نیروگاه‌ها به منظور تامین بار مصرفی در یک افق زمانی مشخص می‌باشد، به طوری که تضمین می‌کند طرح پیشنهاد شده تقاضای بار را در سطح قابل قبولی از قابلیت اطمینان برآورده خواهد کرد [۲۷]. نوسازی، صنعتی شدن و رشد جمعیت منجر به افزایش تقاضای استفاده از برق، در سراسر جهان شده است، لیکن افزایش انرژی به واسطه تولیدات فتوولتائیک، ظرفیت ذخیره‌سازی موجود و انعطاف‌پذیری بارها به عنوان منابعی برای یافتن برنامه‌ریزی بهینه حداقل و هزینه‌های عملیاتی استفاده می‌شود [۱]. شبکه‌های هوشمند به روشی پرکاربرد برای افزایش انعطاف‌پذیری و قابلیت اطمینان سیستم‌های قدرت به منظور رسیدگی به تقاضای رو به رشد برای برق به شیوه‌ای پایدار تبدیل شده‌اند، لذا در این مطالعه روش جدیدی برای

مدیریت جریان‌های برق یک سیستم قدرت در دو حالت جزیره‌ای و متصل به شبکه توسعه داده، پیشنهاد شده است. از ویژگی‌های روش مذکور اصلاح ضریب بار و مدیریت اوج مصرف شبکه برق می‌باشد به طوری که مدیریت بهینه‌ای در منابع انرژی‌های تجدیدپذیر و منابع ذخیره‌ساز انرژی نموده و از موتورهای دیزلی فقط در شرایط الزام استفاده می‌نماید. ریزشبه‌ها جزء اصلی‌ترین زیرساخت‌های شبکه هوشمند در نظر گرفته می‌شوند [۲]. ریزشبه‌ها که عموماً مربوط به سطح ولتاژهای توزیع می‌باشد از بارهای انعطاف‌پذیر، ژنراتورهای دیزلی، سیستم‌های ذخیره‌ساز و منابع انرژی تجدیدپذیر تشکیل شده است. به‌طور کلی، این سیستم‌ها می‌توانند به شبکه متصل شوند یا در حالت جزیره‌ای برای تأمین برق در خاموشی‌ها کار کنند. سیستم‌های فتوولتائیک متصل به شبکه به دلیل کاهش چشمگیر هزینه‌ها و مزایای پایداری و قابلیت اطمینان مرتبط، در ریزشبه‌ها به‌طور چشم‌گیری محبوب شده‌اند [۳]. فتوولتائیک‌ها اغلب با ذخایر باتری همراه می‌شوند تا با طبیعت پویای انرژی فتوولتائیک، تقاضای بار و خاموشی‌های برنامه‌ریزی نشده شبکه اصلی کنار بیایند [۴]. علاوه بر این، واحدهای ذخیره‌سازی (باتری) دارای معایب متعددی از جمله سرمایه اولیه زیاد و هزینه‌های تعویض بالا برای کاربردهای بزرگ مانند تأسیسات صنعتی و تجاری هستند.

در این راستا، فتوولتائیک-دیزل ژنراتورهای بدون باتری به طور چشم‌گیری مورد استفاده قرار می‌گیرند، زیرا یک روش مقرون به‌صرفه و کافی برای تأمین برق مداوم برای بارها هستند [۵]. در چارچوب‌های کنترل سلسله‌مراتبی، روش‌های کنترلی را می‌توان در ریزشبه‌ها برای بهبود قابلیت اطمینان، عملکرد و انعطاف‌پذیری استفاده کرد. روش‌های کنترل اولیه، ثانویه و سوم در اینجا گنجانده شده است تا یک مفهوم جدید برای ایجاد یکپارچه‌سازی در ریزشبه‌ها با شبکه صورت پذیرد [۶]. کنترل اولیه به پایداری فرکانس و ولتاژ می‌پردازد، در حالی که روش کنترل ثانویه انحرافات فرکانس و ولتاژ را کاهش می‌دهد و مقدار را در محدوده عملیاتی ریزشبه تنظیم می‌کند [۷]. در ریزشبه‌ها، طرح کنترل ثالث وظیفه رسیدگی به چالش‌های عملکرد و زمان‌بندی نیرو را دارد. در سطح سوم کنترل، زمان نمونه برداری می‌تواند تقریباً یک ساعت طول بکشد. بهینه‌سازی عملکرد ریزشبه گامی حیاتی در جهت اطمینان از منبع تغذیه قابل اعتماد و عملکرد مقرون به صرفه است. با وجود این، بهینه‌سازی ریزشبه‌ها هنوز یک مساله قابل بررسی است زیرا چندین عامل فنی و اقتصادی باید در نظر گرفته شوند [۸،۵]. موضوع بهینه‌سازی کنترل‌های عملیاتی ریزشبه‌ها توسط مطالعات متعدد از طریق روش‌های حلقه بسته و حلقه باز مورد توجه قرار گرفته است. طرح‌های حلقه باز هزینه کمتر، عملکرد پایدار و پیاده‌سازی آسان را ارائه می‌دهند و تنها قادر به مقابله با عدم قطعیت‌ها و اختلالاتی هستند که قبلاً شناخته شده و یا قابل پیش‌بینی باشند [۹]. برعکس، الگوریتم‌های حلقه بسته به دلیل مکانیسم بازخوردشان^۱ در برابر عدم قطعیت و اختلالات قوی‌تر هستند [۹،۴]. روش‌های کنترلی متعددی برای توسعه طرح‌های کنترلی بهینه برای ریزشبه‌ها مبتنی بر تکنیک حلقه بسته ارائه شده است. به عنوان مثال، مرجع [۱۰] در این چارچوب، ریزشبه‌ها را به‌عنوان سیستم‌های قدرت کارآمد برای بهره‌برداری از منابع انرژی تجدیدپذیر با برنامه مدیریت تقاضا در نظر گرفته است. ریزشبه‌هایی که می‌توانند انرژی خورشیدی را با هزینه کم مهار کنند، به گزینه‌ای جذاب برای کاهش هزینه برق تبدیل شده‌اند. بعضاً کنترل عملیات بهینه وسایل نقلیه بادی-فتوولتائی-باتری-الکتریکی متصل به ریزشبه را با استفاده از یک شبکه عصبی برای افزایش استفاده از انرژی تجدیدپذیر و کاهش توان حاصل از شبکه برق مورد بحث قرار می‌دهد. با وجود این، استراتژی کنترل نتوانست برنامه مدیریت سمت تقاضا را به‌عنوان ابزاری برای بهبود کارایی انرژی در نظر بگیرد [۱۱]. بنابراین از روش کنترل مدل پیش‌بین به‌منظور کاهش هزینه‌های عملیاتی برای ریزشبه‌های مسکونی متصل به شبکه در راستای مقررات‌زدایی از بازار برق و پیش‌بینی‌های نامشخص می‌توان استفاده کرد. در [۱۲] استراتژی‌های مدیریت عملیات بهینه برای کاهش تلفات و هزینه‌های عملیاتی در سیستم‌های فتوولتائیک-باتری و واحدهای حرارتی متصل به ریزشبه با استفاده از منطق فازی و بهینه‌سازی تطبیقی ازدحام ذرات ارائه شده است. در [۲۵] کنترل مد لغزشی مبتنی بر الگوریتم توده ذرات برای بهبود عملکرد مبدل‌های کنترل کننده یکپارچه کیفیت توان (UPQC) برای کنترل و بهبود کیفیت توان در ریزشبه‌ها از طریق کنترل توان خروجی منبع تولید پراکنده ارائه شده است. یکی از ویژگی‌های متمایز این مطالعه به حداقل رساندن هم‌زمان هزینه‌های انرژی شبکه و هزینه‌های استفاده از سوخت دیزل ژنراتورها با توجه به رابطه بین پارامترهای

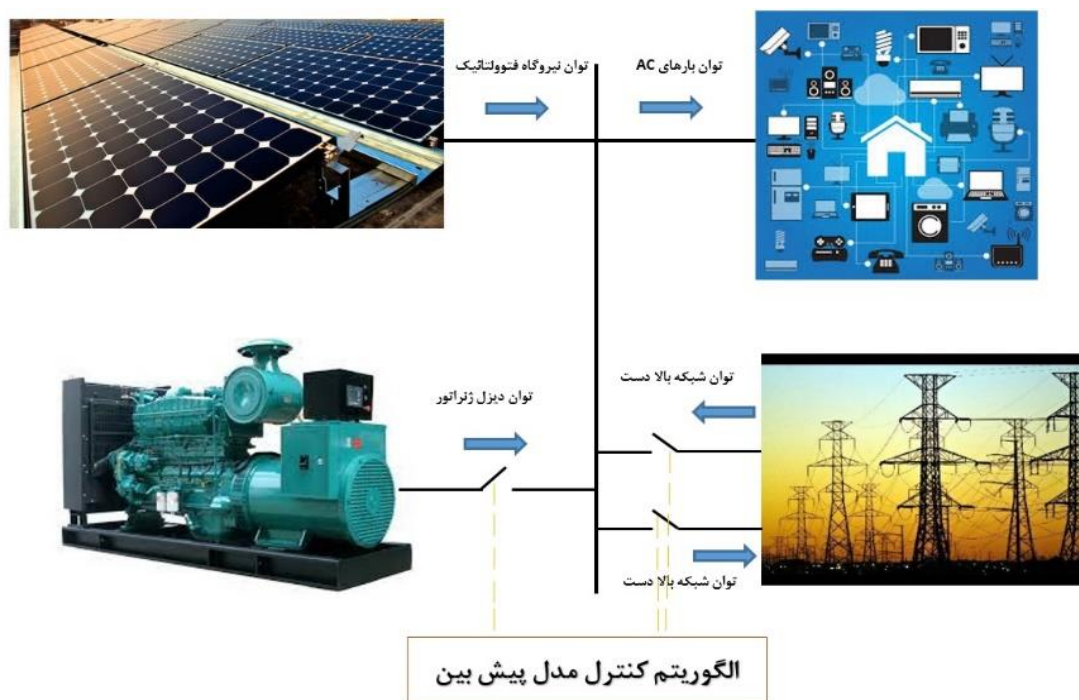
¹ Feedback

قابل کنترل و مقدار سوخت در مخزن دیزل ژنراتور در مدیریت سمت تقاضا است. با توجه به روش حلقه باز که در [۱۳] مورد بحث قرار گرفته است، استفاده از روش حلقه بسته آنلاین، منجر به بهبود در طرح کنترل بهینه است. از آنجا که در روش کنترل عملیات حلقه بسته، مقدار سوخت در مخزن دیزل ژنراتور برای ارائه بازخورد استفاده می‌شود نتیجه حاصل شده با عملیات حلقه باز متفاوت خواهد بود. در بررسی‌های انجام شده استدلال می‌شود که استراتژی‌های مدیریت بهینه‌سازی برای سیستم‌های فتوولتائیک و دیزل ژنراتور متصل به ریز شبکه به عنوان مشکلات کنترلی مدل‌سازی می‌شوند که از طریق روش کنترل مدل پیش‌بینی برای به دست آوردن مزایای بازخورد و پیش‌بینی در سطح سوم مورد بررسی قرار می‌گیرند. بسیاری از روش‌های کنترل مدل پیش‌بین به‌طور گسترده در سیستم‌های قدرت استفاده شده‌اند، زیرا دارای مزایای زیادی از جمله پیش‌بینی رفتار آینده سیستم‌ها، استحکام، پاسخ سریع و مدیریت ورودی‌ها و خروجی‌ها می‌باشند. [۱۴، ۱۵].

۲- الگوی ریاضی سیستم پشتیبان فتوولتائیک-دیزل ژنراتور متصل به ریز شبکه

۲-۱- طرح بندی شماتیک

شکل زیر سیستم ریز شبکه پیشنهادی متشکل از یک نیروگاه فتوولتائیک، یک دیزل ژنراتور معمولی و بارهای متناوب AC را نشان می‌دهد. زمانی که کمبود توان در شبکه به وجود می‌آید و توان تولیدی فتوولتائیک قادر به پاسخگویی تقاضای بار نباشد، یا قطعی برق رخ دهد، می‌توان از برق پشتیبان که توسط دیزل ژنراتورها تولید می‌شود استفاده کرد.



شکل ۱: ریز شبکه با دیزل و فتوولتائیک [۳]

Figure 1. Microgrid with diesel and photovoltaic [3]

۲-۲- انرژی شبکه

در مواردی که تولید فتوولتائیک کمتر از تقاضای برق باشد، شبکه اصلی، برق را تأمین می‌کند و در مواردی که تولید فتوولتائیک بیش از تقاضای برق باشد، شبکه اصلی برق را مصرف می‌کند. طبق مرجع [۱۳] می‌توان شبکه را به یک محدوده خاص محدود کرد.

$$-\infty \leq P_g(t) \leq +\infty \quad (1)$$

در اینجا توان شبکه در زمان t با $P_g(t)$ نشان داده می‌شود. هنگام در نظر گرفتن قطعی شبکه اصلی، توان واقعی موجود به صورت زیر بیان می‌شود،

$$P_g(t) = a_g(t)P_g(t) \quad (2)$$

در اینجا پارامتر در دسترس بودن شبکه در زمان t با $\alpha_g(t)$ نشان داده می‌شود. در مواردی که $\alpha_g(t)$ برابر ۱ باشد، شبکه برق در دسترس است، در حالی که اگر $\alpha_g(t)$ برابر با صفر باشد شبکه برق قطع است.

۳-۲- سیستم انرژی فتوولتائیک

یک آرایه منظم فتوولتائیک می‌تواند توان خروجی زیر را تولید کند،

$$P_{pv}(t) = \eta_{pv} A_{pv} I(t) \quad (3)$$

در اینجا عملکرد آرایه فتوولتائیک با η_{pv} ، فضای آرایه فتوولتائیک با A_{pv} و $I(t)$ برخورد تابش خورشیدی روی آرایه فتوولتائیک (کیلووات ساعت بر متر مربع) نشان داده می‌شود. تغییرات در تابش خورشید با ساعات روز رخ می‌دهد، به طوری که در [۱۴] داریم،

$$I(t) = R_B(I_B(t) + I_D(t)) + I_D(t) \quad (4)$$

در اینجا R_B ضریب هندسی می‌باشد که بیان‌گر نسبت برخورد تابش پرتو در صفحه، به تابش استاندارد در صفحه افقی است. تابش جهانی و پراکندگی ساعتی (کیلووات ساعت بر متر مربع) با $I_B(t)$ و $I_D(t)$ نشان داده می‌شود [۱۴]. بر اساس تابش ساعتی و دمای محیط، عملکرد فتوولتائیک را می‌توان به شرح زیر توصیف کرد [۱۵]،

$$\eta_{pv} = \eta_r \eta_{pc} (1 - \beta(T_c - NOCT)) \quad (5)$$

در رابطه فوق η_r عملکرد رتبه‌بندی سازنده ماژول شامل آرایه فتوولتائیک، η_{pc} عملکرد شرط توان، دمای سلول با T_c و ضریب دمای عملکرد ژنراتور با β نشان داده شده است. دمای طبیعی سلول که دارای مقدار معمولی ۴۵ درجه سانتی‌گراد است در محدوده ۰/۰۰۶ تا ۰/۰۰۴ درجه سانتی‌گراد است.

$$T_c = 30 + 0.0175(I(t) - 300) + 1.14(T_a - 25) \quad (6)$$

در رابطه ۶ تابش ساعتی خورشید با $I(t)$ و دمای محیط با T_a نشان داده شده است.

۴-۲- ژنراتور دیزلی

بر اساس مرجع [۱۵]، دیزل ژنراتورها همراه با پارامترهایشان مدل‌سازی می‌شوند، توان تولید شده توسط ژنراتورهای دیزلی به صورت زیر بیان می‌شود،

$$F_{dg}(l) = \begin{cases} F_c(aP_{dg}(l) + b_d P_{ndg}) & \text{if } P_{dg}(l) > 0 \\ 0 & \text{if } P_{dg}(l) = 0 \end{cases} \quad (7)$$

در اینجا قدرت اسمی دیزل ژنراتور با P_{ndg} ، قیمت سوخت ($\$/L$) با F_c و ضرایب تابع هزینه سوخت دیزل ژنراتور با a و b_d نشان داده می‌شوند [۱۶]. موارد ذکر شده توسط اطلاعات سازنده دیزل ژنراتور جمع‌آوری شده است. در این مقاله، از ضرایب ذکر شده استفاده می‌شود: $a = 0.246 \text{ L.kwh}$ و $b_d = 0.08145 \text{ L.kwh}$ [۱۶].

بر اساس [۱۷]، توان اسمی تولید شده از طریق دیزل ژنراتور را می‌توان برای تخمین توان تولیدی P_{dg} به صورت زیر محاسبه کرد.

$$P_{dg} = P_{ndg} \times N_{dg} \times \eta_{dg} \quad (8)$$

در اینجا تعداد دیزل ژنراتورها با N_{dg} و عملکرد دیزل ژنراتور با η_{dg} نشان داده شده است. در نتیجه، از رابطه ۷ می‌توان به صورت زیر نوشت،

$$F_{dg}(l) = F_c(aP_{dg}(l) + \frac{b_d P_{dg}(l)}{N_{dg} \eta_{dg}}) \quad (9)$$

با فرض τ_{dg} برابر،

$$\tau_{dg} = \frac{b_d}{N_{dg} \eta_{dg}} \quad (10)$$

هزینه مصرف سوخت را می‌توان با توجه به رابطه ۱۱ محاسبه کرد،

$$F_{dg}(l) = F_c(a + \tau_{dg})P_{dg}(l) \quad (11)$$

۲-۴-۱- ظرفیت مخزن سوخت

در حوزه زمان گسسته، دینامیک حجم سوخت را می‌توان به این صورت محاسبه کرد،

$$V(l+1) = V(l) - t_s(aP_{dg}(l) + \tau_{dg}P_{dg}(l))10^{-3} \quad (12)$$

در اینجا، زمان نمونه‌برداری با t_s و حجم سوخت داخل مخزن دیزل ژنراتور در زمان l با $V(l)$ نشان داده می‌شود. اگر مخزن سوخت به طور کامل خالی شود، هوا وارد پمپ تزریق سوخت می‌شود و منجر به آسیب پمپ و انژکتور می‌شود. در این شرایط، ابعاد مخزن میزان سوخت را به صورت زیر تعیین می‌کند،

$$V_{\min} \leq V(l) \leq V_{\max} \quad (13)$$

جایی که حداکثر و حداقل حجم مجاز سوخت در مخزن به ترتیب با $V_{\max}$ و $V_{\min}$ نشان داده شده است. شکل مخزن مکعبی در نظر گرفته شده و حداکثر حجم آن به صورت زیر نمایش داده شده است،

$$V_{\max} = L \times k \times h \quad (14)$$

دانشگاه کشاورزی و فناوری جومو کنیاتا^۱ که متعهد به تولید متخصصان ماهر است که می‌توانند به توسعه کنیا و فراتر از آن کمک کنند. این دانشگاه با هدف تجهیز دانش‌آموزان به مهارت‌های لازم برای مقابله با چالش‌های دنیای واقعی، تأکید زیادی بر آموزش عملی و کارآفرینی دارد.

در اینجا به ترتیب طول، عرض و ارتفاع مخزن سوخت دیزل با L ، k و h نشان داده می‌شود که سطح مقطع A_t را می‌توان به صورت زیر محاسبه کرد،

$$A_t = L \times k \quad (15)$$

با در نظر گرفتن جنبه بازخورد، رابطه ۱۶ به عنوان ارتفاع سوخت در مخزن سوخت دیزل مدل شده است،

$$h(l+1) = h(l) - \frac{1}{A_t} t_s (aP_{dg}(l) + \tau_{dg}P_{dg}(l))10^{-3} \quad (16)$$

در اینجا، ارتفاع سوخت در مخزن سوخت دیزل در زمان نمونه‌برداری l با $h(l)$ نشان داده می‌شود و τ_{dg} یک متغیر ثابت از دیزل ژنراتور را نشان می‌دهد که مربوط به بخش دوم رابطه ۷ نسبت به توان خروجی دیزل ژنراتور است. سنسور سطح، یک راه مقرون به صرفه و آسان برای اندازه‌گیری حجم مخزن است. رابطه ۱۷ به صورت زیر بیان شده است،

$$h(l+1) = h(0) - \frac{1}{A_t} t_s (a + \tau_{dg})10^{-3} \sum_{j=1}^l P_{dg}(j) \quad (17)$$

سطح سوخت در باک باید به صورت زیر محدود شود،

$$h_{\min} \leq h(l) \leq h_{\max} \quad (18)$$

۲-۵- روش مدیریت سمت تقاضا

در ساختار مدیریت سمت تقاضا، کنترل بهینه روی خط حلقه بسته سیستم فتوولتائیک-دیزل ژنراتور سعی می‌کند هزینه‌های عملیات را به حداقل برساند [۱۸]. با توجه به مرجع [۱۹]، قیمت برق روزانه که در سالیان انتخابی برای کاربران تجاری و صنعتی استفاده می‌شود به صورت زیر محاسبه می‌شود،

$$\rho(t) = \begin{cases} \rho_{off} = 0.06\$, & t \in 00:00hrs - 06:00hrs \text{ and } 22:00hrs - 00:00hrs \\ \rho_{peak} = 0.12\$, & t \in 06:00hrs - 22:00hrs \end{cases} \quad (19)$$

در اینجا، دوره اوج قیمت با P_{peak} و دوره قیمت خارج از اوج با P_{off} نشان داده شده است.

۳- مشکل بهینه‌سازی

۳-۱- تابع هدف

این مقاله مسئله بهینه‌سازی محدود را بر اساس مفاهیم کنترل مدرن پیشنهاد می‌کند. کنترل عملیات بهینه به طور هم‌زمان توان خریداری شده از شبکه اصلی برق و همچنین هزینه‌های مصرف سوخت دیزل ژنراتور را به حداقل می‌رساند. بنابراین، تابع هدف در هر زمان نمونه‌گیری k خواهد بود،

$$\min F = \min(\omega t_s \sum_{j=1}^{l+N_c-1} \rho(j) P_g(j/l) + (1-\omega) F_c T_s (a + \tau_{dg}) \sum_{j=1}^{l+N_c-1} P_{dg}(j/l)) \quad (20)$$

هزینه انرژی با $\rho(t)$ ، هزینه سوخت با F_c ، توان شبکه و توان دیزل ژنراتور با $P_{dg}(j/l)$ و $P_g(j/l)$ نشان داده می‌شود، در بازه نمونه‌برداری λ ام بر اساس اندازه‌گیری در لحظه k . علاوه بر این، افق کنترل با N_c ، ضریب وزنی با ω و t_s زمان نمونه‌برداری را نشان می‌دهد. مجموع کل فاکتورهای وزنی باید یک در نظر گرفته شود. تابع هدف نشان داده شده در رابطه ۲۰، در قسمت اول، توان خریداری شده از شبکه و سپس در قسمت دوم مصرف سوخت دیزل ژنراتور را کاهش می‌دهد.

۳-۲- محدودیت‌ها

سیستم انرژی پشتیبان فتوولتائیک - دیزل ژنراتور متصل به ریزشبکه پیشنهادی به عنوان یک مسئله بهینه‌سازی چند معیاره برنامه‌ریزی خطی محدود نشان داده شده است. محدودیت‌های عملیاتی و فنی از نظر ریاضی بر کل سیستم تأثیر می‌گذارد. در نتیجه افق زمانی پیش‌بینی، تقاضای بار و تعادل عرضه برق ریزشبکه به شرح زیر خواهد بود،

$$P_L(j) = P_g(j/l) + P_{pv}(j) + P_{dg}(j/l), j = l, \dots, l + N_c - 1 \quad (21)$$

در اینجا، توان پیش‌بینی شده شبکه و توان دیزل ژنراتور با $P_g(j/l)$ ، در بازه نمونه‌برداری λ ام بر اساس داده‌های محاسبه شده در لحظه l نشان داده می‌شوند، در حالی که $P_{pv}(j)$ نشان‌دهنده برق فتوولتائیک است. محدودیت‌های توان خروجی دیزل ژنراتورها محدود می‌باشد به طوری که،

$$0 \leq P_{dg}(j/l) \leq P_{ndg} \quad (22)$$

بار شبکه به روش‌های زیر محدود می‌شود،

$$-\infty \leq P_g(j/l) \leq +\infty \quad (23)$$

۳-۳- الگوریتم کنترل مدل پیش‌بین

در یک سیستم کنترل مدل پیش‌بین حلقه بسته، بهینه بودن و محدودیت‌های سیستم به صراحت در یک افق کنترل محدود مدیریت می‌شوند. یک روش کنترل مؤثر برای مسائل بهینه‌سازی آنلاین، روش کنترل مدل پیش‌بین است [۲۰]. که می‌تواند رویدادهای آینده را پیش‌بینی کند، اقدامات کنترلی مناسب را انجام دهد و پیش‌بینی کند که چگونه متغیرهای مستقل بر متغیرهای وابسته تأثیر می‌گذارند. علاوه بر این، رویدادهای آینده بر اساس اندازه‌گیری‌های فعلی کارخانه، وضعیت پویا و متغیر هدف فرآیند محاسبه می‌شوند. یک تابع هزینه از پیش تعیین شده برای تعیین مقادیر بهینه ورودی‌های کنترل آتی استفاده می‌شود. طبق قسمت ۲، محدودیت‌های سیستم بر اساس محدودیت‌های عملی آن تعریف شده و به صورت فشرده شرح داده شده است. تقاضای توان روزانه و خروجی فتوولتائیک به منظور طراحی کنترل بهینه با توجه به کنترل مدل پیش‌بین، پیش‌بینی شده است. با این حال، توان فتوولتائیک ساعتی و توان تقاضا گاهی اوقات از مقادیر پیش‌بینی شده در ریزشبکه فاصله می‌گیرد. برای هر دو توان فتوولتائیک و تقاضا، این انحرافات به عنوان اختلال در نظر گرفته می‌شود.

به عنوان یک نتیجه از پرداختن به کنترل عملیات بهینه، یک کنترل فضای حالت خطی توسط سیستم پشتیبان فتوولتائیک- دیزل ژنراتور متصل به ریزشبکه ارائه شده و مانند طرح حلقه باز، بردار کنترل X شامل یک متغیر کنترلی می‌باشد که به صورت زیر نمایش داده می‌شود،

$$X(l) = [P_g(l/l \dots P_g(l + N_c - 1/l), P_{dg}(l/l \dots P_{dg}(l + N_c - 1/l)] \quad (24)$$

زمان l توسط کنترل کننده تعیین و افق کنترل N_c توسط آن محاسبه می شود. سپس، مسئله بهینه سازی حلقه باز با افق عملیاتی N_c به منظور دستیابی به یک راه حل بهینه حل می شود، که در آن فقط بخش t ام از پارامترهای کنترلی P_g و P_{dg} در ریز شبکه گنجانده شده اند. سیستم های فتوولتائیک - دیزل ژنراتور متصل به ریز شبکه به عنوان سیستم های چند ورودی چند خروجی مدل سازی می شوند. کنترل N_c و پیش بینی افق N_p در موضوع بهینه سازی کنترل مدل پیش بین گنجانده شده است. بنابراین، افق کنترل به صورت زیر تعریف می شود،

$$N_c = N - l + 1 \quad (25)$$

در اینجا تعداد کل نمونه ها در افق عملیاتی ۲۴ ساعته توسط N نشان داده شده است. مسئله بهینه سازی با روش کنترل مدل پیش بین به صورت زیر حل می شود [۲۱]:

ا- از رابطه ۲۵ برای محاسبه افق کنترل $N_c(l)$ برای هر زمان نمونه برداری l استفاده کنید.

ب- جواب بهینه را برای افق کنترل محاسبه کنید.

a. تابع هزینه را کاهش دهید (به رابطه ۲۰ مراجعه کنید)؛

b. مطابق با محدودیت؛

ج- t ام کنترل سوئیچینگ برای سیستم انرژی ریز شبکه $[p_g=(l/l), p_{dg}(1/l)]$ را از راه حل بهینه اجرا کنید.

د- پارامتر حالتی را که میزان سوخت را در مخزن سوخت دیزل نشان می دهد محاسبه کنید.

ه- حالت های سیستم، ورودی ها و خروجی ها را با تنظیم $l=l+1$ به روز کنید.

و- به تکرار مراحل ۱ تا ۵ ادامه دهید تا l به یک مقدار از پیش تعیین شده دست یابد.

۳-۴- فرمول بندی ریاضی

بر اساس شکل متعارف شرح داده شده در [۲۲]، تابع هدف و محدودیت ها به صورت زیر به دست می آیند،

$$\begin{cases} f^T X \\ A_{eq} X = b_{eq} \\ AX \leq b \\ L_b \leq X \leq U_b \end{cases} \quad (26)$$

در رابطه ۲۶ عبارت $f^T X$ تابع هدف خطی است که باید به حداقل برسد و بردار X شامل پارامترهای کنترل کل در موضوع بهینه سازی است. ضرایب A_{eq} و b_{eq} مربوط به محدودیت های برابری هستند، در حالی که L_b و U_b مرزهای بالایی و پایینی پارامترها را نشان می دهند. با توجه به رابطه ۲۰، $f^T X$ را می توان به صورت زیر نوشت،

$$f^T = [\omega t_s \rho(j) \dots \omega t_s \rho(N), (1-\omega) t_s (a + \tau_{dg}) F_C(j) \dots (1-\omega) t_s (a + \tau_{dg}) F_C(N)]_{1 \times 2N_c} \quad (27)$$

بردار X شامل کل متغیرهای قابل کنترل و ارائه شده توسط،

$$X = [P_g(j) \dots P_g(N), P_{dg}(j) \dots P_{dg}(N)]_{1 \times 2N_c} \quad (28)$$

با توجه به محدودیت برابری موازنه توان در رابطه ۲۱، ماتریس A_{eq} به صورت زیر بازیابی می شود،

$$A_{eq} = \left[\begin{array}{cccc|cccc|} 1 & 0 & \dots & 0 & 1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 1 & \dots & 0 & 0 & 1 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & 1 & 0 & 0 & \dots & 1 \end{array} \right]_{N_c \times 2N_c} \quad (29)$$

بردار b_{eq} را می توان به صورت زیر نوشت،

$$b_{eq} = [P_L(j) \dots P_L(N)]_{1+N_c}^T - [P_{pv}(j) \dots P_{pv}(N)]_{1+N_c}^T \quad (30)$$

از رابطه ۱۸ می توان برای استخراج محدودیت های نابرابری نیز استفاده کرد،

$$\begin{cases} h_{\min} \leq h(l) \Rightarrow -h(l) \leq -h_{\min} \\ h(l) \leq h_{\max} \end{cases} \quad (31)$$

با توجه به رابطه ۳۱، محدودیت های نابرابری به صورت زیر تبدیل می شود،

$$\begin{cases} A_1 X \leq b_1 \\ A_2 X \leq b_2 \end{cases} \quad (32)$$

$$A_1 = \frac{t_s(a + \tau_{dg})10^{-3}}{A_i} \begin{bmatrix} 0 & 0 & \dots & 0 & | & 1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & \dots & 0 & | & 1 & 1 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & | & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & 0 & | & 1 & 1 & \dots & 1 \end{bmatrix}_{N_C \times 2N_C} \quad (33)$$

$$A_2 = -\frac{t_s(a + \tau_{dg})10^{-3}}{A_i} \begin{bmatrix} 0 & 0 & \dots & 0 & | & 1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & \dots & 0 & | & 1 & 1 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & | & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & 0 & | & 1 & 1 & \dots & 1 \end{bmatrix}_{N_C \times 2N_C} \quad (34)$$

$$b_1 = [h(o) - h_{\min} \dots h(o) - h_{\min}]_{1 \times N_C}^T \quad (35)$$

$$b_2 = [h(o) - h_{\min} \dots h(o) - h_{\min}]_{1 \times N_C}^T \quad (36)$$

نابرابری خطی در شکل متعارف در رابطه ۲۶ به صورت زیر توضیح داده شده است،

$$\begin{bmatrix} A_1 \\ A_2 \end{bmatrix} X \leq \begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \end{bmatrix} \quad (37)$$

متغیرهای کنترل به محدوده‌ای از حد پایین L_b و بالا U_b محدود می‌شوند. در غیاب نیروگاه‌های خورشیدی، حد پایینی شبکه برق صفر است تا از فروش برق دیزل ژنراتور به شرکت برق جلوگیری شود.

با این وجود، در مورد یک نیروگاه فتوولتائیک، حد پایینی $-\infty$ است تا بتوان مازاد فتوولتائیک را بتوان به سیستم اصلی فروخت. این وضعیت در طرح کنترل مدل پیش‌بین اقتصادی از طریق حلقه if-else قابل انجام است. حدهای بالایی U_b و پایینی L_b به صورت زیر توصیف می‌شوند،

$$L_b = [0 \dots 0_{N_C}, 0 \dots 0_{N_C}]_{1 \times 2N_C}^T \quad (38)$$

$$L_b = [-\infty \dots -\infty_{N_C}, 0 \dots 0_{N_C}]_{1 \times 2N_C}^T \quad (39)$$

$$U_b = [+ \infty \dots + \infty_{N_C}, P_{ndg} \dots P_{ndg, N_C}]_{1 \times 2N_C}^T \quad (40)$$

۳-۵- الگوریتم بهینه‌سازی گرگ خاکستری (GWO)

پیچیدگی شبکه با عدم قطعیت‌های مربوط به رفتار شارژ خودروی برقی هیبریدی^۲ (PHEV)، تقاضای شبکه و قیمت انرژی در نظر گرفته می‌شود، در اینجا پیکربندی مجدد فیدر توزیع به اختصار^۳ (DFR) پیشنهادی طیف وسیعی با موضوع برنامه‌نویسی اعداد صحیح غیرخطی، تصادفی و غیر محدب را گزارش می‌کند که به روش‌های بهینه‌سازی تخصصی برای کشف بهترین راه حل جهانی نیاز دارد. پس از آن، GWO برای حل DFR تصادفی تعریف شده انجام شد.

یک الگوریتم فرا ابتکاری که GWO^۴ نامیده می‌شود در سال ۲۰۱۴ توسط میرجلیلی و همکاران در [۲۳] ارائه شده است که رفتارهای اجتماعی گرگ‌های خاکستری را تقلید می‌کند. گرگ‌ها در گله‌ای شامل ۵ تا ۱۲ عضو زندگی می‌کنند. گله دارای یک سلسله مراتب منظم است که گروه شامل یک رهبر و دسته دوم است که به ترتیب آلفا و بتا نامیده می‌شوند. α و β در تصمیم‌گیری کمک می‌کند و گرگ‌های باقی مانده در گله همان‌طور که در شکل ۲ مشاهده می‌شود، δ و ω نامیده می‌شوند. روند شکار طعمه از طریق گروه گرگ خاکستری به شرح زیر است:

(۱) جستجوی طعمه،

(۲) محاصره طعمه،

(۳) شکار طعمه یا غذا،

^۱ Grey Wolf Optimization Algorithm

^۲ Plug-in Hybrid Electric Vehicle

^۳ Distribution Feeder Reconfiguration

^۴ Grey Wolf Optimization

(۴) حمله به طعمه،

الگوی حسابی طعمه اطراف به صورت زیر تعریف می‌شود،

$$\vec{D} = |\vec{C}_i \cdot \vec{X}_{pi} - \vec{X}_i| \quad (41)$$

$$X_{i+1} = \vec{X}_{pi} - \vec{A} \cdot \vec{D} \quad (42)$$

که X_{pi} و X_i به ترتیب محل گرگ خاکستری و محل شکار هستند. D فضا را تعریف می‌کند، A و C بردارهایی را تعریف می‌کنند که به صورت زیر محاسبه می‌شوند،

$$\vec{a} = 2(1 - t / \text{Max_iteration}) \quad (43)$$

$$\vec{A} = 2\vec{a} \cdot \vec{b}_1 - \vec{a} \quad (44)$$

$$\vec{C} = 2 \cdot \vec{b}_2 \quad (45)$$

جایی که b_1 و b_2 به طور تصادفی بازیابی می‌شوند و مقادیر بین ۰ و ۱ هستند، پارامتر α یک متغیر است. در حالی که تکرارها اضافه می‌شوند، α از ۲ به ۰، به صورت خطی کاهش می‌یابد.

روند جستجو برای کشف طعمه را می‌توان از طریق واگرایی اعضای کاوشگر به دست آورد، زمانی که $|A| > 1$ باشد. روند به دست آوردن طعمه را می‌توان از طریق همگرایی اعضای کاوشگر به دست آورد، زمانی که $|A| < 1$ تعقیب و گریز از طریق گرگ α با پشتیبان گیری از اعضای β و δ مانند رابطه ۴۶-۴۸ مدیریت و هدایت می‌شوند. مشابه یک الگوریتم فرا ابتکاری دیگر، روش GWO ممکن است در یک حداقل محلی، با توجه به پارامترهای A و C تمایل داشته باشد که به روش GWO برای عبور از رکود کمک کند.

$$\vec{D}_\alpha = |\vec{C}_1 \cdot \vec{X}_{\mu i} - \vec{X}_i|, \vec{D}_\beta = |\vec{C}_2 \cdot \vec{X}_{\beta i} - \vec{X}_i|, \vec{D}_\delta = |\vec{C}_3 \cdot \vec{X}_{\delta i} - \vec{X}_i| \quad (46)$$

$$\vec{X}_1 = \vec{X}_{\mu i} - \vec{A}_1 \cdot \vec{D}_\mu, \vec{X}_2 = \vec{X}_{\beta i} - \vec{A}_2 \cdot \vec{D}_\beta, \vec{X}_3 = \vec{X}_{\delta i} - \vec{A}_3 \cdot \vec{D}_\delta \quad (47)$$

$$\vec{X}_{i+1} = (\vec{X}_1 + \vec{X}_2 + \vec{X}_3) / 3 \quad (48)$$

۳-۵-۱- بیان دستگاه ابر- مه برای مدیریت انرژی

مدیریت انرژی بهینه شبکه‌های هوشمند با توجه به نفوذ بالای PHEV ها نیاز به مبادله داده ها بین چند عامل دارد. در این شرایط، یک دیزل ژنراتور باید به عنوان عامل اصلی بررسی شود تا روش همگرایی و مناسبی داشته باشد. برای این منظور، راه مجازی سازی همسایگی پیشنهاد شده است که با توجه به ساخت روش ابر-مه مرجع [۲۴] مناسب است. به این ترتیب، عامل یا واحد تنها قادر به تبادل (ارسال و دریافت) اطلاعات خود با محله‌های مجازی خود به جای واحد واقعی است که در همسایگی خود می باشد.

واحد مجازی سازی یک توپولوژی مجازی برای عاملی می باشد که یک سرویس در لایه مه است. این واحد اطلاعات مورد نیاز را از کل واحدها دریافت می کند و اطلاعات و داده‌های هر واحد را در هر بازه زمانی به محله‌های مجازی خود ارسال می کند. از این رو، واحدها بدون شناسایی فرستنده و تامین کننده اصلی، داده یا اطلاعاتی دریافت می کنند. ساختار پیشنهادی باید دارای شرایط زیر باشد:

(۱) نظارت بلادرنگ سیستم برای به دست آوردن دیزل ژنراتورها، PHEVs و وضعیت تخمین بار

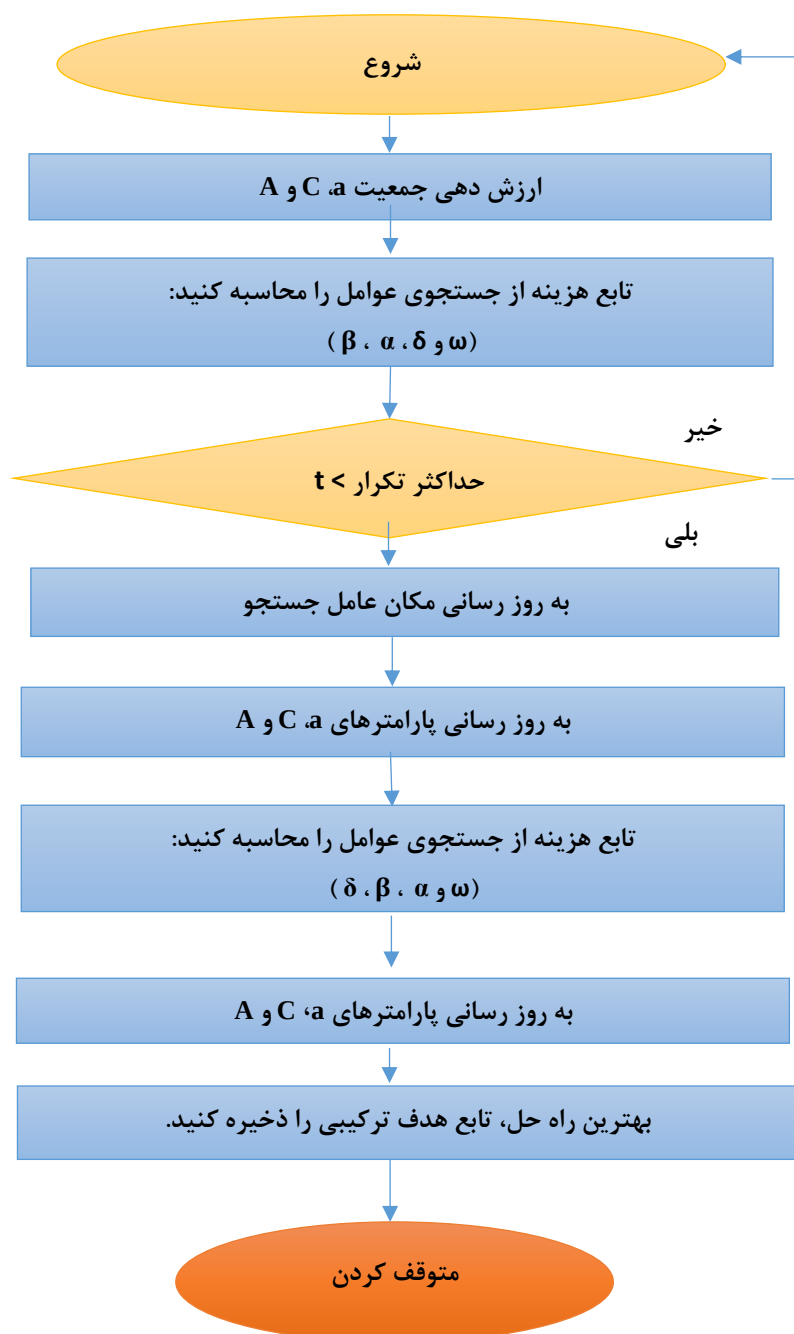
(۲) مناسب با مساحت بزرگ شبکه‌های هوشمند

(۳) فراهم کردن فضایی برای تبادل داده‌های بلادرنگ بدون همبستگی مستقیم

(۴) تعیین توپولوژی شبکه و اصلی برای همگرایی به یک راه حل بهینه. برای این منظور، ساختار ابر-مه چند لایه سابقاً توسعه یافته ادامه دارد.

الف) لایه دستگاه: بخش‌های فیزیکی شبکه‌های هوشمند، به عنوان مثال، حسگرها، تجهیزات اندازه‌گیری، PHEV و سیستم‌های ذخیره انرژی در لایه دستگاه کار می‌کنند. این قطعات بر اساس داده‌ها و اطلاعات به دست آمده در لایه مه عملیاتی می‌شوند و همچنین اطلاعات با محله‌های مجازی مبادله می‌شوند. در این لایه، توان خروجی به روز شده با توجه به

ضرایب به دست آمده از لایه مه، که به داده‌های همسایگی مجازی و ضریب همگرایی برای مدل اصلی تعلق دارند، به دست می‌آید. فرآیند به روز می‌شود و سپس واحدها داده‌های مورد نیاز را به لایه مه منتقل می‌کنند.



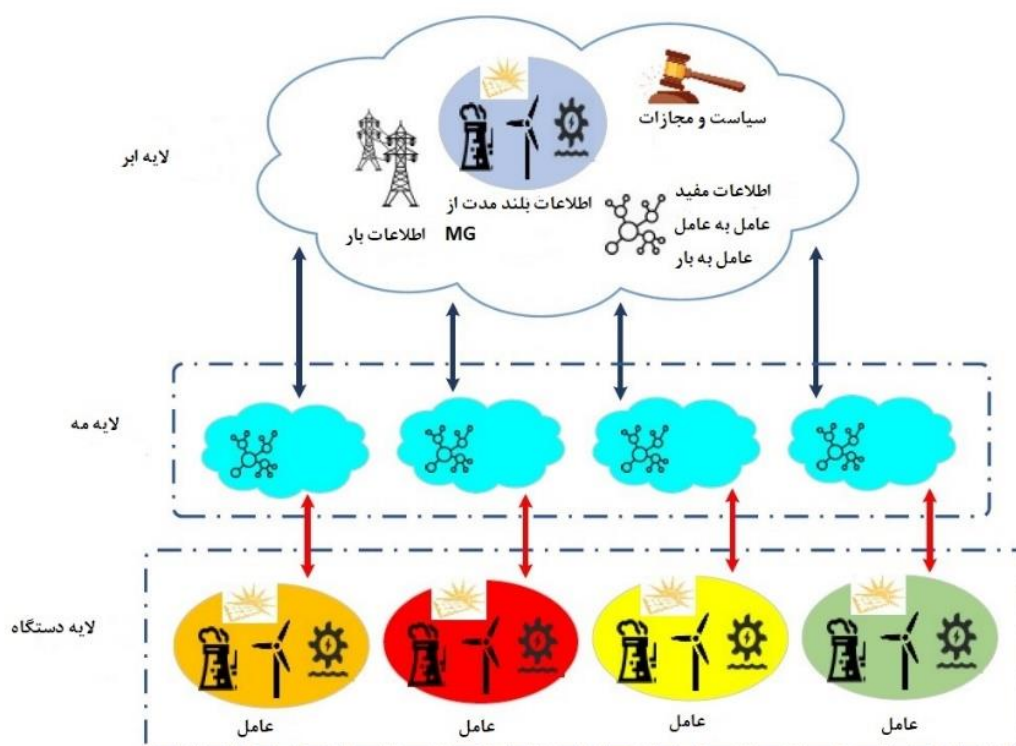
شکل ۲: نمودار گردش الگوریتم گرگ خاکستری
Figure2. Flow diagram of the gray wolf algorithm

ب) لایه مه: این بخش شامل دستگاه‌های شبکه با قابلیت اندازه‌گیری داده‌های توزیع شده است و سرورهای محلی این داده‌ها را دریافت می‌کنند. مسئولیت اصلی این لایه، گسترش محاسبات ابری در نزدیکی تجهیزات است تا تجزیه به موقع و همچنین ثبت داده‌های کوتاه‌مدت را انجام دهد. هر حالت آنی عامل و شرایط حضور عوامل شبکه هوشمند در هر مرحله بررسی می‌شود. اطلاعات شبکه هوشمند در لایه مه جمع‌آوری و سپس در هر مرحله یک مدل اصلی تصادفی انتخاب می‌شود. در پردازش فشرده، جمع‌آوری کل داده در یک ایستگاه برای تجزیه کل شبکه ضروری است. با این وجود، در محاسبات ابری مه، مدت

زمان محاسبه حذف می‌شود زیرا نیازی به تجزیه اطلاعات و داده‌ها در یک گره اصلی وجود ندارد. در واقع، لایه مه مانند یک لایه توزیع شده در محاسبات ابری-مه‌آلود عمل می‌کند که قادر است کل ارسال داده‌ها را به روشی توزیع شده انجام دهد. شکل شماره ۳ سیستمی با نمای ابر-مه نشان می‌دهد. با توجه به اینکه مه تا ابرها از زمین دورتر است، ضمن اینکه نمای ابر-مه برگرفته از طبیعت نیز است. با این استدلال ابر-مه، لایه مه یک لایه پایین لایه ابر است و وظیفه دارد مجموعه اطلاعات توزیع شده را از طریق منطقه وسیع شبکه هوشمند اجرا کند. از این رو، نقص اصلی محاسبات ابری که ناشی از ساخت و ساز فشرده آن بوده، از بین می‌رود.

پ) لایه ابری: این لایه شامل فضای ذخیره‌سازی گسترده با محاسبات کافی است. لایه مه خلاصه‌ای از داده‌ها را به ابر ارسال می‌کند و این داده‌های کوتاه برای مدت طولانی توسط ابر ذخیره می‌شوند. ارتباطات بین لایه‌های مه، اجرای مجازات برای عوامل مخرب، تنظیم سیاست‌ها و ارتباط بین لایه‌های مه و سیستم توسط لایه ابری تنظیم می‌شود. ارتباطات بین لایه‌های مه، اجرای مجازات برای عوامل مخرب، تنظیم سیاست‌ها و ارتباط بین لایه‌های مه و سیستم توسط لایه ابری تنظیم می‌شود. توضیحات اضافی با جزئیات در مورد لایه مه در مرجع [۲۵] تعریف و معرفی شده است. الگوریتم ۱ شکل ۴ راه حل مسئله پیشنهادی را نشان می‌دهد.

با نگاه کردن به پشت سر، مدیریت بهینه انرژی می‌تواند بازار را به دوره‌ای با هزینه مورد انتظار بررسی و عدم قطعیت‌های مربوط به PHEV، قیمت انرژی، بارها و عدم قطعیت‌های تقاضای شبکه سوق دهد. بنابراین، مکانیسم پیشنهادی به حل مشکل تحت استراتژی‌های مختلف شارژ برای PHEV در شبکه هوشمند بستگی دارد. این کمک می‌کند تا شارژ ناهماهنگ PHEV با دوره اوج شبکه همزمان شده و منجر به هزینه‌های بیشتر در هر دوره زمانی شود. شارژ مدیریت بهینه انرژی به واحدهای مه تعلق می‌گیرد که هر واحد وظیفه تضمین شارژ هوشمند را به عهده خواهد داشت. برای به دست آوردن بهترین مدیریت بهینه انرژی، فرض بر این است که عوامل همه با هم همکاری کنند. شکل ۴ روند حل مسئله پیشنهادی را نشان می‌دهد.



شکل ۳: ساختار چند لایه از دستگاه ابر - مه برای شبکه های هوشمند

Figure3. Multi-layer structure of cloud-fog device for smart grids

Algorithm 1: Solution Process

Data Definition: Define networked smart grid data like branch data, bus Data, etc.

for $\tau = 1$:Horizon **do**

receive and store the data of each individual agent on its corresponding fog

run the optimal scheduling problem in the cloud layer based on the information provided by fogs

check all network constraints.

Update the the information of each agent on the fog layer.

if objective function is nonzero **then**

1. get the information from the corresponding fog

2. charging state of PHEVs in the fog layer and send it out to the Cloud layer

3. run the objective function in the cloud layer.

4. check all network constraints

if constraints are met **then**

Determine topology charging of PHEVs and total operation cost.

else

go to step 1.

end

end

Print the topology charging of PHEVs and total operation cost.

Update the fogs.

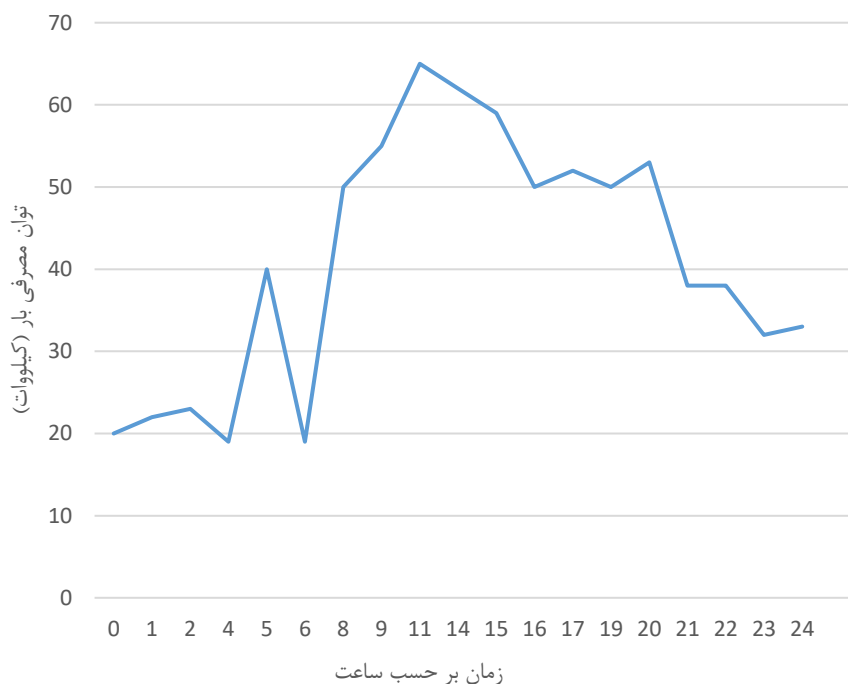
End

شکل ۴: فرآیند حل

Figure4. Solution Process

۴- مطالعه موردی

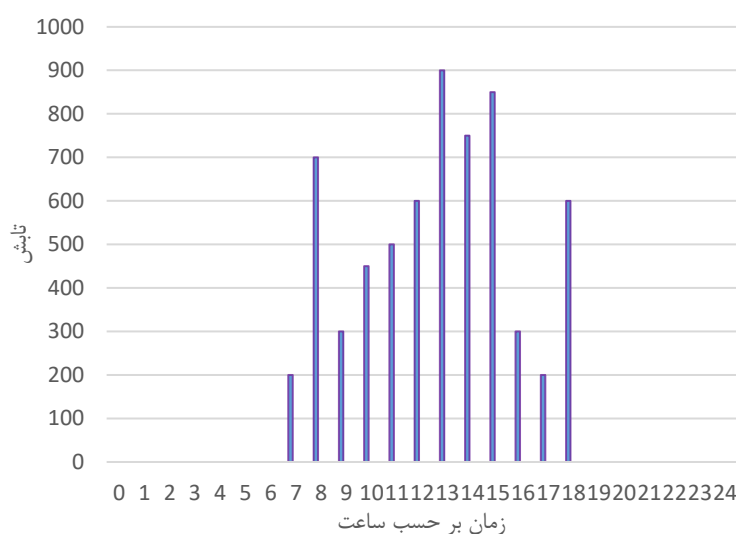
این مقاله یک مطالعه موردی واقعی را برای اثبات کارایی روش کنترل مدل پیش‌بینی اقتصادی پیشنهادی سیستم پشتیبان فتوولتائیک - دیزل ژنراتور متصل ریزشبهه مورد بررسی قرار می‌دهد. مصرف انرژی روزانه در شکل ۵ نشان داده شده است.



شکل ۵: تقاضای برق روزانه

Figure5. Daily electricity demand

شکل ۵ نشان می‌دهد که مصرف برق در طول روز بیشتر از شب است. این مرکز در دانشگاهی قرار دارد که اکثر فعالیت‌های آن بین ساعت ۷:۰۰ تا ۱۸:۰۰ برگزار می‌شود. به ویژه، صبح زمانی است که مصرف برق شروع به افزایش می‌کند، اوج قدرت از ساعت ۱۰:۰۰ تا ۱۱:۰۰ رخ می‌دهد. کارگاه‌های مهندسی ۱۰۹۰/۵ کیلووات ساعت در روز مصرف می‌کنند، شبکه و خط پایه شامل سیستم اصلی در ارتباط با یک دیزل ژنراتور مانند یک سیستم پشتیبان است. دیزل ژنراتورهای فعلی توان الکتریکی را به تاسیسات با ظرفیت ۲۵۰ کیلو ولت آمپر و ضریب توان ($\cos\theta = 0.8$) تأمین می‌کنند. نمایه تابش خورشیدی روز انتخاب شده در شکل ۶ نشان داده شده است. علاوه بر این، تعدادی از پارامترهای ثابت به کار رفته در مطالعه حاضر برای شبیه‌سازی و ارزیابی کارایی روش کنترل مدل پیش‌بین اقتصادی در جدول ۱ نشان داده شده است.



شکل ۶: تابش خورشیدی روز انتخاب شده [۲۳، ۱۹]

Figure6. Solar radiation of the selected day[19,23]

۵- نتایج و بحث

این مقاله دو سناریو را با توجه به روش کنترل مدل پیش‌بین اقتصادی سیستم فتوولتائیک-دیزل ژنراتور متصل به ریز شبکه بررسی می‌کند. حالت اول، قطعی برق از ساعت ۷:۰۰ تا ۱۸:۰۰ وجود دارد که در طی آن اکثر فعالیت‌های دانشگاه انجام می‌شود. حالت دوم، در دسترس بودن برق شبکه در یک دوره ۲۴ ساعته در حالت اتصال متناوب در نظر گرفته می‌شود.

۵-۱- بررسی کنترل مدل پیش‌بین در حالت خاموشی شبکه برق

یک مدل اقتصادی پیش‌بینی کننده پیشنهاد شده است تا ریز شبکه را در شرایط جایگزین با در نظر گرفتن بدترین حالت خاموشی شبکه برق که از ساعت ۷ صبح تا ۶ بعد از ظهر رخ می‌دهد، عمل کند. تحلیل آن از طریق طراحی کنترل مدل پیش‌بینی اقتصادی بدون در نظر گرفتن اثرات نیروگاه فتوولتائیک امکان پذیر است. با توجه به [۱۷]، عملکرد کنترل مدل پیش‌بین اقتصادی از طریق در نظر گرفتن اندازه بهینه سازی نیروگاه‌های فتوولتائیک ارزیابی می‌شود. شبکه اصلی برق و دیزل ژنراتور خطوط پایه از این مورد هستند. دیزل ژنراتور نقش منبع انرژی پشتیبان را ایفا می‌کند. جریان‌های مختلف در سیستم نیروگاه فتوولتائیک در شکل ۷ نشان داده شده است.

شکل ۷ نشان می‌دهد که شبکه برق بین ساعت ۰۰:۰۰ و ۷:۰۰ و بین ساعت ۱۸:۰۰ تا ۰۰:۰۰ برق را تأمین می‌کند، در حالی که دیزل ژنراتور سنتی در هنگام خاموشی بین ساعت ۷ صبح تا ۶ بعد از ظهر بارگیری می‌کند. نتایج مختلف به دست آمده در شرایط جایگزین با در نظر نگرفتن سیستم نیروگاه فتوولتائیک در جدول ۲ نشان داده شده است. شکل ۸ دینامیک سوخت را نشان می‌دهد.

جدول ۱: متغیرهای متنوع شبیه سازی

Table1. Various simulation variables

متغیرها	شرح	مقدار
$\rho(t)$	هزینه انرژی	۰/۰۶ \$/kWh
F_c	هزینه سوخت	۰/۹۷۳ \$/L
F_d	خوراک در تعرفه	۰/۱۲ \$/kWh
N_{dg}	شماره دیزل ژنراتور	۱
P_{dg}	قدرت نامی دیزل ژنراتور	۲۵۰ kVA
P_{ndg}	توان فعال اسمی دیزل ژنراتور	۲۰۰ kW
$Cost\phi$	ضریب توان دیزل ژنراتور	۰/۸
n_{dg}	موثر دیزل ژنراتور	۳۵ %
پارامتر دیزل ژنراتور	A	۰/۲۴۶
	b_d	۰/۰۸۱۴۵
	L	۱/۴۸ m
طول تانک دیزل ژنراتور	L	۱/۰۲ m
	h_{max}	۰/۲۳ m
	h_o	۰/۲۲۸ m
مقدار سوخت اولیه در تانک دیزل ژنراتور	h_{min}	۰/۰۰۵ m
	t_s	۱ h
	N	۲۴
حداقل مقدار سوخت در تانک دیزل ژنراتور		
زمان نمونه برداری (بر حسب ساعت)		
افق زمانی		

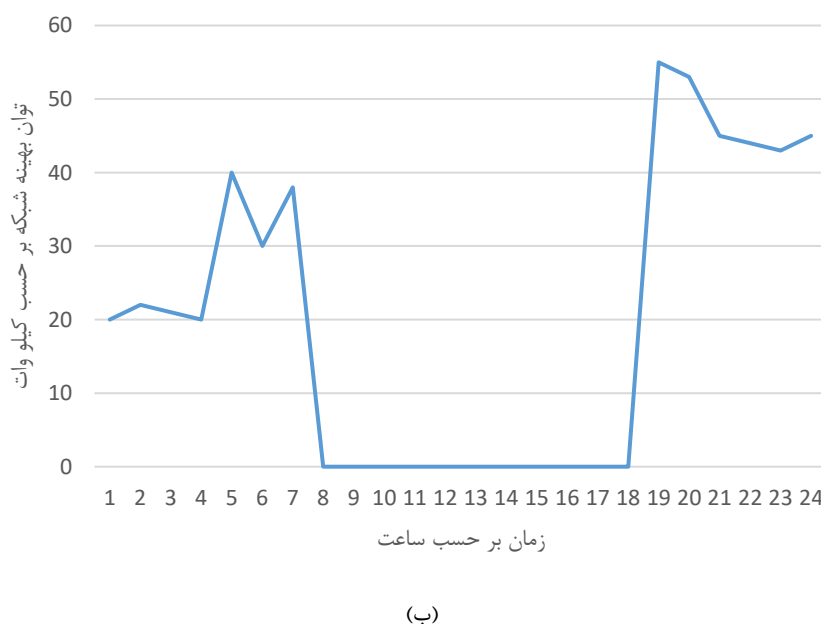
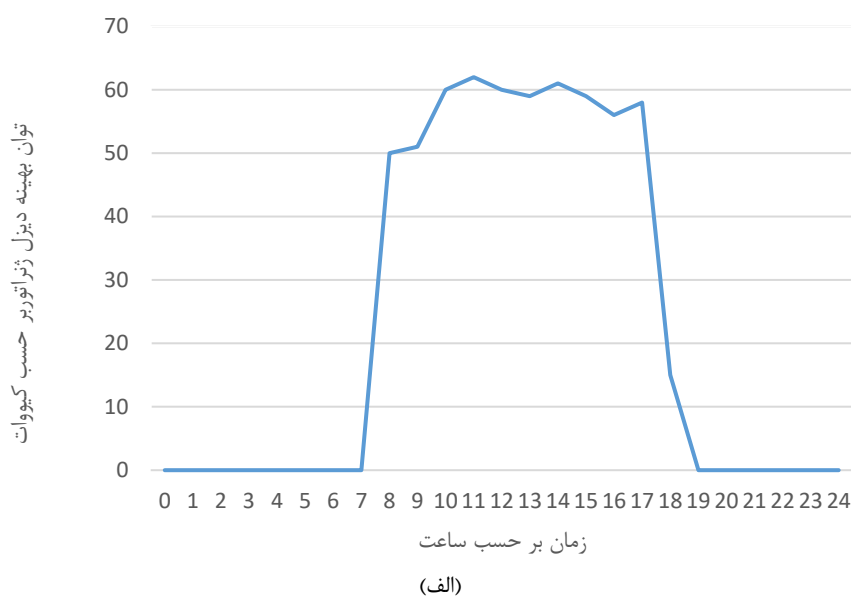
جدول ۲: کنترل پایه و بهینه به روشی جایگزین بدون شبکه نیروگاه فتوولتائیک

Table2. Basic and optimal control in an alternative way without grid of photovoltaic power plant

متغیرها	شبکه پایه + دیزل ژنراتور	هزینه پایه	انرژی شبکه	انرژی دیزل ژنراتور
مقدارها	۱۰۹۰/۵ کیلو وات ساعت	۳۶۸/۴ \$	۴۴۶/۴ کیلو وات ساعت	۶۴۴/۱ کیلو وات ساعت

با در نظر نگرفتن سیستم فتوولتائیک، سطح سوخت در AS's مخزن سوخت دیزل به میزان قابل توجهی کاهش یافته است. وقتی ضریب وزنی بر اساس شبکه اصلی برق و محدودیت های دیزل ژنراتور ω بین ۰ و ۱ در نظر گرفته شود، کنترل مدل پیش بین اقتصادی بازده متفاوتی را نشان می دهد. بازده های مختلف مربوط به کل انرژی شبکه الکتریکی و دیزل، در این مورد، در جدول ۳ نشان داده شده است.

در حالی که شبکه در آن دوره خاص که ضریب وزنی ω بین ۱ تا ۰/۶۱۹ در دسترس است، انرژی دیزل ژنراتور برای پاسخگویی به تقاضای بار در ساعات عصر بین ساعت ۱۸:۰۰ تا ۲۲:۰۰ افزایش یافته است. سیستم برق اصلی تقاضای بار را برای ۲۴ ساعت در روز تأمین می کند. خروجی جریان های توان در ریز شبکه با ضریب وزنی ω بین ۱ تا ۰/۶۱۹ در شکل ۹ نشان داده شده است. با توجه به استفاده از دیزل ژنراتور، هزینه های عملیاتی بالایی وجود دارد، حتی اگر شبکه برق از ساعت ۲۱:۰۰ تا ۲۴:۰۰ در دسترس باشد. مطابق شکل ۱۰، با در نظر گرفتن سیستم فتوولتائیک با ضریب وزنی ω بین ۰ تا ۰/۶۱۸ کنترل مدل پیش بین، دیزل ژنراتور را بهینه می کند. جدول ۴ خط پایه و کنترل بهینه را به روش جایگزین برای بررسی شبکه نیروگاه فتوولتائیک توضیح می دهد.



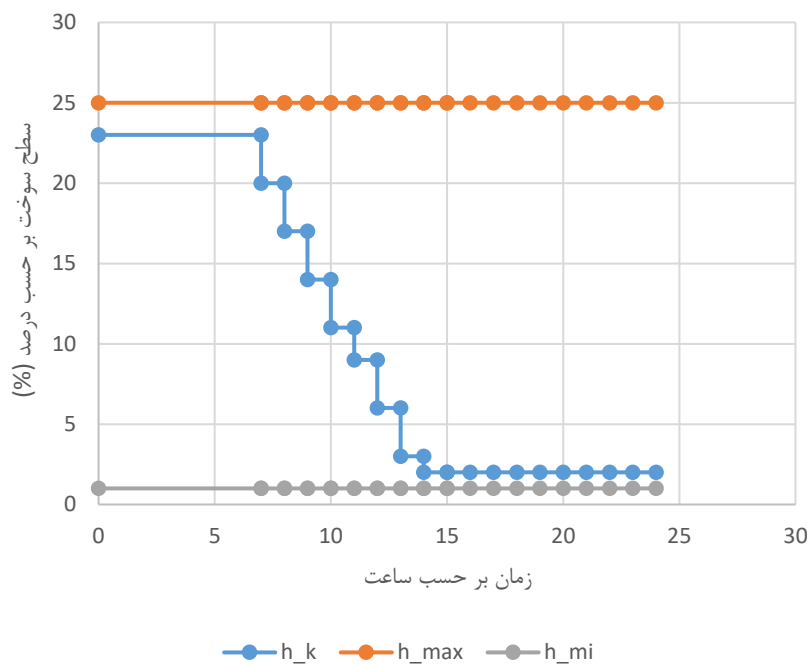
شکل ۷: کنترل مدل پیش‌بینی به روشی جایگزین بدون شبکه نیروگاه فتوولتائیک. (الف) توان بهینه دیزل ژنراتور؛ (ب) توان بهینه شبکه

Figure 7. So Predictive model control in an alternative method without grid of photovoltaic power plant lar radiation of the selected day. (a) Optimum power of diesel generator. (b) Optimum power of the grid

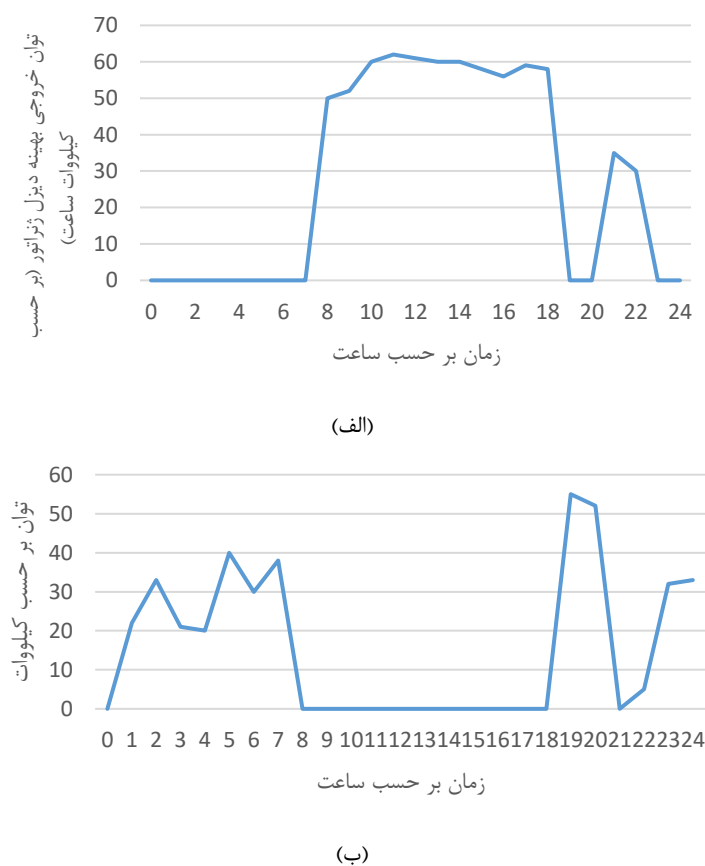
جدول ۳: کنترل مدل پیش‌بینی به روشی جایگزین بدون شبکه نیروگاه فتوولتائیک

Table 3. Predictive model control in an alternative method without grid of photovoltaic power plant

نسبت وزنی ω	۰-۰/۶۱۸	۰/۶۱۹-۱
انرژی شبکه کیلو وات ساعت	۴۴۶/۳۶	۳۸۰/۹۶
دیزل ژنراتور کیلو وات ساعت	۶۴۴/۱	۷۰۹/۵۳

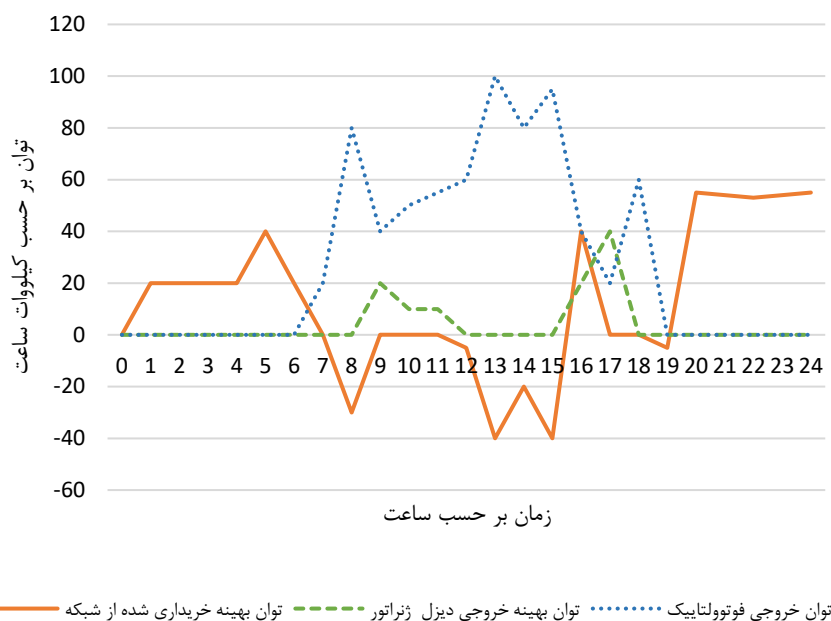


شکل ۸: دینامیک استفاده از سوخت به روشی جایگزین بدون شبکه نیروگاه فتوولتائیک
Figure8. Dynamics of fuel use in an alternative off-grid way of photovoltaic power plant



شکل ۹: کنترل مدل پیش‌بین اقتصادی در AS بدون نسبت وزنی $0.619 < \omega \leq 1$ بین ۱ تا ۰/۶۱۹ شبکه فتوولتائیک؛ (الف) خروجی بهینه توان دیزل ژنراتور؛ (ب) توان بهینه شبکه

Figure9. Economic forecasting model control in AS without weight ratio $0.619 < \omega \leq 1$ Photovoltaic grid. (a) Optimum power output of diesel generator. (b) Optimum power of the grid



شکل ۱۰: کنترل مدل پیش‌بین در حال بررسی شبکه نیروگاه فتوولتائیک به روشی جایگزین

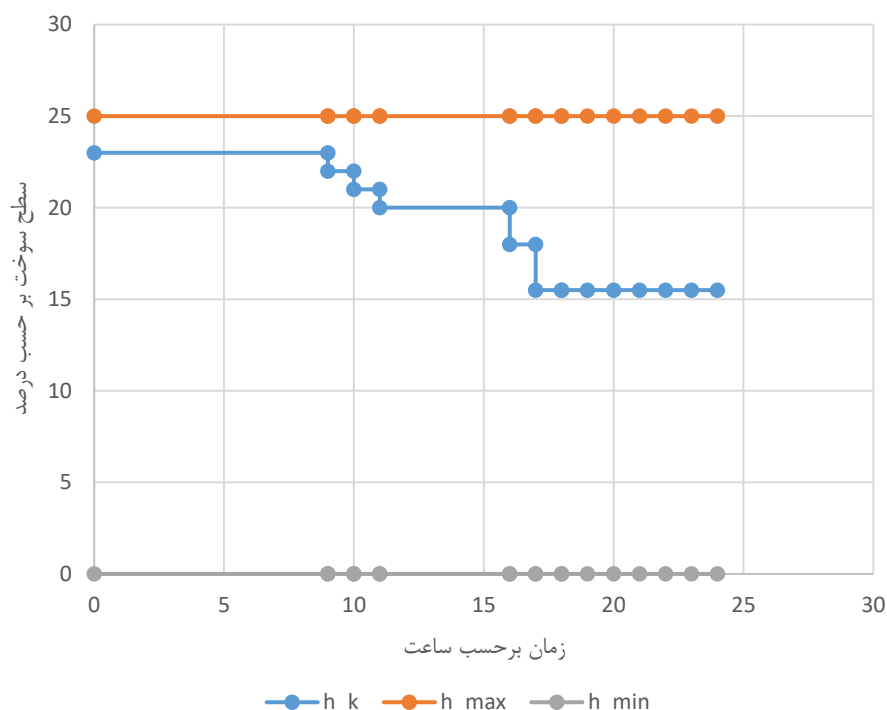
Figure10. Predictive model control investigating the photovoltaic power plant grid in an alternative way

جدول ۴: کنترل پایه و بهینه به روشی جایگزین در بررسی شبکه نیروگاه فتوولتائیک

Table4. Basic and optimal control in an alternative method in the evaluation of the photovoltaic power plant grid

متغیرها	مقادیر
شبکه اصلی + دیزل ژنراتور	کیلووات ساعت ۱۰۹۰/۵
انرژی دیزل ژنراتور	کیلووات ساعت ۹۸/۲
انرژی برق شبکه	کیلو وات ساعت ۴۲۴/۱
انرژی دیزل تحویل داده نشده	کیلووات ساعت ۵۴۶
صرفه‌جویی در انرژی دیزل	٪ ۸۴/۸
انرژی فروخته شده	کیلووات ساعت ۱۴۲/۴
درآمد روزانه	\$ ۱۷
کل هزینه شبکه + دیزل ژنراتور	\$ ۴۰
کل هزینه صرفه‌جویی	٪ ۶۶/۶

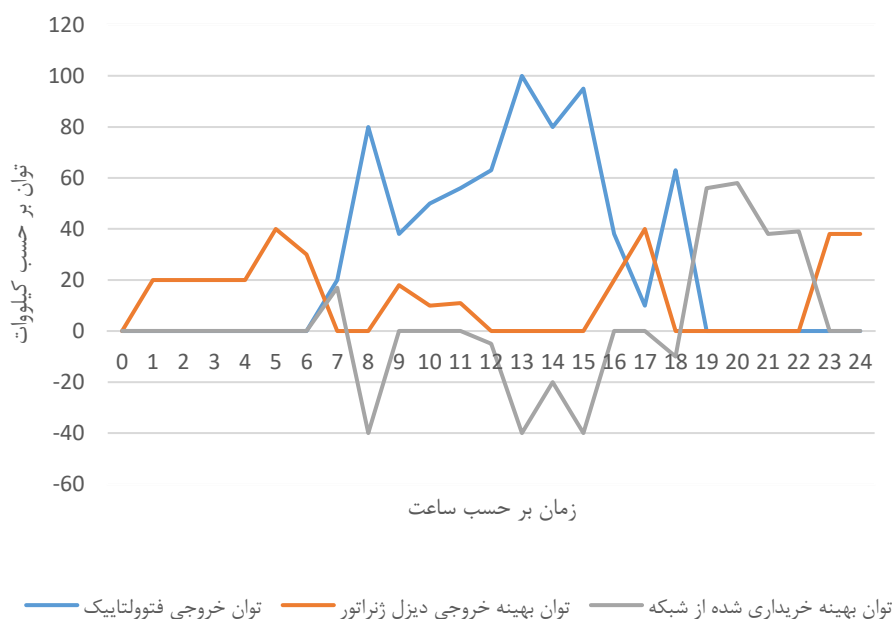
با توجه به نتایج بدست آمده، انرژی شبکه و عملکرد دیزل ژنراتور در مقایسه با خط پایه به طور قابل توجهی کاهش یافته است. صرفه‌جویی کلی در هزینه‌های حاصل از شبکه و دیزل ژنراتور با در نظر گرفتن ادغام سیستم فتوولتائیک و همچنین سود و درآمد روزانه در مقایسه با هزینه‌های اصلی است. کل صرفه‌جویی در هزینه را می‌توان با مقایسه هزینه سیستم برق شبکه و هزینه سیستم دیزل ژنراتور با در نظر گرفتن سیستم فتوولتائیک با خط اصلی برای وضعیت متناوب با در نظر نگرفتن سیستم فتوولتائیک محاسبه کرد. بنابراین، کنترل مدل پیش‌بین اقتصادی با در نظر گرفتن سیستم فتوولتائیک مقرون به صرفه تر است. با عدم تحویل انرژی دیزل ژنراتور، نیروگاه‌های فتوولتائیک در ارتباط با استراتژی‌های کنترل مدل پیش‌بین اقتصادی نسبت به دیزل ژنراتورهای مورد استفاده در خط اصلی عملکرد بهتری خواهند داشت.



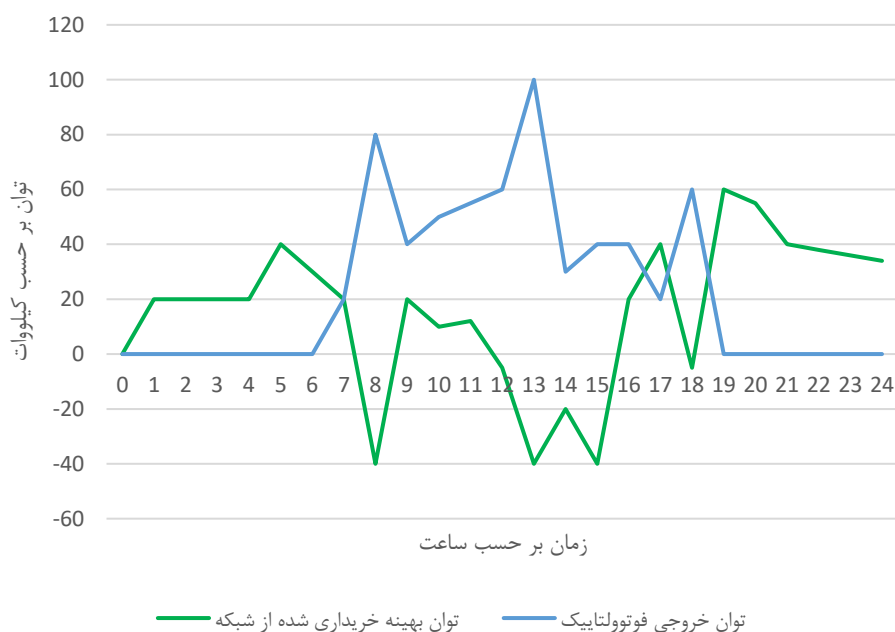
شکل ۱۱: دینامیک سوخت در مخزن سوخت دیزل به روشی جایگزین در بررسی سیستم فتوولتائیک
Figure11. Fuel dynamics in diesel fuel tank as an alternative method in photovoltaic system investigation

جدول ۵: کنترل مدل پیش‌بین به روشی جایگزین بدون شبکه نیروگاه فتوولتائیک
Table5. Predictive model control in an alternative method without grid of photovoltaic power plant

۰/۶۱۹-۱	۰-۰/۶۱۸	نسبت وزنی ω
۱۵۹/۹	۴۲۴/۱	انرژی شبکه کیلو وات ساعت
۳۲۶۱۵۹/۴	۹۸/۲	دیزل ژنراتور کیلو وات ساعت



شکل ۱۲: کنترل مدل پیش‌بین در حال بررسی نیروگاه فتوولتائیک به روش جایگزین ω بین ۱ تا ۰/۶۱۹
Figure12. Predictive model control under investigation of photovoltaic power plant by alternative method $0.619 < \omega \leq 1$



شکل ۱۳: کنترل مدل پیش‌بین در حالت اتصال متناوب

Figure13. Predictive model control in alternating connection mode

جدول ۶: کنترل پایه و بهینه در حالت اتصال متناوب

Table6. Basic and optimal control in alternating connection mode

متغیرها	مقادیر
خط اصلی	۱۰۹۰/۵ کیلووات ساعت
انرژی برق شبکه	۵۲۲/۳۰ کیلووات ساعت
ذخیره انرژی	۲۰/۵۶۸ کیلووات ساعت
انرژی فروخته شده	۴۰/۱۴۲ کیلووات ساعت
هزینه اصلی	\$۲۰/۱۱۷
هزینه انرژی شبکه	\$۰/۴۹
درآمد روزانه	\$۰/۱۷
ذخیره انرژی	%۲۰/۵۸
صرفه‌جویی در هزینه	%۲۰/۵۸

جدول ۷: کنترل مدل پیش‌بینی به روشی جایگزین بدون سیستم نیروگاه فتوولتائیک

Table7. Predictive model control in an alternative way without photovoltaic power plant system

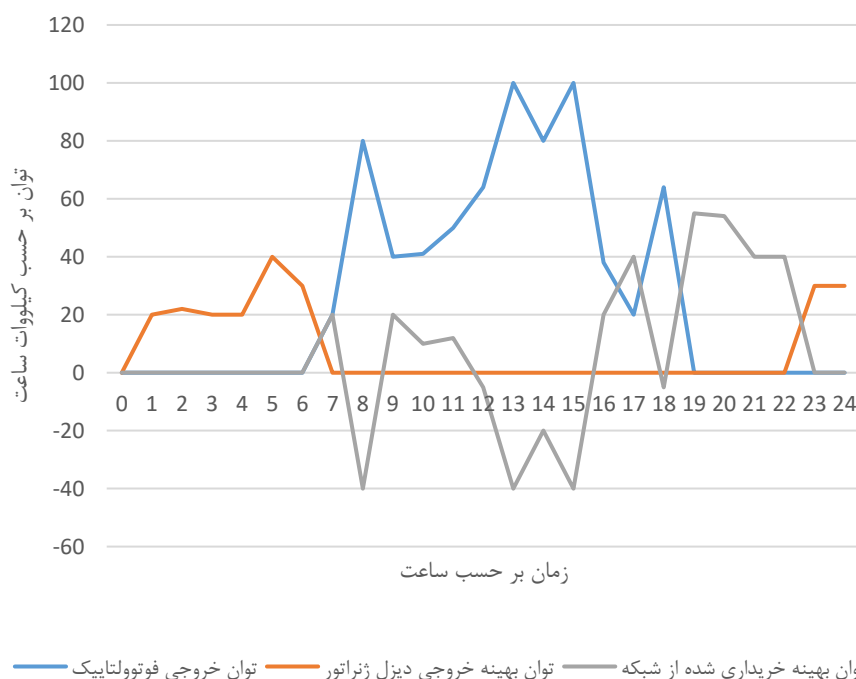
نسبت وزنی (w)	۰-۰/۶۱۸	۰/۶۱۹-۱
انرژی شبکه کیلو وات ساعت	۳/۵۲۲	۰
دیزل ژنراتور کیلو وات ساعت	۱/۲۹۴	۲/۲۲۸

با کاهش انرژی تحویلی دیزل ژنراتور در موارد بار و بدون نیروگاه‌های فتوولتائیک محاسبه می‌شود. مقایسه انرژی ارائه شده در مطالعه موردی با انرژی اصلی ارائه شده توسط دیزل ژنراتور، صرفه‌جویی دیزل ژنراتور را تعیین می‌کند. این نشان می‌دهد که عملیات تعرفه زمان استفاده دیزل ژنراتور و انتشار گازهای گلخانه‌ای به طور قابل ملاحظه‌ای کاهش یافته است. با بررسی یک سیستم فتوولتائیک در وضعیت متناوب استراتژی کنترل مدل پیش‌بین اقتصادی، ریز شبکه بسیار مقرون به صرفه و انرژی کارآمد است. شکل ۱۱ دینامیک سوخت را در مخزن سوخت دیزل نشان می‌دهد.

با تغییر ضریب وزنی ω بین ۰ تا ۱ نتایج متفاوتی از سیستم‌های انرژی ریزشبه به دست می‌آید. در جدول ۵، عملکرد سیستم نیروگاه فتوولتائیک در حالت متناوب در نظر گرفته شده با تغییر ضریب وزنی نمایش داده شده است. اگر ضریب وزنی ω بین ۱ تا ۰/۶۱۹ باشد، یک دیزل ژنراتور بر یک شبکه اولویت‌بندی می‌شود. جریان‌های قدرت در ریزشبه در صورتی که ضریب وزنی ω بین ۱ تا ۰/۶۱۹ باشد در شکل ۱۲ نشان داده شده است.

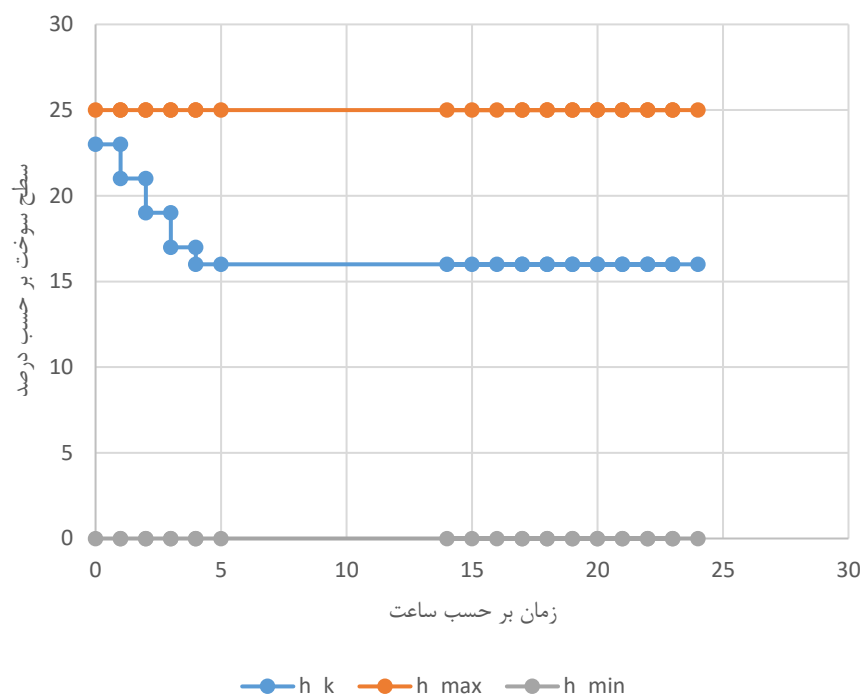
۵-۲- بررسی کنترل مدل پیش‌بین در حالت در دسترس بودن شبکه برق

روش کنترل مدل پیش‌بین در این سناریو با حفظ در دسترس بودن شبکه، در یک دوره ۲۴ ساعته با استفاده از حالت اتصال متناوب استفاده می‌شود. در حالت اتصال متناوب، خط مبنا مستلزم وضعیتی است که در آن شبکه برق تنها منبع توان برای بارها است که دلیل آن هزینه هم‌سطح بالای انرژی مرتبط با دیزل ژنراتورهای سنتی است. در شکل ۱۳، پارامترهای کنترل بهینه در حالت اتصال متناوب پس از اعمال رویکرد کنترل مدل پیش‌بینی با ضریب وزنی ω بین ۱ تا ۰/۶۱۹ نشان داده شده است. همانطور که در شکل ۱۳ نشان داده شده است، دیزل ژنراتور در یک دوره ۲۴ ساعته کار نمی‌کند. هزینه مصرف سوخت آن صفر است و گازهای گلخانه‌ای تولید نمی‌کند. توان فتوولتائیک که بالاتر از تقاضا است، با توان‌های خروجی متعدد به شبکه تغذیه می‌شود. نتایج ریزشبه با استفاده از روش کنترل مدل پیش‌بین اقتصادی در حالت اتصال متناوب در جدول ۶ ارائه شده است. جریان‌های مختلف توان بهینه با اعمال ضریب وزنی ω بین ۰ تا ۱ به دست می‌آیند. کل انرژی‌های بهینه دیزل ژنراتور و شبکه در جدول ۷ نشان داده شده است. در حالت اتصال متناوب، اگر ضریب وزنی ω بین ۱ تا ۰/۶۱۹ تنظیم شده باشد، دیزل ژنراتور از طریق شبکه اصلی الکتریکی جدا شده است. در نتیجه، انرژی شبکه کاهش می‌یابد در حالی که انرژی از دیزل ژنراتور افزایش می‌یابد. جریان‌های توان بهینه در صورتی که ضریب وزنی ω بین ۱ تا ۰/۶۱۹ باشد در شکل ۱۴ نشان داده شده است. به دلیل جدا شدن دیزل ژنراتور، کنترل مدل پیش‌بین اقتصادی شبکه اصلی الکتریکی را برای یک سیکل از پیش تعیین شده حالت اتصال متناوب جدا می‌کند. حتی اگر برق شهری در دسترس است، سوئیچ‌ها نمی‌توانند به طور هم‌زمان بسته شوند. بنابراین، مصرف سوخت دیزل ژنراتور و انتشار گازهای گلخانه‌ای احتمالاً افزایش می‌یابد. اگر مسائل مربوط به کیفیت توان برای ایمنی تجهیزات الکتریکی وجود داشته باشد، ممکن است چنین مواردی رخ دهد. شکل ۱۵ نشان می‌دهد که چگونه مقدار سوخت در مخزن سوخت دیزل در طول زمان تغییر می‌کند، همانطور که در این مورد توضیح داده شده است.



شکل ۱۴: کنترل مدل پیش‌بین در حالت اتصال متناوب ω بین ۱ تا ۰/۶۱۹

Figure14. Predictive model control in alternating connection mode $0.619 \leq \omega \leq 1$



شکل ۱۵: سطح سوخت در مخزن سوخت دیزل در حالت اتصال متناوب ω بین ۱ تا ۰/۶۱۹
 Figure 15. Fuel level in the diesel fuel tank in intermittent connection mode $0.619 \leq \omega \leq 1$

در مقایسه با کنترل عمل بهینه حلقه باز شرح داده شده در [۲۳]، کنترل مدل پیش‌بین اقتصاد با تغییر فاکتور وزن در هر دو حالت AS و اتصال متناوب بهتر عمل کرد. فتوولتائیک و دیزل ژنراتور در شرایط غیر جزیره‌ای گزینه‌ای مقرون به صرفه با ضریب وزنی زیر ۰/۶۱۹ ارائه می‌دهد.

۶- نتیجه‌گیری

در این مقاله یک کنترل عملکرد بهینه حلقه بسته با توجه به کنترل مدل پیش‌بین اقتصادی شبکه انرژی جفت شده ریز شبکه وجود دارد. ریز شبکه شامل یک سیستم پشتیبان فتوولتائیک-دیزل ژنراتور بر اساس محدودیت در بین پارامترهای قابل کنترل در تعرفه زمان استفاده شده است. متغیرهای کنترلی توان تولید شده از طریق شبکه و توان از دیزل ژنراتور در این موضوع بهینه‌سازی هستند. خروجی فتوولتائیک در هر دو مورد جزء پارامترهای تصمیم‌گیری نیست. کاهش هزینه‌های انرژی شبکه و کاهش هزینه مصرف سوخت باعث بهبود عملکرد انرژی و ایجاد درآمد از طریق فروش انرژی فتوولتائیک مازاد به شبکه اصلی برق می‌شود. برق فتوولتائیک در زمان اوج قیمت‌ها برای پاسخگویی به تقاضای بار اولویت بندی شده است. در شبیه‌سازی‌ها، نشان داده می‌شود که این روش پیشنهادی کنترل مدل پیش‌بین اقتصادی با در نظر گرفتن رابطه بین شبکه اصلی الکتریکی و هزینه‌های دیزل ژنراتور، راندمان عالی را هم از نظر عملیاتی و هم از نظر انرژی کارآمد ارائه می‌دهد. علاوه بر این، کنترل مدل پیش‌بین اقتصادی محدودیت‌های مربوط به سطوح سوخت در مخزن سوخت دیزل را در نظر می‌گیرد و استحکام را در مواجهه با عدم قطعیت و اختلال نشان می‌دهد که قبل از دوره کنترل بعدی، به آنها پرداخته می‌شود و می‌توان از افق عقب‌نشینی برای اصلاح متغیرهای کنترلی استفاده کرد. علاوه بر این، محدوده فاکتور وزنی مناسب برای کاهش قلیل ملاحظه هزینه‌های عملیاتی سیستم‌های متصل به شبکه فتوولتائیک-دیزل ژنراتور ایجاد شده است.

مراجع

- [1] R. Faia, P. Faria and Z. Vale, "Demand response optimization using particle swarm algorithm considering optimum battery energy storage schedule in a residential house," *Energies*, vol. 12, no. 2, p. 1645, 2019, doi: 10.3390/en12091645.

- [2] S. Chapaloglou *et al.*, "Smart energy management algorithm for load smoothing and peak shaving based on load forecasting of an island's power system," *Applied energy*, vol. 238, pp. 627-642, 2019, doi: 10.1016/j.apenergy.2019.01.102.
- [3] F. S. Mahmoud *et al.*, "Optimal sizing of smart hybrid renewable energy system using different optimization algorithms," *Energy Reports*, vol. 8, pp. 4935-4956, 2022, doi: 10.1016/j.egyr.2022.03.197.
- [4] S. Mouassa *et al.*, "Ant lion optimizer for solving optimal reactive power dispatch problem in power systems," *Engineering science and technology, an international journal*, vol.20, no.3, pp. 885-895, 2017, doi: 10.1016/j.egyr.2022.03.197.
- [5] F. Ahmed and Y. A. Almoataz, "Single and multi-objective operation management of micro-grid using krill herd optimization and ant lion optimizer algorithms," *International Journal of Energy and Environmental Engineering*, vol.9, no.3, pp. 257-271, 2018, doi: 10.1007/s40095-018-0266-8.
- [6] P. Arbolea *et al.*, "Efficient Energy Management in Smart Micro-Grids: ZERO Grid Impact Buildings," in *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 6, no. 2, pp. 1055-1063, March 2015, doi: 10.1109/TSG.2015.2392071.
- [7] H. Vaikund and S. G. Srivani, "Trends in energy management system for smart microgrid—an overview," *Advances in Signal and Data Processing . Lecture Notes in Electrical Engineering*, vol. 703, 2021, doi: 10.1007/978-981-15-8391-9_2.
- [8] S. Samal, P. K. Hota and P. K. Barik, "Power quality assessment of a solar PV and fuel cell-based distributed generation system using unified power quality conditioner," *International Journal of Ambient Energy*, vol. 43, no. 1, pp. 3294-3304, 2022, doi: 10.1080/01430750.2020.1824940.
- [9] T. Adefarati and R. C. Bansal, "Reliability, economic and environmental analysis of a microgrid system in the presence of renewable energy resources," *Applied energy*, vol. 236, pp. 1089-1114, 2019, doi: 10.1016/j.apenergy.2018.12.050.
- [10] K. Ndwali, J. G. Njiri and E. M. Wanjiru, "Optimal operation control of microgrid connected photovoltaic-diesel generator backup system under time of use tariff," *Journal of Control, Automation and Electrical Systems*, vol. 31, no. 4, pp. 1001-1014, 2020, doi: 10.1007/s40313-020-00585-w.
- [11] M. A. Velasquez, J. Barreiro-Gomez, N. Quijano, A. I. Cadena and M. Shahidehpour, "Intra-Hour Microgrid Economic Dispatch Based on Model Predictive Control," in *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 11, no. 3, pp. 1968-1979, May 2020, doi: 10.1109/TSG.2019.2945692.
- [12] W. Dong *et al.*, "Adaptive optimal fuzzy logic based energy management in multi-energy microgrid considering operational uncertainties," *Applied Soft Computing*, vol. 98, p. 106882, 2021, doi: 10.1016/j.asoc.2020.106882.
- [13] S.R. Salkuti, P. Sravanthi and S.C. Kim, "Social welfare maximization based optimal energy and reactive power dispatch using ant lion optimization algorithm," *Telkomnika (Telecommunication Computing Electronics and Control)*, vol. 19, no. 4, p. 1379, Aug. 2021, doi: 10.12928/telkomnika.v19i4.18351.
- [14] H. K. Pujari and M. Rudramoorthy, "Optimal design, techno-economic and sensitivity analysis of a grid-connected hybrid renewable energy system: a case study," *International Journal of Emerging Electric Power Systems*, 2022.
- [15] L. Jianlin and T. Yuliang, "Model Predictive Control Method of hybrid Battery energy storage system for Smoothing Wind Power Fluctuation," *E3S Web of Conferences*, vol. 194, no. 2, 2020, doi: 10.1051/e3sconf/202019402003.
- [16] Z. Movahediyani and A. Askarzadeh, "Multi-objective optimization framework of a photovoltaic-diesel generator hybrid energy system considering operating reserve," *Sustainable Cities and Society*, vol. 41, pp. 1-12, 2018, doi: 10.1016/j.scs.2018.05.002.

- [17] M. Lamnadi *et al.*, "Optimal design of stand-alone hybrid power system using wind and solar energy sources," *International Journal of Energy Technology and Policy*, vol. 15, no. 2/3, pp. 280-300, 2019, doi: 10.1504/IJETP.2019.10019646.
- [18] S. Mandelli, J. Barbieri, R. Mereu and E. Colombo, "Off-grid systems for rural electrification in developing countries: definitions, classification and a comprehensive literature review," *Renew Sustain Energy Rev*, vol. 58, pp. 1621-1646, 2016, doi: 10.1016/j.rser.2015.12.338.
- [19] F. Garcia-Torres, A. Zafra-Cabeza, C. Silva, S. Grieu, T. Darure and A. Estanqueiro, "Model Predictive Control for Microgrid Functionalities: Review and Future Challenges," *Energies*, vol. 14, no. 5, p. 1296, 2021, doi: 10.3390/en14051296.
- [20] R. Huang *et al.*, "Accelerated Derivative-Free Deep Reinforcement Learning for Large-Scale Grid Emergency Voltage Control," in *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 37, no. 1, pp. 14-25, Jan. 2022, doi: 10.1109/TPWRS.2021.3095179.
- [21] O. Kaya, E. van der Roest, D. Vries and T. Keviczky, "Hierarchical Model Predictive Control for Energy Management of Power-to-X Systems," *IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Europe (ISGT-Europe)*, The Hague, Netherlands, 2020, pp. 1094-1098, doi: 10.1109/ISGT-Europe47291.2020.9248892.
- [22] S. Mirjalili, S. M. Mirjalili and A. Lewis, "Grey wolf optimizer," *Advances in engineering software*, vol. 69, pp. 46-61, 2014, doi: 10.1016/j.advengsoft.2013.12.007.
- [23] A. Kasaeian, P. Rahdan, M.A. Vaziri-Rad and W.M. Yan, "Optimal design and technical analysis of a grid-connected hybrid photovoltaic/diesel/biogas under different economic conditions: A case study," *Energy Conversion and Management*, vol. 198, p. 111810, 2019, doi: 10.1016/j.enconman.2019.111810.
- [24] S. Z. Tajalli, S. A. Mohammad Tajalli, A. Kavousi-Fard, T. Niknam, M. Dabbaghjamesh and S. Mehraeen, "A Secure Distributed Cloud-Fog Based Framework for Economic Operation of Microgrids," *IEEE Texas Power and Energy Conference (TPEC)*, College Station, TX, USA, 2019, pp. 1-6, doi: 10.1109/TPEC.2019.8662201.
- [25] M. A. Heidari, M. Nafar and T. Niknam, "Particle Swarm Optimization Based Sliding Mode Controller for Performance Improvement of Unified Power Quality Controllers Inverters," *Journal of Southern Communication Engineering*, vol. 12, no. 46, pp. 59-76, 2022, doi: 10.30495/jce.2022.1961181.1162 [in persian].
- [26] M. Khadem and M. Najafi, "Demand Planning and Transmission Network Development in the Capacity Market Using Microgrids," *Journal of Southern Communication Engineering*, vol. 11, no. 41, pp. 43-57, 2021 [in persian].
- [27] S. Naseri, M. Najafi and M. Esmaeilbeig, "Economic Dispatch Problem for Minimizing Cost and Improving Reliability Considering Uncertainty," *Journal of Southern Communication Engineering*, vol. 11, no. 41, pp. 77-91, 2021 [in persian].

COPYRIGHTS

©2024 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>





Journal of Southern Communication Engineering



Islamic Azad University Bushehr Branch

Online ISSN: 2980-9231

Vol. 13, Issue 52, Summer 2024

Contents

A High Accuracy Capacitance-to-Digital Converter with Improving Nonidealities Effects.....	1
Arash Ahmadpour; Mehdi Fallah Kazemi	
Improving Efficiency and Reliability in The Seismic Monitoring Systems Based on The Internet of Things by Applying Redundancy in Sensors and Controllers.....	11
Iman Zangeneh; Amir Massoud Bidgoli; Ardeshir Dolati	
Optimizing Solar Radiation Prediction Based on The Internet of Things Platform in Photovoltaic Power Plant	33
Neda Ashrafi Khozani; Maryam Mahmoudi; Shabnam Nasr Esfahani	
Localization of Accessory Pathway in Patients with Wolff-Parkinson-White Syndrome Using Cross-Recurrence Plot of Precordial Leads.....	45
Sakineh Yahyazadeh Saravi; Nader Jafarnia Dabanloo; Ali Motie Nasrabadi; Alireza Ghorbani Sharif	
The Crossed-Dipole Antenna with Torang-shaped Parasitic Elements and Circular Polarization for GPS Application	65
Amir Siahcheshm	
Demand Side Management Based on Model Predictive Control in Microgrid in Grid Connected Mode	81
Masoud Bonyani; Mohammad Mehdi Ghanbarian; Mohsen Simab	



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. Esmaeil Najafiaghdam	Professor	Sahand University of Technology
Dr. Bal Virdee	Professor	London Metropolitan University
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:

