



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

فاکس: 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..... طبقه‌بندی توده‌های سرطانی سینه با استفاده از ماشین بردار پشتیبان غیرخطی کوادراتیک و مقایسه با شبکه عصبی خودسازمان‌ده.....
سوده بخشنده؛ سیده منیره اطمیابی؛ سحر صابری
- ۱۵..... مدل برنامه‌ریزی پویا تک‌مرحله‌ای توسعه شبکه انتقال در بازار برق رقابتی.....
حمید گرجی پور؛ مجتبی نجفی؛ نقی مودبی پیرکلاچاهی
- ۲۹..... تجزیه و تحلیل کامل برای تشخیص و مکان‌یابی تخلیه‌های جزئی در کابل‌های XLPE، ترانسفورماتورهای قدرت و ژنراتورها.....
امیر قائدی؛ رضا صداقتی؛ مهرداد محمودیان
- ۵۳..... تفریق‌کننده‌های تقریبی کم‌مصرف و قابل‌اعتماد برای کاربردهای پردازش تصویر.....
فاطمه پولادی؛ فرشاد پسران؛ نبی اله شیری
- ۶۷..... یک رویکرد تشخیص حملات توزیع شده در لایه مه و بر اساس پایگاه داده توزیع شده بلاک چین و یادگیری ماشین.....
محسن اقبالی؛ محمدرضا ملاحسینی اردکانی
- ۹۱..... مکان‌یابی مشارکتی و غیرمشارکتی منبع مبتنی بر اختلاف زمان دریافت سیگنال با استفاده از تابع هم‌بند بر پایه رهاسازی نیمه‌معین.....
مرجان دادخواه تهرانی؛ حنان لهراسبی پیده

Vol. 14/ No. 53/Autumn 2024

Research Article

Classification of Breast Cancer Masses using Non-Linear Quadratic Support Vector Machine and Comparison with Self-Organizing Neural Network

Soodeh Bakhshandeh, Assistant Professor^{1*}  | Seyede Monire Atyabi, MSc²  | Sahar Saberi, Assistant Professor³ 

¹Department of Computer Engineering, East Tehran Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran, Soodeh.Bakhshandeh@gmail.com, Soodeh.bakhshandeh@iau.ac.ir

²Department of Computer Engineering, South Tehran Branch Islamic Azad University, Tehran, Iran, donya.atyabi2017@gmail.com

³Department of Computer Engineering, East Tehran Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran, sahasaberi@gmail.com

Correspondence

Soodeh Bakhshandeh, Assistant Professor of Computer Engineering, East Tehran Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran
Soodeh.Bakhshandeh@gmail.com

Received: 1 October 2023

Revised: 12 November 2023

Accepted: 5 December 2023

Abstract

Breast cancer is the second most common cancer after lung cancer and the fifth leading cause of death in women. In less developed countries, breast cancer is the most important cause of death. In this disease, the cells of the breast tissue change and divide into multiple cells and cause a lump. If breast cancer is in the early stages, treatment is possible. There are many treatment methods such as surgery to remove the defective area, drug therapy, radiation therapy, chemotherapy, hormone therapy, and immunotherapy. These treatments have the potential to save lives when administered in the early stages. From the above explanations, it can be seen that early detection of breast cancer is very important and in this research, an attempt has been made to identify suspected cancer data with the quadratic support vector machine method and based on the features extracted from valid and numerous MRI images. Let's classify so that the process of diagnosing the disease in the early stages is easier and faster. The results showed that 356 out of 357 malignant data and 202 out of 211 benign data were correctly classified. The classification accuracy of malignant data was 99.7% and the classification accuracy of benign data was 97.5%, and finally the overall classification accuracy was 98.2%, which indicates the optimal performance of this method in breast cancer data classification.

Keywords: Breast Cancer, Wisconsin Data, Support Vector Machine, Quadratic Kernel.

Highlights

- Developing a method to diagnose breast cancer with the aim of diagnosing the disease in the early stages.
- Applying support vector machine with quadratic kernel with the aim of reducing classification time.
- Using the graphic feature selection method (SU-CFAM) with good speed and performance.
- Achieving 98.2% accuracy without using SU-CFAM, and 99.1% using it.

Citation: S. Bakhshandeh, S. Monire Atyabi, and S. Saberi, "Classification of Breast Cancer Masses using Non-Linear Quadratic Support Vector Machine and Comparison with Self-Organizing Neural Network," *Journal of Southern Communication Engineering*, vol. 14, no. 53, pp. 1–14, 2024, doi:10.30495/jce.2023.1993480.1227, [in Persian].

مقاله پژوهشی

طبقه‌بندی توده‌های سرطانی سینه با استفاده از ماشین بردار پشتیبان غیرخطی کوادراتیک و مقایسه با شبکه عصبی خودسازمان‌ده

سوده بخشنده*^۱ | سیده منیره اطیابی^۲ | سحر صابری^۳

چکیده:

سرطان سینه بعد از سرطان ریه دومین سرطان شایع و پنجمین دلیل اصلی مرگ و میر در زنان است. تشخیص زودهنگام این سرطان بسیار حائز اهمیت بوده و حتی در صورت تشخیص به موقع این نوع از سرطان، نجات جان افراد نیز امکان‌پذیر است. با در نظر گرفتن این مسئله، در پژوهش روبرو تلاش شده است تا با بهره‌گیری از روش ماشین بردار پشتیبان کوادراتیک و بر اساس ویژگی‌های استخراج شده از تصاویر MRI معتبر، نسبت به طبقه‌بندی داده‌های مشکوک به سرطان اقدام گردد تا روند تشخیص بیماری در مراحل اولیه، راحت‌تر و سریع‌تر صورت پذیرد. در این روش به دلیل ماهیت حجم کم محاسبات و بالا بودن سرعت آن در روند آموزش و نهایت آزمایش، ماشین بردار پشتیبان کوادراتیک، انتخاب شده است. در راستای قوی‌تر شدن روش مربوطه، از روش انتخاب ویژگی SU-CFAM که یک روش انتخاب ویژگی مبتنی بر گراف می‌باشد، بهره گرفته شده است. نتایج روش با بهره‌گیری از فاز انتخاب ویژگی و بدون آن مقایسه شد. نتایج نشان داد دقت روش بدون بهره‌گیری از SU-CFAM، ۹۸/۲٪ و با بهره‌گیری از آن به ۹۹/۱٪ رسید که نشان‌دهنده عملکرد مطلوب این روش در طبقه‌بندی داده‌های سرطانی سینه است.

کلیدواژه‌ها: داده‌های ویسکانسین، سرطان سینه، کرنل کوادراتیک، ماشین بردار پشتیبان

^۱ گروه مهندسی کامپیوتر، واحد تهران شرق، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران،
Soodeh.bakhshandeh@iau.ac.ir

^۲ گروه مهندسی کامپیوتر، واحد تهران جنوب، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران،
donya.atyabi2017@gmail.com

^۳ گروه مهندسی کامپیوتر، واحد تهران شرق، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران،
saharsaberi@gmail.com

نویسنده مسئول

*سوده بخشنده، استادیار گروه مهندسی کامپیوتر، واحد تهران شرق، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران،
Soodeh.Bakhshandeh@gmail.com

تاریخ دریافت: ۹ مهر ۱۴۰۲

تاریخ بازنگری: ۲۱ آبان ۱۴۰۲

تاریخ پذیرش: ۱۴ آذر ۱۴۰۲

<https://doi.org/10.30495/jce.2023.1993480.1227>

۱- مقدمه

سرطان یک بیماری کشنده است که در سال اخیر حدود ده میلیون مرگ و ۱۹/۳ میلیون مورد سرطان گزارش شده است. سرطان سینه بعد از سرطان ریه دومین سرطان شایع و پنجمین دلیل اصلی مرگ و میر در زنان است. در کشورهای کمتر توسعه‌یافته سرطان سینه مهم‌ترین عامل مرگ و میر است. در این بیماری، سلول‌های بافت سینه تغییر می‌کنند و به سلول‌های متعدد تقسیم می‌شوند و باعث ایجاد توده می‌شوند. سرطان در مجاری یا لوبول‌هایی که به نوک سینه‌ها متصل هستند شروع می‌شود. بیشتر توده‌های سینه خوش‌خیم و غیر سرطانی هستند و باعث ایجاد فیبروم، حساسیت، ضخیم شدن ناحیه یا توده می‌شوند. اغلب، تومورهای سینه در اندازه کوچک هیچ علامتی ندارند و به راحتی قابل درمان هستند توده بدون درد نشانه سلول‌های غیر طبیعی است. سابقه خانوادگی، عوامل تولید مثل، ویژگی‌های فردی، وزن اضافی بدن، رژیم غذایی، الکل، تنباکو، عوامل محیطی و سایر عوامل خطر، مانند کار در نوبت شب، همگی از مسائل مربوط به سرطان سینه هستند. سرطان سینه در مرحله اولیه به کندی گسترش می‌یابد اما با گذشت زمان بر سایر قسمت‌های بدن تأثیر می‌گذارد. آزمایشات زیادی برای تشخیص

تومورهای سینه توصیه می‌شود، از جمله ماموگرافی، تصویربرداری تشدید مغناطیسی^۱ و سونوگرافی. ماموگرافی یک آزمایش مقرون به صرفه و کم اشعه است که برای تشخیص زودهنگام تومور پستان پیشنهاد می‌شود. MRI یک آزمایش جایگزین است که برای تأیید وجود تومور استفاده می‌شود. در طول آزمایش MRI ممکن است واکنش آلرژیک به رنگ کنتراست رخ دهد. این یک پیامد ناخواسته آزمایش MRI است. در مراحل اولیه، آزمایش توصیه شده ماموگرافی است. اگر سرطان سینه در مراحل اولیه باشد، درمان امکان پذیر است. روش‌های درمانی زیادی مانند جراحی برای برداشتن ناحیه معیوب، دارودرمانی، پرتودرمانی، شیمی‌درمانی، هورمون‌درمانی و ایمونوتراپی وجود دارد. این درمان‌ها، زمانی که در مراحل اولیه انجام شوند، پتانسیل نجات جان افراد را دارند. میزان بقا در صورت تشخیص در مرحله اولیه، در کشورهای توسعه یافته ۹۰ درصد، در آفریقای جنوبی ۴۰ درصد و در هند ۶۶ درصد است. کشورهای کم‌درآمد منابع کمتری دارند، بنابراین روش‌های تشخیص زودهنگام و درمان‌ها می‌تواند برای نجات جان زنان مفید باشد [۱].

از توضیحات فوق چنین برمی‌آید که تشخیص زودهنگام سرطان پستان بسیار حائز اهمیت است و در این پژوهش نیز تلاش شده است تا با روش‌های یادگیری ماشین مانند ماشین بردار پشتیبان^۲ و بر اساس ویژگی‌های استخراج شده از تصاویر MRI معتبر، داده‌های مشکوک به سرطان را طبقه‌بندی کنیم تا روند تشخیص بیماری در مراحل اولیه، راحت‌تر و سریع‌تر صورت پذیرد. در روش ارائه شده با هدف کاهش زمان طبقه‌بندی، از ماشین بردار پشتیبان با کرنل کودراتیک^۳ استفاده نموده است. این کرنل در مقایسه با اغلب کرنل‌های دیگر در این حوزه، دارای ماهیت سرعت بالا در کنار دقت مناسب می‌باشد. از سوی دیگر با توجه به اهمیت بهره‌گیری از روش‌های انتخاب ویژگی در فاز پیش‌پردازش، از روش CU-CFAM استفاده شده است. این روش انتخاب ویژگی، به دلیل ماهیت گرافی آن دارای سرعت و عملکرد مناسبی می‌باشد و به علاوه امکان بهره‌گیری از آن در حالت با ناظر و بدون ناظر، وجود دارد.

در ادامه و در بخش ۲، به بررسی کارها و پژوهش‌های مرتبط در این حوزه می‌پردازیم. در بخش ۳، روش پیشنهادی مورد بررسی قرار می‌گیرد. در بخش ۴ به بررسی نتایج حاصل از این روش در مقایسه با دیگر روش‌ها پرداخته می‌شود و در نهایت در بخش ۵، به نتیجه‌گیری و جمع‌بندی خواهیم پرداخت.

۲- نگاهی به کارها و پژوهش‌های مرتبط

زرویی و ایلدری، در پژوهشی به بررسی سیستم‌های تصمیم‌گیری مبتنی بر یادگیری ماشین و پردازش تصویر برای تصویربرداری سرطان سینه پرداختند. مقاله آنان به صورت مروری بر ادبیات ساختاریافته با استفاده از تکنیک‌های یادگیری ماشین و پردازش تصویر برای تصویربرداری سرطان سینه انجام شد. مجموعه‌ای از ۵۳۰ مقاله منتشر شده بین سال‌های ۲۰۰۰ تا اوت ۲۰۱۹ بر اساس ده معیار انتخاب و تجزیه و تحلیل شدند. معیارهای مورد بررسی شامل سال و کانال انتشار، نوع تجربی، نوع تحقیق، کار پزشکی، تکنیک‌های یادگیری ماشین، مجموعه داده‌های مورد استفاده، روش‌های اعتبارسنجی، معیارهای عملکرد و تکنیک‌های پردازش تصویر که شامل پیش‌پردازش تصویر، تقسیم‌بندی، استخراج ویژگی و انتخاب ویژگی، می‌باشد. نتایج نشان داد که تکنیک‌های یادگیری عمیق تا حد زیادی برای انجام طبقه‌بندی استفاده می‌شوند. اکثر مطالعات انتخاب شده از ماموگرافی به عنوان روش‌های تصویربرداری به جای تصویربرداری اولتراسوند یا MRI، استفاده نمودند. در مورد تکنیک‌های پردازش تصویر، در اکثر مطالعات انتخاب شده، در مرحله پیش‌پردازش، تصاویر ورودی را با کاهش نویز و عادی‌سازی رنگ‌ها تغییر داده و در برخی از آن‌ها از تقسیم‌بندی برای استخراج منطقه مورد نظر با روش آستانه‌گذاری استفاده می‌کنند [۲].

اکیچی و جازال، در پژوهشی به بررسی تشخیص سرطان سینه با استفاده از ترموگرافی و شبکه‌های عصبی کانولوشنال^۴ پرداختند. در پژوهش آنان، یک الگوریتم جدید برای استخراج ویژگی‌های مشخصه پستان بر اساس داده‌های زیستی، تجزیه و تحلیل تصویر و آمار تصویر پیشنهاد شده است. این ویژگی‌ها از تصاویر حرارتی گرفته شده توسط یک دوربین حرارتی استخراج

¹ Magnetic Resonance Imaging (MRI)

² Support Vector Machine (SVM)

³ Quadratic Kernel

⁴ Convolutional Neural Network

شده‌اند و برای طبقه‌بندی تصاویر پستان با استفاده از شبکه‌های عصبی کانولوشنال بهینه‌سازی شده توسط الگوریتم بیز^۱، استفاده شده است. با استفاده از الگوریتم پیشنهادی آنان، نرخ دقت ۹۵/۹۸٪ برای تصاویر حرارتی در مجموعه داده متعلق به ۱۴۰ نفر به دست آمد [۳].

سادوخان و همکاران، در پژوهشی به تشخیص سرطان سینه با استفاده از پردازش تصویر و یادگیری ماشین پرداختند. آنان روش کامپیوتری برای تشخیص سرطان در مراحل اولیه خود را در مدت زمان بسیار کوتاه ارائه دادند. به عبارتی از یادگیری ماشینی برای آموزش مدلی با استفاده از ویژگی‌های پیش‌بینی شده هسته سلول‌ها استفاده نمودند. طی پژوهش آنان، یک مطالعه مقایسه‌ای از دو الگوریتم مختلف K-نزدیکترین همسایگی^۲ و SVM انجام شد که در آن دقت هر طبقه‌بندی اندازه‌گیری شده بود. پس از این، آنان یک تصویر دیجیتالی از آسپیره بافت سینه با استفاده از پردازش تصویر تجزیه و تحلیل کردند تا ویژگی‌های هسته سلول‌ها را دریابند. سپس مقادیر ویژگی را در مدل آموزش دیده خود اعمال نمودند تا متوجه شوند که آیا تومور توسعه یافته خوش‌خیم است یا بدخیم [۴].

ساحنی و میتال، در پژوهشی به بررسی تشخیص سرطان سینه با استفاده از تکنیک‌های پردازش تصویر پرداختند. در کار پیشنهادی، تصاویر دریافتی از ماموگرافی و MRI، به عنوان دو روش در تشخیص تومور، به عنوان ورودی روش مورد استفاده قرار گرفته است. در یک روش، قسمت مرتبط با تومور از تصویر حاصل با روش‌های تقسیم‌بندی مختلف مانند تشخیص لبه و روش آستانه جدا می‌شود. به علاوه عملگرهای مختلفی بر روی تصویر حاصل اعمال شده است و از نظر کمی توسط آنتروپی پارامتر اندازه‌گیری، عملکرد روش تأیید شده است [۵].

آدل و همکاران، در پژوهشی به تشخیص سرطان سینه با استفاده از پردازش تصویر و یادگیری ماشینی برای تصاویر الاستوگرافی پرداختند. در این روش، تکنیک‌های پردازش تصویر برای استخراج ویژگی بر روی تصاویر به دست آمده اعمال می‌شود. در ادامه، روش‌های پیش‌پردازش داده‌ها و تحلیل مؤلفه‌های اصلی به‌عنوان یک تکنیک کاهش ابعاد برای مجموعه داده اعمال می‌شوند. اعتبارسنجی مدل با اعتبارسنجی متقاطع K-fold انجام می‌شود تا از تعمیم الگوریتم اطمینان حاصل شود. سپس دقت، ماتریس سردرگمی و تلفات لجستیک برای الگوریتم مورد استفاده ارزیابی می‌شوند. در این روش، حداکثر دقت طبقه‌بندی در هنگام استفاده از SVM با هسته تابع پایه شعاعی ۹۴/۱۲٪ است [۶].

گاردزی و همکاران، در پژوهشی به تشخیص سرطان پستان با استفاده از داده‌های ماموگرافی پرداختند. این بررسی با هدف بررسی ادبیات سنتی یادگیری ماشین و یادگیری عمیق با کاربرد خاص برای تشخیص سرطان پستان انجام شد. این بررسی همچنین بینشی مختصر در مورد برخی از شبکه‌های یادگیری عمیق معروف ارائه می‌دهد. در پژوهش آنان، مروری بر تکنیک‌های یادگیری ماشین و یادگیری عمیق با کاربرد خاص برای سرطان پستان ارائه شد [۷].

وارلامیس و همکاران، در پژوهشی به "استفاده از تکنیک‌های داده‌کاوی و روش‌های تجزیه و تحلیل داده‌ها برای اندازه‌گیری داده‌های مرگ و میر و عوارض سرطان در یک ثبت سرطان منطقه‌ای: مورد جزیره کرت، یونان" پرداختند. آنان معتقدند که بررسی آمار سرطان بسیار مهم است زیرا این امر مستلزم برنامه‌ریزی طولانی مدت، یادگیری احتمالی و مشاهده مداوم هر بیمار سرطانی است. هدف این مطالعه نشان دادن چگونگی استفاده از فرآیندهای داده‌کاوی برای بهبود نتایج تجزیه و تحلیل آماری از داده‌های ثبت سرطان بود [۸].

تان و همکاران، در پژوهشی به ارتباط بین تغییرات در ویژگی‌های تصویر ماموگرافی و خطر ابتلا به سرطان پستان کوتاه مدت پرداختند. آنان بر اساس بررسی کمی تمایزات ویژگی‌های تصویر ماموگرافی دوطرفه در مجموعه تصاویر ماموگرافی دیجیتال، یک مدل محاسباتی جدید برای پیش‌بینی خطر ابتلا به سرطان پستان در آینده نزدیک توسعه و آزمایش کردند [۹].

یان و همکاران، پیشنهاد دادند از شبکه‌های عصبی خود رمزنگار به عنوان یک دسته‌بندی کننده برای تشخیص مناطق سرطانی پروستات در تصاویر MRI استفاده گردد. در این روش پیشنهادی، روش کمینه‌سازی انرژی برای شناسایی محل نگاشت، با نظر گرفتن ارتباط میان پیکسل‌های مجاور معرفی شد [۱۰].

¹ Bayesian Algorithm

² K-Nearest Neighbors

ژائو و همکاران، در پژوهشی به غربالگری خودکار سلول‌های دهانه رحم با استفاده از پردازش تصویر بلوک، پرداختند. در این مطالعه، یک رویکرد تحلیلی به کمک کامپیوتر برای شناسایی وجود سلول‌های مشکوک در یک تصویر سلولی کامل دهانه رحم پیشنهاد شده است. تفاوت اصلی روش آنان با الگوریتم معمولی در این است که تصویر به جای سلول‌های قطعه‌بندی شده به بلوک‌هایی با اندازه معین تقسیم می‌شود که می‌تواند پیچیدگی محاسباتی را تا حد زیادی کاهش دهد. از طریق تجزیه و تحلیل داده‌ها، برخی از ویژگی‌های بافت و رنگ هیستوگرام تفاوت‌های قابل توجهی را بین بلوک‌های با و بدون سلول‌های مشکوک نشان می‌دهد. بنابراین این ویژگی‌ها را می‌توان به عنوان ورودی طبقه‌بندی کننده SVM استفاده کرد [۱۱].

در [۱۲]، سیواکامی و ساراواثی، در پژوهش خود به بررسی استخراج داده‌های بزرگ: پیش‌بینی سرطان سینه با استفاده از مدل ترکیبی DT-SVM^۱ پرداختند. این مطالعه با استفاده از مجموعه داده‌های سرطان پستان ویسکانسین^۲ انجام شد. در روش ارائه شده در این مقاله دقت به دست آمده ۹۱٪ با ضریب خطای ۲/۵۸٪ بوده است. در این مقاله به مقایسه الگوریتم ارائه شده با دیگر روش‌ها شامل سایر الگوریتم‌های طبقه‌بندی نیز مانند IBL^۳، SMO^۴ و Naïve Bayes^۵ نیز پرداخته شده است. برای JBL، دقت به دست آمده ۸۵/۲۳ درصد با نرخ خطای ۱۲/۶۳ درصد بود. برای SMO، دقت ۷۲/۵۶٪ با نرخ خطا ۵/۹۶٪ بود. برای Naïve Bayes، دقت به دست آمده ۸۹/۴۸٪ با نرخ خطا ۹/۸۹٪ بود. بنابراین این مطالعه مقایسه‌ای نشان داد که DT-SVM بهتر از هر الگوریتم طبقه‌بندی دیگری عمل می‌کند.

۳- روش پیشنهادی

۳-۱- فاز پیش پردازش

دو راهکار عمده برای کاهش ابعاد^۶ مجموعه داده‌ای ارائه شده است: استخراج ویژگی^۷ و انتخاب ویژگی^۸. در استخراج ویژگی، فضای اولیه ویژگی‌ها به یک فضای کوچک‌تر نگاشت می‌شود. در واقع، در این راهکار، با ترکیب ویژگی‌های موجود، تعداد کمتری ویژگی ایجاد می‌شود به طوری که این ویژگی‌ها دارای تمام (یا بخش اعظمی از) اطلاعات موجود در ویژگی‌های اولیه باشند. از طرف دیگر، در انتخاب ویژگی، یک زیرمجموعه از ویژگی‌های اولیه انتخاب می‌شود. انتخاب ویژگی یک تکنیک مهم و پر استفاده در پیش پردازش داده‌ها محسوب می‌شود که موجب افزایش سرعت الگوریتم‌های یادگیری ماشین و بهبود عملکرد طبقه‌بندی کننده می‌شود.

در این مقاله از روش نقشه عدم قطعیت متقارن کلاس-ویژگی انجمنی برای انتخاب ویژگی^۹ استفاده شده است. در این روش، در ابتدای کار نمایش گرافی از ویژگی‌ها استخراج می‌گردد. بدین منظور با بهره‌گیری از یک پارامتر β و مفهوم SU^۹ گراف وزنی به شکل زیر استخراج می‌گردد:

$$w_{ij} = \begin{cases} \beta \frac{\sum_{t \in \{i,j\}} SU(G_t, C)}{2} - (1 - \beta) SU(G_i, G_j), & 0 \leq \beta \leq 1, i \neq j \\ 1, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (1)$$

که به تفکیک مقدار همبستگی-F میان دو ویژگی G_i و G_j و $SU(G_i, C)$ و $SU(G_j, C)$ مقدار وابستگی-T میان دو ویژگی G_i و G_j و کلاس C می‌باشد. برای نرمال سازی وزن‌ها، از روش Softmax استفاده می‌گردد و وزن نهایی براساس رابطه ۲، استخراج می‌گردد:

$$\hat{w}_{ij} = \frac{1}{1 + \exp\left(-\frac{w_{ij} - \bar{w}}{\sigma}\right)} \quad (2)$$

¹ Decision Tree - Support Vector Machine

² Breast Cancer Wisconsin (Diagnostic)

³ Instance-Based Learning

⁴ Sequential Minimal Optimization

⁵ Dimensionality reduction

⁶ Feature extraction

⁷ Feature selection

⁸ Symmetric Uncertainty Class-Feature Association Map (SU-CFAM)

⁹ Symmetric Uncertainty

که در آن به ترتیب، w_{ij} وزن یال بین گره F_i و F_j و \bar{W} و σ میانگین و واریانس تمامی وزن‌های یال‌ها در گراف می‌باشند. پس از اعمال رابطه ۲ بر روی ویژگی‌ها، گرافی حاصل می‌گردد که شباهت میان ژن‌ها و شباهت میان ژن و برچسب کلاس را در برخواهد داشت.

پس از ایجاد گراف در مرحله قبل، الگوریتم Louvain بر روی آن اعمال گردیده و در نهایت خوشه‌های مختلفی از گره‌ها (ژن‌ها)، بر اساس وزن یال‌ها، حاصل می‌گردد. با این کار تمام گره‌های داخل یک خوشه بیشترین میزان شباهت را با هم دارا بوده و گره‌های خارج از آن خوشه کمترین شباهت را با گره‌های یک خوشه دارا می‌باشند. در این مرحله خوشه‌های ایجاد شده را زیرگراف می‌نامیم که ورودی مرحله بعد تلقی می‌گردند. در مرحله انتخاب بهترین ویژگی در هر خوشه، در ابتدا ماتریس‌های مجاورت که ماتریس‌های دودویی می‌باشند ساخته می‌شود. برای تبدیل ماتریس‌های شباهت به ماتریس مجاورت از حد آستانه γ استفاده می‌گردد و هر وزن در گراف مربوطه با این حد آستانه مقایسه می‌گردد،

$$a_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{if } \hat{w}_{ij} > \gamma \text{ and } i \neq j \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (3)$$

که در آن \hat{w}_{ij} وزن نرمال شده است که دربردارنده شباهت میان ویژگی‌ها و ویژگی و کلاس می‌باشد. اعمال رابطه ۳ به زیرگراف‌های حاصل از مرحله قبل، منجر به ایجاد زیرگراف‌های مجاورت می‌شود که به آن نقشه‌های کلاس-ویژگی انجمنی^۱ گفته می‌شود. در ادامه و برای انتخاب بهترین ویژگی‌ها، تمامی CFAM‌های موجود در مجموعه مستقل بیشینه انتخاب می‌گردند [۱۳].

۳-۲- طبقه‌بندی

در یادگیری ماشینی، SVM، که شبکه بردار پشتیبان نیز نامیده می‌شود، یک تکنیک یادگیری نظارت شده است که با یافتن ابر صفحه‌ای که حاشیه بین دو کلاس را به حداکثر می‌رساند، طبقه‌بندی را انجام می‌دهد. مراحل اصلی الگوریتم SVM به شرح زیر ارائه شده است:

- یک ابر صفحه بهینه را تعریف کنید: حاشیه را به حداکثر برسانید.
- تعریف فوق را برای مسائل غیرخطی قابل تفکیک بسط دهید: برای طبقه‌بندی اشتباه یک جریمه (پنالتی) تعریف کنید.
- نداشت داده‌ها به فضای با ابعاد بالا که در آن طبقه‌بندی با سطوح تصمیم خطی آسان‌تر است: مسئله را دوباره فرمول‌بندی کنید تا داده‌ها به طور ضمنی به این فضا نگاشت شوند.

برای جدا کردن دو گروه، ساده‌ترین راه با یک خط مستقیم (۱ بعد)، صفحه مسطح (۲ بعد) یا یک ابر صفحه N بعدی است. با این حال، در برخی موارد، یک منطقه غیرخطی می‌تواند داده‌ها را به طور موثرتری از هم جدا کند. بنابراین، در جایی که نمی‌توان از یک ابر صفحه خطی برای جدا کردن دو گروه استفاده کرد، SVM از دو راه حل استفاده می‌کند، یکی "تابع کرنل" و دیگری "نگاشت داده‌ها به فضای با ابعاد بالا" تا بدین وسیله داده‌ها را برای انجام جداسازی خطی ممکن کند.

۳-۳- نگاشت داده‌ها به فضای با ابعاد بالا

برای نگاشت داده‌ها در فضای جدید، باید تابع $\phi(x)$ را پیدا کنیم. فرمول SVM به صورت زیر می‌شود:

$$\min_{\omega, b} \frac{1}{2} \|\omega\|^2 + C \sum_{i=1}^m \varepsilon_i$$

$$s.t. y^{(i)} (\omega^T x^{(i)} + b) \geq 1 - \varepsilon_i, i=1, \dots, m$$

$$\varepsilon_i \geq 0, i=1, \dots, m \quad (4)$$

¹ Class-Feature Association Maps (CFAM)

که در آن داده‌های آزمایش به صورت زوج مرتب (x_i, y_i) ، بردار نرمال عمود بر ابرصفحه، ε_i متغیر کمکی، می‌باشد. در این حالت داده‌ها به صورت $\phi(x)$ ظاهر می‌شوند و وزن‌های ω اکنون وزن‌هایی در فضای جدید هستند. علاوه بر این، اگر $\phi(x)$ ابعاد بسیار بالایی داشته باشد، نگاشت بسیار پیچیده خواهد شد.

برای این حالت و در مسائل دو کلاسه SVM مسئله لاگرانژ به صورت زیر تعریف می‌شود،

$$\begin{aligned} \max_{\alpha} J(\alpha) &= \sum_{i=1}^m \alpha_i - \frac{1}{2} \sum_{i,j=1}^m \alpha_i \alpha_j y^{(i)} y^{(j)} K(x^{(i)}, x^{(j)}) \\ \text{s.t. } K(x^{(i)}, x^{(j)}) &= \langle \phi(x^{(i)}), \phi(x^{(j)}) \rangle \\ 0 \leq \alpha_i &\leq C, i=1, \dots, m \\ \sum_{i=1}^m \alpha_i y^{(i)} &= 0 \end{aligned} \quad (5)$$

که در آن α همان ضرایب لاگرانژ هستند. حال مساله به یک مساله بهینه‌سازی درجه دوم تبدیل شده و می‌شود آن را با راه حل‌های مربوط به مسائل درجه دوم محاسبه نمود و مقادیر ضرایب لاگرانژ را با آن محاسبه کرد. مقدار ضرایب لاگرانژ برای اعضای عضو بردارهای پشتیبان دارای مقدار و برای باقی اعضا معادل صفر خواهد بود. تفاوتی که در اینجا با حالت خطی مشاهده می‌شود، وجود تابع K است (تابع کرنل) که ضرب داخلی داده‌ها در فضای نگاشت شده است. یعنی ما اول داده‌ها را با تابع کرنل نگاشت داده و پس از آن ضرب داخلی آن را محاسبه می‌کنیم. مساله اصلی در این حالت تعیین معیاری برای تشخیص کلاس داده‌ها است. بر این اساس و با حل مساله لاگرانژ بیان شده در فرمول ۵، به رابطه زیر می‌رسیم که در اصل تعیین کننده کلاس داده‌ها خواهد بود،

$$\begin{aligned} b &= y^{(k)} - \sum_{i,j=1}^m \alpha_i y^{(i)} K(x^{(i)}, x^{(k)}) \\ f(x) &= \text{sign}(\sum_{i,j=1}^m \alpha_i y^{(i)} K(x^{(i)}, x^{(k)}) + b) \end{aligned} \quad (6)$$

همان‌طور که در رابطه فوق می‌بینیم دیگر خبری از ω نیست. فقط کافی است b و مقدار نهایی را با استفاده از ضرب داخلی داده‌ها در فضای نگاشت شده به دست آوریم.

۳-۴- تابع کرنل

زمانی که نگاشت داده‌ها در فضایی با ابعاد بالا بسیار پیچیده است، به عنوان یک راه حل جایگزین، از تابع کرنل استفاده می‌کنیم، که به صورت زیر تعریف می‌شود،

$$K(x, x_i) = (\phi(x_i)^T \cdot \phi(x)) \quad (7)$$

با راه حل تابع کرنل، محاسبه ابرصفحه جداکننده به یافتن $\phi(x)$ نیاز ندارد. بنابراین، می‌توان از هر تابع کرنلی برای توصیف مجدد در فضای با ابعاد بزرگ‌تر استفاده کرد. توابع کرنل مختلفی ارائه شده است، از جمله گوسین، چند جمله‌ای، کوادراتیک و RBF^۱. توجه داشته باشیم که هر تابع کرنل مزایا و معایب خود را دارد. بنابراین انتخاب نوع کرنل و پارامترهای آن به عهده کاربر و بر اساس مسئله پیش رو خواهد بود.

در پژوهش حاضر از کرنل کوادراتیک استفاده شده است. تابع کرنل کوادراتیک (درجه دوم) نسبت به تابع کرنل گاوسی، محاسبات کمتری دارد و می‌تواند به عنوان یک راه حل جایگزین برای زمانی که استفاده از هسته گاوسی بسیار پیچیده می‌شود استفاده شود. تابع کوادراتیک را می‌توان به صورت زیر نوشت،

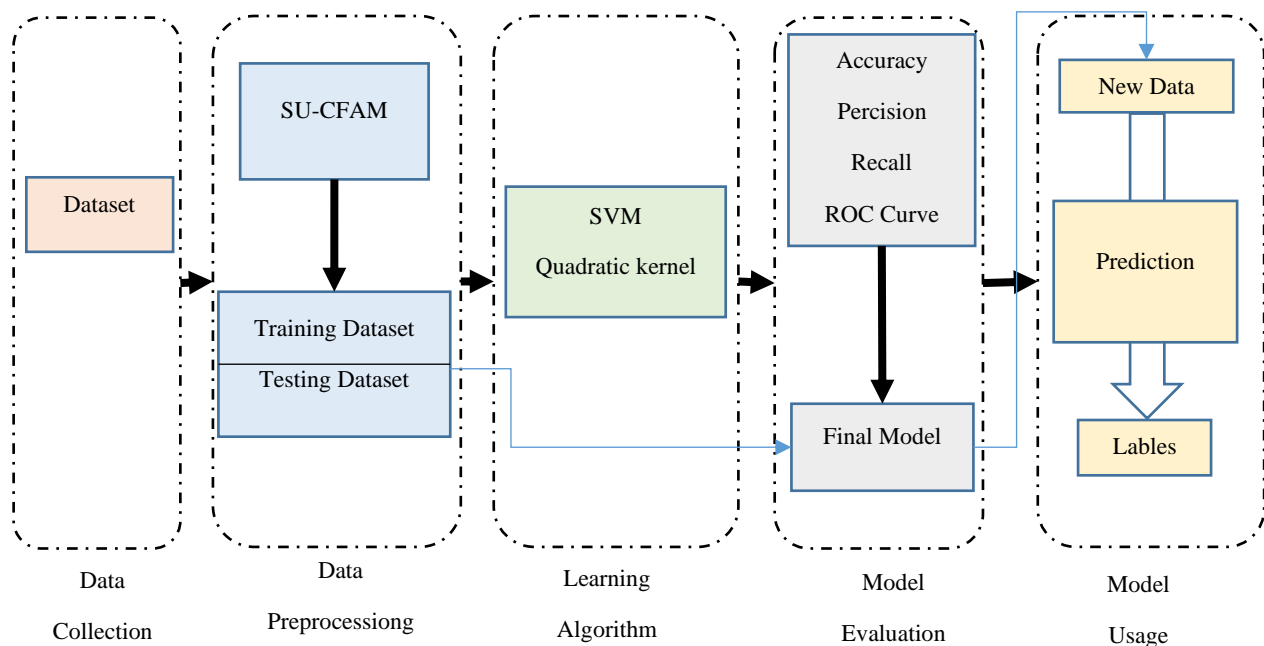
$$K(x, x_i) = ((x * x_i) + 1)^2 \quad (8)$$

کرنل درجه دوم برای تبدیل داده‌های ورودی به فضایی با ابعاد بالاتر استفاده می‌شود که اجازه می‌دهد تا مرزهای تصمیم‌گیری غیرخطی را ایجاد کند. حاصل ضرب نقطه بین دو بردار ورودی و همچنین مربع حاصل ضرب نقطه را محاسبه می‌کند. این بدان معنی است که نه تنها ترکیب خطی متغیرهای ورودی بلکه تعامل آن‌ها را نیز در نظر می‌گیرد. که در آن با اعمال مجموعه

^۱ Radial Basis Function

داده‌های آموزشی به مدل و استفاده از فرمول فوق به عنوان تابع کرنل، سعی در طبقه‌بندی داده‌ها با ضریب دقت بالایی را خواهیم داشت [۱۴].

در این مقاله ماشین بردار پشتیبان انتخابی از کرنل کوادراتیک بهره‌برده و از سوی دیگر با توجه به اهمیت بهره‌گیری از روش‌های انتخاب ویژگی در فاز پیش‌پردازش، از روش CU-CFAM، در فاز پیش‌پردازش، استفاده شده است. این روش انتخاب ویژگی، به دلیل ماهیت گرافی آن دارای سرعت و عملکرد مناسبی می‌باشد و به علاوه امکان بهره‌گیری از آن در حالت با ناظر و بدون ناظر، وجود دارد. دیاگرام روش پیشنهادی در شکل ۱ ارائه شده است.



شکل ۱: بلوک دیاگرام روش پیشنهادی
Figure 1. Diagram of the proposed method

۴- نتایج

در این بخش با استفاده از کدنویسی در محیط اسکریپت نرم‌افزار متلب^۱، نسبت به پیاده‌سازی و بهره‌گیری از روش SU-CFAM در فاز پیش‌پردازش و روش SVM کوادراتیک در فاز طبقه‌بندی، اقدام نموده‌ایم. مجموعه داده مورد استفاده در این مقاله، مجموعه داده مربوط به سرطان سینه دانشگاه ویسکانسین می‌باشد که جزو معتبرترین مجموعه‌های داده این حوزه می‌باشد که در بخش بعد، جزییات آن شرح داده شده است.

با اعمال روش مذکور، نتایج مربوط به دقت تشخیص سیستم آموزش داده شده توسط این روش را مورد بررسی قرار می‌دهیم. در داده‌های فراخوانی شده، بافت‌های سرطانی با عناوین خوش‌خیم (M) و بدخیم (B) علامت‌گذاری شده‌اند و ویژگی‌های مختلف آن‌ها نیز ثبت شده که به عنوان داده‌های آموزشی و تستی به SVM کوادراتیک طراحی شده داده می‌شود تا عمل طبقه‌بندی روی آن‌ها صورت پذیرد.

۴-۱- جامعه آماری و مشخصات نمونه

در مقاله حاضر، داده‌های مربوط به سرطان سینه از دانشگاه ویسکانسین گرفته شده و یکی از معتبرترین و کامل‌ترین داده‌ها در این حوزه می‌باشد و معروف به داده‌ی WDBC^۲ است [۱۵]. بافت‌های سرطانی با عناوین خوش‌خیم و بدخیم علامت‌گذاری

^۱ Matlab R2022b

^۲ Breast Cancer Wisconsin (Diagnostic)

شده‌اند و ویژگی‌های مختلف آن‌ها نیز ثبت شده و به‌عنوان داده‌های آموزشی و تستی به SVM طراحی شده داده می‌شود تا عمل طبقه‌بندی روی آن‌ها صورت پذیرد. مشخصات نمونه‌های استفاده شده به شرح جدول ۱ می‌باشد.

جدول ۱: جزئیات پایگاه داده WDBC
Table 1. WDBC Dataset Details

تعداد کل نمونه: ۵۶۹
تعداد ویژگی‌ها: ۳۲ ویژگی شامل شناسه، لاس (خوش خیم یا بدخیم) و ۳۰ ویژگی ورودی
این ۳۰ ویژگی مذکور شامل ۳ مقدار میانگین، خطای استاندارد و بدترین یا بزرگ‌ترین (میانگین سه مقدار بزرگ) که برای هر کدام از ده ویژگی ذیل (که برای هر دسته سلول محاسبه شده است) به دست آمده:
<ul style="list-style-type: none"> • شعاع (میانگین فواصل مرکز تا نقاط پیرامون) • بافت (انحراف استاندارد مقادیر مقیاس خاکستری) • محیط • مساحت • میزان صاف بودن (تغییر موضعی در طول شعاع) • فشردگی • تقعر (شدت بخش‌های مقعر کانتور) • نقاط مقعر (تعداد قسمت‌های مقعر کانتور) • تقارن • بعد شکست‌آر (فراکتال)

۴-۲- معیارهای ارزیابی

با بهره‌گیری از مقادیر TP به عنوان مثبت صحیح^۱، FP مثبت اشتباه^۲، TN منفی صحیح^۳، FN منفی اشتباه^۴ و Total تعداد کل نمونه‌ها، معیارهای ارزیابی استفاده شده در این مقاله بدین شرح می‌باشند:

• دقت (Accuracy)

متداول‌ترین معیار کارایی برای الگوریتم‌های طبقه‌بندی است که می‌توان آن را در قالب تعداد پیش‌بینی‌های صحیح صورت گرفته به نسبت همه پیش‌بینی‌های صورت گرفته، تعریف کرد.

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

• صحت (Precision)

وقتی که مدل نتیجه را مثبت پیش‌بینی می‌کند، این معیار ارزیابی می‌کند که تا چه اندازه نتیجه حاصله درست می‌باشد. زمانی که ارزش FP بالا باشد، معیار صحت، معیار مناسبی خواهد بود.

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

• Recall

زمانی که ارزش FN بالا باشد، معیار Recall، معیار مناسبی خواهد بود.

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

¹ True Positive

² False Positive

³ True Negative

⁴ False Negative

• منحنی ROC¹:

یکی از روش‌های بررسی و ارزیابی عملکرد دسته‌بندی دودویی، نمودار مشخصه عملکرد است. کارایی الگوریتم‌های دسته‌بندی دودویی معمولاً به وسیله شاخص‌هایی مثل حساسیت² و صراحت³ سنجیده می‌شوند. اما در نمودار ROC هر دوی این شاخص‌ها ترکیب شده و به صورت یک منحنی نمایش داده می‌شوند. در این قسمت به جزییات نتایج حاصل از روش و مقایسه آن با دیگر روش‌ها می‌پردازیم.

در گام اول، روش ارائه شده را بدون بهره‌گیری از روش انتخاب ویژگی CU-CFAM و با استفاده از آن، بررسی می‌کنیم. در جدول ۲ و ۳، به بررسی تعداد موارد درست و نادرست تشخیص و دقت طبقه‌بندی با استفاده از روش SVM کوادراتیک، بدون بهره‌گیری از SU-CFAM و با استفاده از آن می‌پردازیم. همان‌گونه که مشاهده می‌فرمایید روش ارائه شده در زمان عدم استفاده از SU-CFAM به دقت ۹۸/۲٪ و با بهره‌گیری از SU-CFAM در فاز پیش‌پردازش، به دقت ۹۹/۱٪ رسیده است که دقت بسیار مناسبی برای تشخیص این بیماری می‌باشد.

جدول ۲: تعداد موارد درست و نادرست تشخیص (روش SVM کوادراتیک، بدون بهره‌گیری از SU-CFAM و با استفاده از آن)

Table 2. The numbers of true and fals detection (Quadratic SVM, without and with using SU-CFAM)

روش	نوع تشخیص	بدخیم	خوش‌خیم	درصد از داده‌های بدخیم	درصد از داده‌های خوش‌خیم
بدون	درست	۳۵۶ مورد	۲۰۲ مورد	۶۲/۷	۳۵/۶
SU-CFAM	نادرست	۱ مورد	۹ مورد	۰/۲	۱/۶
با	درست	۳۵۷ مورد	۲۰۶ مورد	۶۲/۹	۳۶/۴
SU-CFAM	نادرست	۰ مورد	۵ مورد	۰	۰/۸

جدول ۳: دقت طبقه‌بندی (روش SVM کوادراتیک، بدون بهره‌گیری از SU-CFAM و با استفاده از آن)

Table 3. The accuracy of the detection (Quadratic SVM, without and with using SU-CFAM)

روش	درصد طبقه‌بندی درست نهایی	درصد طبقه‌بندی نادرست نهایی
بدون SU-CFAM	۹۸/۲	۱/۸
با SU-CFAM	۹۹/۱	۰/۹

در جدول ۴، مقایسه‌ای میان بهره‌گیری از توابع مختلف در ماشین بردار پشتیبان مورد استفاده در این مقاله، انجام گرفته است. در این مقایسه برای تمامی روش‌های ارائه شده، در دو حالت بدون بهره‌گیری از SU-CFAM و با استفاده از آن، مقادیر حاصل از دقت، Precision و Recall ارائه شده است. مشاهده می‌شود که در این مقایسه هم روش پیشنهادی به دقت مناسبی در مقایسه با دیگر روش‌ها رسیده است.

جدول ۴: مقایسه استفاده از SVM با کرنل‌های مختلف بدون بهره‌گیری از SU-CFAM و با استفاده از آن بر روی سه پارامتر از دقت، Precision و Recall

Table 4. Comparison of different kernels of SVM without and with using SU-CFAM on three parameters (Accuracy, Precision and Recall)

Recall	Precision	دقت روش	SVM با توابع کرنل متفاوت	کوادرانتیک
۹۶/۵	۹۷/۶	۹۸/۲	بدون SU-CFAM	
۹۷/۳	۹۸/۱	۹۹/۱	با SU-CFAM	
۹۴/۹	۹۳/۲	۹۶/۰	بدون SU-CFAM	گوسی
۹۵/۱	۹۳/۴	۹۷/۱	با SU-CFAM	
۹۶/۴	۹۴/۵	۹۷/۶	بدون SU-CFAM	پایه شعاعی گوسی
۹۶/۳	۹۵/۲	۹۶/۸	با SU-CFAM	(RBF)
۹۵/۱	۹۷/۸	۹۸/۱	بدون SU-CFAM	تانژانت هایپربولیک
۹۷/۱	۹۶/۸	۹۹/۰	با SU-CFAM	(tanh)

¹ Receiver Operating Characteristic (ROC)

² Sensitivity

³ Specificity

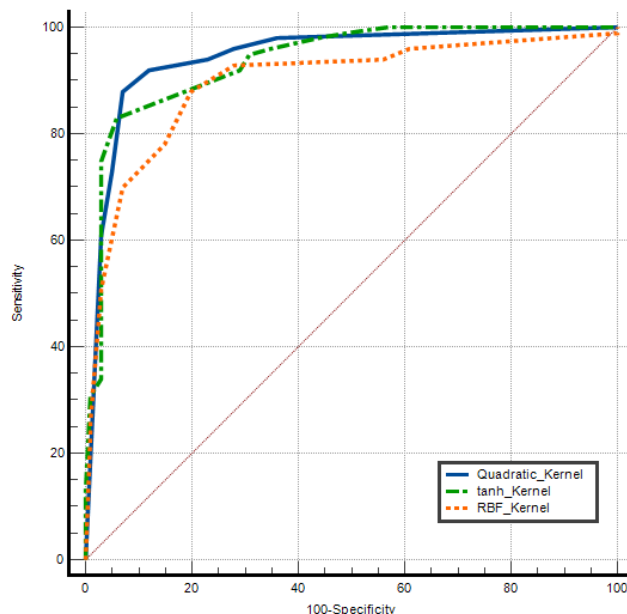
جدول ۵ به مقایسه میان دو روش انتخاب ویژگی PCA^۱ و SU-CFAM در فاز انتخاب ویژگی، می‌پردازد. تحلیل مؤلفه‌های اصلی تبدیلی در فضای برداری است، که تحلیل مجموعه داده‌های بزرگ با تعداد زیادی بعد یا ویژگی، افزایش تفسیرپذیری داده‌ها با حفظ حداکثر مقدار اطلاعات و تجسم داده‌های چندبعدی را فراهم می‌کند. تحلیل مؤلفه‌های اصلی در واقع، یک تکنیک آماری برای کاهش ابعاد یک مجموعه داده است. این کار با تبدیل خطی داده‌ها به یک سیستم مختصات جدید انجام می‌شود که (بیشتر) تغییرات در داده‌ها را می‌توان با ابعاد کمتری نسبت به داده‌های اولیه توصیف کرد. بسیاری از مطالعات از دو مؤلفه اصلی اول برای نمایش داده‌ها در دو بعد و شناسایی بصری خوشه‌های نقاط داده نزدیک به هم استفاده می‌کنند.

جدول ۵: مقایسه استفاده از SVM با کرنل‌های مختلف با بهره‌گیری از PCA و SU-CFAM و بر روی سه پارامتر از دقت، Precision و Recall

Table 5. Comparison of different kernels of SVM with using PCA and SU-CFAM on three parameters (Accuracy, Precision and Recall)

Recall	Precision	دقت روش	SVM با توابع کرنل متفاوت	
۹۷/۳	۹۸/۰	۹۹/۳	روش PCA	کوادراتیک
۹۸/۵	۹۹/۲	۹۹/۵	روش SU-CFAM	
۹۶/۵	۹۴/۵	۹۶/۳	روش PCA	گوسی
۹۵/۷	۹۵/۴	۹۷/۵	روش SU-CFAM	
۹۶/۴	۹۴/۲	۹۸/۳	روش PCA	پایه شعاعی گوسی
۹۷/۲	۹۶/۹	۹۷/۴	روش SU-CFAM	(RBF)
۹۴/۵	۹۷/۲	۹۸/۴	روش PCA	تانژانت هایپربولیک
۹۶/۹	۹۸/۱	۹۸/۱	روش SU-CFAM	(tanh)

شکل ۲، نمودار ROC حاصل از اعمال روش ارائه شده با سه کرنل کوادراتیک، RBF و tanh و با بهره‌گیری از روش انتخاب ویژگی SU-CFAM را نشان می‌دهد. این نمودار نیز نشان‌دهنده برتری استفاده از کرنل کوادراتیک در مقایسه با دیگر کرنل‌ها می‌باشد.



شکل ۲: نمودار ROC حاصل از اعمال روش ارائه شده با سه کرنل کوادراتیک، RBF و tanh و با بهره‌گیری از روش انتخاب ویژگی SU-CFAM

Figure 2. ROC curve of the proposed method with three kernels (Quadratic, RBF and Tanh) with using SU-CFAM

¹ Principal Component Analysis (PCA)

در مقایسه‌ای دیگر، نتایج حاصل از روش نگاشت خودسازمان‌ده^۱ با روش ارائه شده در این مقاله، مورد بررسی قرار گرفت. در هر دو روش از روش انتخاب ویژگی SU-CFAM استفاده شده است. نتایج مقایسه‌ای این دو روش در جدول ۶ و ۷ آورده شده است. با دقت در اعداد جداول فوق و مقایسه با ارقام مربوط به خروجی روش SVM کوادراتیک مشخص می‌شود که درصد دقت نهایی طبقه‌بندی با استفاده از روش این پژوهش به میزان حدوداً ۱۴ درصد بیشتر از روش SOM بوده که این تفاوت فاحش، بیشتر به دلیل طبقه‌بندی موارد خوش‌خیم ایجاد شده است که البته می‌تواند مربوط به تعداد دیتاهای کمتر موارد خوش‌خیم نسبت به دیتاهای موارد بدخیم بوده باشد و همین قضیه نشان می‌دهد روش SVM کوادراتیک پیاده‌سازی شده حتی در مواردی که دیتاهای کمتری در دسترس می‌باشد نیز از دقت بالایی در طبقه‌بندی برخوردار است.

جدول ۶: تعداد موارد درست و نادرست تشخیص (روش SVM کوادراتیک و روش SOM)

روش	نوع تشخیص	بدخیم	خوش‌خیم	درصد از داده‌های بدخیم	درصد از داده‌های خوش‌خیم
پژوهش حاضر	درست	۳۵۷ مورد	۲۰۶ مورد	۶۲/۹	۳۶/۴
	نادرست	۰ مورد	۵ مورد	۰	۰/۸
SOM	درست	۳۵۶ مورد	۱۲۹ مورد	۶۲/۷	۲۲/۷
	نادرست	۱ مورد	۸۲ مورد	۰/۲	۱۴/۴

جدول ۷: دقت طبقه‌بندی (روش SVM کوادراتیک و روش SOM)

روش	درصد طبقه‌بندی درست نهایی	درصد طبقه‌بندی نادرست نهایی
پژوهش حاضر	۹۹/۱	۰/۹
SOM	۸۵/۴	۱۴/۶

در نهایت در جدول ۸، مقایسه‌ای میان روش ارائه شده و دیگر روش‌های ارائه شده در حوزه تشخیص بیماری سرطان سینه بر روی داده‌های مربوط به سرطان سینه از دانشگاه ویسکانسین انجام گرفته است. نگون و همکاران [۱۶] با استفاده از روش استخراج ویژگی و رأی‌گیری جمعی به‌عنوان یکی از الگوریتم‌های یادگیری ماشین در حوزه طبقه‌بندی داده‌های سرطان سینه به دقت ۹۷/۵۰ درصد رسیدند.

جدول ۸: دقت روش‌های طبقه‌بندی در حوزه سرطان سینه

پژوهشگر	سال	روش	درصد دقت طبقه‌بندی
عثمان و همکاران	۲۰۲۰	یادگیری جمعی	۹۷/۰۰
دامیترو و همکاران	۲۰۲۰	الگوریتم بیضین	۷۴/۲۴
نگون و همکاران	۲۰۱۹	استخراج ویژگی و رأی‌گیری جمعی	۹۷/۵۰
کائوشیک و همکاران	۲۰۱۶	شبکه عصبی پرسپترون	۸۳/۵۰
مرت و همکاران	۲۰۱۵	RBF-NN	۸۸/۰۰
مرت و همکاران	۲۰۱۵	KNN	۹۱/۰۹
مرت و همکاران	۲۰۱۵	ANN	۹۷/۵۳
مون و همکاران	۲۰۱۳	یادگیری عمیق	۹۳/۴
پژوهش حاضر		SVM کوادراتیک – بدون SU-CFAM	۹۸/۲
		SVM کوادراتیک – با SU-CFAM	۹۹/۱

در همین حوزه با الگوریتمی دیگر به نام یادگیری جمعی با استفاده از تابع پایه شعاعی (RBF)، عثمان و همکاران [۱۷] به دقت ۹۷/۰۰ درصد دست یافتند.

^۱ Self-organizing map (SOM)

همچنین با الگوریتم بیضین^۱ دامیترو و همکاران [۱۸] به دقت ۷۴/۲۴ درصد و با الگوریتم یادگیری جمعی با استفاده از روش چندلایه پرسپترون (MLP)، کائوشیک و همکاران [۱۹] به دقت ۸۳/۵۰ درصد رسیدند. در مطالعه مرت و همکاران [۲۰] نیز که از داده‌های ویسکانسین برای طبقه‌بندی سرطان سینه استفاده کرده‌اند، عملکرد روش‌های ANN، KNN، RBF-NN بررسی شد. روش ANN با دقت ۹۷/۵۳ درصد و روش KNN با دقت ۹۱/۰۰ درصد و نهایتاً روش RBF-NN با دقت ۸۸ درصد، طبقه‌بندی را انجام دادند. همچنین مون و همکاران [۲۱] با استفاده از روش یادگیری عمیق سعی در طبقه‌بندی داده‌های سرطان سینه داشته‌اند که دقت آن روش را به ۹۳/۴۰ درصد رساندند.

همان‌طور که از درصد دقت روش‌های مورد بررسی در پژوهش‌های دیگر مشخص است، این روش‌ها در بهترین حالت در حدود ۹۷/۵۰ درصد، و در بدترین حالت در حدود ۷۴/۲۴ درصد، از دقت طبقه‌بندی برخوردار بودند و روش اجرا شده در این پژوهش دارای ۹۸/۲۰ درصد دقت طبقه‌بندی بود و این تمایز نشان از عملکرد مطلوب روش SVM کوادراتیک دارد که علاوه بر غیرخطی بودن دارای محاسبات ساده‌تری نسبت به روش‌های فوق‌الذکر نیز می‌باشد.

۵- بحث و نتیجه‌گیری

سرطان سینه به عنوان عامل اصلی مرگ و میر زنان در کشورهای توسعه یافته تبدیل شده است. مؤثرترین راه برای کاهش مرگ و میر ناشی از سرطان سینه، تشخیص زودهنگام آن است. این موضوع نیاز به یک روش تشخیصی دقیق و قابل اعتماد دارد که به پزشکان اجازه می‌دهد تومورهای خوش‌خیم پستان را از بدخیم تشخیص دهند، بدون اینکه مستقیماً به بیوپسی جراحی مراجعه کنند. هدف از این پیش‌بینی‌ها این است که بیماران را به یک گروه "خوش‌خیم" غیر سرطانی یا یک گروه "بدخیم" که سرطانی هستند تخصیص دهند. ذکر این نکته ضروری است که سلول‌های سرطانی ممکن است به سایر قسمت‌های بدن گسترش یابند. در مورد سرطان سینه، آن‌ها از طریق لنف یا خون منتقل می‌شوند. در سناریوی اخیر، سرطان پستان در مرحله پیشرفته خود در نظر گرفته می‌شود و معمولاً مداخله جراحی به نام بیوپسی مورد نیاز است. به شدت توصیه می‌شود که سرطان سینه قبل از پیشرفت در مراحل پیشرفته مهار شود. در این مقاله با در نظر گرفتن اهمیت تشخیص این سرطان، به ارائه راهکاری با حداقل محاسبات لازم پرداختیم. راهکار ارائه شده در فاز پیش‌پردازش داده‌ها، با بهره‌گیری از یک روش مبتنی بر گراف، سعی در حداقل نمودن ویژگی‌های مؤثر داشت. در ادامه و با بهره‌مندی از ماشین بردار پشتیبان کوادراتیک، نسبت به طبقه‌بندی داده‌های ارائه شده در دو گروه خوش‌خیم و بدخیم، اقدام نمودیم. ماشین بردار پشتیبان کوادراتیک، به دلیل ماهیت محاسبات پایین، کمک شایانی در راستای کاهش زمان پردازش و کاهش منابع مورد استفاده می‌نماید. دقت روش ارائه شده در مقایسات انجام شده با دیگر روش‌ها، نشان از موفقیت روش ارائه شده داشت. پیشنهاد می‌گردد در ادامه مسیر این مقاله، مقایساتی با دیگر پایگاه داده‌های موجود در این حوزه انجام گیرد. از سوی دیگر، با توجه به انتخاب روش SU-CFAM در فاز انتخاب ویژگی، که یک روش با ماهیت گرافی است و امکان تعمیم به داده‌ها با تعداد ویژگی بسیار بالا را دارد، پیشنهاد می‌گردد مجموعه داده‌های انتخابی در پژوهش‌های آینده داده‌هایی مشابه داده‌های میکروآرایه باشد.

مراجع

- [1] H. Sung, J. Ferlay, R.L. Siegel, M. Laversanne, I. Soerjomataram, A. Jemal and F. Bray, "Global cancer statistics 2020: GLOBOCAN estimates of incidence and mortality worldwide for 36 cancers in 185 countries," *CA Cancer J. Clin.*, vol. 71, no. 3, 2021, doi: 10.3322/caac.21660.
- [2] H. Zerouaoui and A. Idri, "Reviewing machine learning and image processing based decision-making systems for breast cancer imaging," *Journal of Medical Systems*, vol. 45, no. 8, pp. 1-20, 2021, doi: 10.1007/s10916-020-01689-1.

¹ Bayesian classification

- [3] S. Ekici and H. Jawzal "Breast cancer diagnosis using thermography and convolutional neural networks," *Medical hypotheses*, vol. 137, p. 109542, 2020, doi: 10.1016/j.mehy.2019.109542.
- [4] S. Sadhukhan, N. Upadhyay and P. Chakraborty, "Breast cancer diagnosis using image processing and machine learning," in *Emerging Technology in Modelling and Graphics*, vol. 937, pp. 113-127, 2020, doi: 10.1007/978-981-13-7403-6_12.
- [5] P. Sahni and N. Mittal "Breast cancer detection using image processing techniques," in *Advances in interdisciplinary engineering*, pp. 813-823, 2019, doi: 10.1007/978-981-13-6577-5_79.
- [6] M. Adel, A. Kotb, O. Farag, M. S. Darweesh and H. Mostafa, "Breast Cancer Diagnosis Using Image Processing and Machine Learning for Elastography Images," *International Conference on Modern Circuits and Systems Technologies (MOCASST)*, Thessaloniki, Greece, 2019, pp. 1-4, doi: 10.1109/MOCASST.2019.8741846.
- [7] S. J. S. Gardezi, A. Elazab, B. Lei and T. Wang "Breast cancer detection and diagnosis using mammographic data: Systematic review," *Journal of medical Internet research*, vol. 21, no. 7, p. e14464, 2019, doi: 10.2196/14464.
- [8] I. Varlamis, I. Apostolakis, D. Sifaki-Pistolla, N. Dey, V. Georgoulas and C. Lionis "Application of data mining techniques and data analysis methods to measure cancer morbidity and mortality data in a regional cancer registry: The case of the island of Crete, Greece," *Computer methods and programs in biomedicine*, vol. 145, pp. 73-83, 2017, doi: 10.1016/j.cmpb.2017.04.011.
- [9] M. Tan, B. Zheng, J. K. Leader and D. Gur, "Association Between Changes in Mammographic Image Features and Risk for Near-Term Breast Cancer Development," in *IEEE Transactions on Medical Imaging*, vol. 35, no. 7, pp. 1719-1728, July 2016, doi: 10.1109/TMI.2016.2527619.
- [10] K. Yan *et al.*, "Comprehensive autoencoder for prostate recognition on MR images," *IEEE 13th International Symposium on Biomedical Imaging (ISBI)*, Prague, Czech Republic, 2016, pp. 1190-1194, doi: 10.1109/ISBI.2016.7493479.
- [11] M. Zhao, A. Wu, J. Song, X. Sun and N. Dong, "Automatic screening of cervical cells using block image processing," *Biomedical engineering online*, vol. 15, no. 1, pp. 1-20, 2016, doi: 10.1186/s12938-016-0131-z.
- [12] K. Sivakami and N. Saraswathi, "Mining big data: breast cancer prediction using DT-SVM hybrid model," *International Journal of Scientific Engineering and Applied Science (IJSEAS)*, vol. 1, no. 5, pp. 418-429, 2015.
- [13] S. Bakhshandeh, R. Azmi and M. Teshnehlab, "Symmetric uncertainty class-feature association map for feature selection in microarray dataset," *Int. J. Mach. Learn. and Cyber.*, vol. 11, pp. 15-32, 2020, doi: 10.1007/s13042-019-00932-7.
- [14] A. Shmilovici, "Support Vector Machines," in *Data Mining and Knowledge Discovery Handbook*, Springer, Boston, MA, 2005, pp. 257-276, doi: 10.1007/0-387-25465-X_12.
- [15] <https://archive.ics.uci.edu/dataset/17/breast+cancer+wisconsin+diagnostic>.
- [16] Q. H. Nguyen *et al.*, "Breast Cancer Prediction using Feature Selection and Ensemble Voting," *International Conference on System Science and Engineering (ICSSE)*, Dong Hoi, Vietnam, 2019, pp. 250-254, doi: 10.1109/ICSSE.2019.8823106.

- [17] A. H. Osman and H. M. A. Aljahdali, "An Effective of Ensemble Boosting Learning Method for Breast Cancer Virtual Screening Using Neural Network Model," in *IEEE Access*, vol. 8, pp. 39165-39174, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.2976149.
- [18] D. Dumitru, "Prediction of recurrent events in breast cancer using the Naive Bayesian classification," *Annals of the University of Craiova*, vol. 36, no. 2, 2009.
- [19] D. Kaushik and K. Kaur, "Application of Data Mining for high accuracy prediction of breast tissue biopsy results," *Third International Conference on Digital Information Processing, Data Mining, and Wireless Communications (DIPDMWC)*, Moscow, Russia, 2016, pp. 40-45, doi: 10.1109/DIPDMWC.2016.7529361.
- [20] A. Mert, N. Kılıç, E. Bilgili and A. Akan, "Breast cancer detection with reduced feature set," *Computational and Mathematical Methods in Medicine*, 2015, doi: 10.1155/2015/265138.
- [21] W. K. Moon *et al.*, "Classification of breast tumors using elastographic and B-mode features: comparison of automatic selection of representative slice and physician-selected slice of images," in *Ultrasound in medicine and biology*, vol. 39, no. 7, pp. 1147-1157, 2013, doi: 10.1016/j.ultrasmedbio.2013.01.017.

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. 14/ No. 53/Autumn 2024

Research Article

A Single Stage Dynamic Transmission Expansion Planning Model in the Competitive Market

Hamid Gorjipour, PhD Student^{1*}  | Mojtaba Najafi, Associate Professor²  | Naghi Moaddabi Pirkolachi, Assistant Professor³ 

¹Department of Electrical Engineering, Bushehr Branch, Islamic Azad University, Bushehr, Iran, hamid.gorjipour@yahoo.com

²Department of Electrical Engineering, Bushehr Branch, Islamic Azad University, Bushehr, Iran, mojtaba.najafi@iau.ac.ir

³Department of Electrical Engineering, Bushehr Branch, Islamic Azad University, Bushehr, Iran, nimamoaddabi@aut.ac.ir

Correspondence

Mojtaba Najafi, Associate Professor of Electrical Engineering, Bushehr Branch, Islamic Azad University, Bushehr, Iran, mojtaba.najafi@iau.ac.ir

Received: 22 June 2022

Revised: 4 September 2022

Accepted: 8 October 2022

Abstract

Transmission Expansion planning (TEP) recommends the most beneficial investment to construct/ reinforce the power system. In this short or middle time planning the annual load growth of the power system must be met considering the stability, security and reliability of the network. In the competitive market the planners can include market behavior in the TEP to manage the congestion. Before traditional TEP, the local marginal pricing (LMP) is calculated offline without considering the dependency of the LMP to the network topology. But, the LMP is not constant during the TEP and must be included in the model dynamically. Here, the dynamic dependency of LMP to the transmission system topology is modelled as a single stage mixed-integer linear programming and solved by YALMIP and MOSEK software. The proposed model is more realistic; however, it takes more computation time. The single stage means the simultaneous calculation of LMPs and expansion planning in the model. The model has been applied to Garver 6-bus and the IEEE 24-bus network. The effect of interest rate, the load to generation capacity factor and load growth on the TEP model are analysed. The model considers the contingency of line outages and presents a robust solution to guarantee the system security. It offers flexible solutions with higher cost.

Keywords: Transmission Expansion Planning, Competitive Market, Local Marginal Pricing, Line Congestion.

Highlights

- Presenting a new MILP model of Transmission Expansion Planning in the competitive market
- Presenting a dynamic Local Marginal Pricing (LMP)-based Planning without computing the LMP separately
- Integration of two optimization solver called MOSEK and YALMIP to accelerate the computation accurately
- Implementing the model in Garver 6bus and IEEE 24bus networks
- Considering the contingency and present a robust model

Citation: M. Najafi, H. Gorjipour, and N. Moaddabi Pirkolachi "A Single Stage Dynamic Transmission Expansion Planning Model in the Competitive Market," *Journal of Southern Communication Engineering*, vol. 14, no. 53, pp. 15–28, 2024, doi: 10.30495/jce.2022.1961298.1163, [in Persian].

مقاله پژوهشی

مدل برنامه ریزی پویا تک مرحله ای توسعه شبکه انتقال در بازار برق رقابتی

حمید گرجی پور*^۱ | مجتبی نجفی*^۲ | نقی مودبی پیرکلاچاهی^۳ ID

چکیده:

برنامه ریزی توسعه انتقال با هدف تقویت و نوسازی تجهیزات شبکه انجام می شود. در این برنامه ریزی، رشد سالانه بار تأمین می شود تا امنیت شبکه برقرار شود. در بازار برق رقابتی، این برنامه ریزی با هدف کاهش پرشدگی خطوط انجام می شود. در مدل های پیشین، قیمت گذاری حاشیه محلی با استفاده از پخش بار محاسبه می شد و سپس بر اساس آن، برنامه ریزی توسعه انتقال اجرا می شد. مشکل این روش، عدم در نظرگیری ارتباط قیمت گذاری حاشیه محلی به تغییرات پیکربندی شبکه بود. به بیان بهتر، قیمت گذاری حاشیه محلی در زمان اجرای برنامه ریزی توسعه انتقال، ثابت نیست و باید به صورت دینامیکی در مدل در نظر گرفته شود. در این مقاله وابستگی دینامیکی قیمت گذاری حاشیه محلی به تغییر آرایش شبکه انتقال و پیشامدهای ناگهانی در شبکه مدل شده است. این مدل به صورت برنامه ریزی خطی عدد صحیح تک مرحله ای درآمده است و با ادغام نرم افزارهای YALMIP و موسک (Mosek) حل شده است. مدل پیشنهادی به واقعیت نزدیک تر است، هرچند زمان محاسبات بیشتری نیاز دارد. منظور از مدل تک مرحله ای، محاسبه هم زمان قیمت گذاری حاشیه محلی و برنامه ریزی توسعه است. شبکه ۶ باس گارور و ۲۴ باس IEEE بررسی شده است. اثرات مربوط به نرخ بهره، نسبت بار به ظرفیت تولید، نرخ رشد بار در مدلسازی بررسی شده است. مدل مبتنی بر پیشامدهای ناگهانی با در نظرگیری خرابی خطوط انتقال ارائه شده است و راه کاری مقاوم و قابل اعتماد ارائه شده است که امنیت شبکه را در دسته پیشامدهای احتمالی از پیش تعیین شده تضمین می کند. این مدل پرهزینه تر اما منعطف تر از مدل های پیشین است.

کلیدواژه ها: برنامه ریزی توسعه انتقال، بازار رقابتی، پرشدگی خطوط انتقال، قیمت گذاری حاشیه محلی

^۱ دانشکده مهندسی برق، واحد بوشهر، دانشگاه آزاد اسلامی، بوشهر، ایران hamid.gorjipour@yahoo.com

^۲ دانشکده مهندسی برق، واحد بوشهر، دانشگاه آزاد اسلامی، بوشهر، ایران mojtaba.najafi@iau.ac.ir

^۳ دانشکده مهندسی برق، واحد بوشهر، دانشگاه آزاد اسلامی، بوشهر، ایران nimamoadabi@aut.ac.ir

نویسنده مسئول

*مجتبی نجفی، دانشیار دانشکده مهندسی برق، واحد بوشهر، دانشگاه آزاد اسلامی، بوشهر، ایران . mojtaba.najafi@iau.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱ تیر ۱۴۰۱

تاریخ بازنگری: ۱۳ شهریور ۱۴۰۱

تاریخ پذیرش: ۱۶ مهر ۱۴۰۱

<https://doi.org/10.30495/jce.2022.1961298.1163>

۱- مقدمه

برنامه ریزی توسعه شبکه انتقال یک مسئله بهینه سازی است که هدف آن تأمین رشد بار شبکه از طریق احداث خطوط انتقال جدید است [۱]. تاکنون مدل های بسیاری از برنامه ریزی توسعه شبکه انتقال ارائه شده است که به دو دسته خطی و غیرخطی تقسیم می شوند. در نظرگیری مکان یابی ادوات منعطف انتقال توان AC در مسئله یکی عواملی است که منجر به غیرخطی شدن

مسئله می‌گردد که برای حل آن از راه‌کار بهینه‌سازی چندمرحله‌ای تجزیه بندرز^۱ استفاده شده است [۲]. در نظرگیری قیود مربوط به پخش بار AC یکی دیگر از عواملی است که منجر به غیرخطی شدن مسئله شده است که برای حل آن از تفکیک مسئله غیرخطی به دو زیر مسئله برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح و برنامه‌ریزی غیرخطی استفاده شده است [۳]. در نظرگیری رفتار غیرخطی بارهای پاسخ‌گو عامل تأثیرگذار دیگری در غیرخطی شدن مدل مسئله به شمار می‌آید که با روش فرآیند تحلیلی سلسله مراتبی و اولویت‌بندی بر اساس بیشترین شباهت به جواب ایده‌آل حل شده است [۴]. افزودن اثرات رخدادهای ناگهانی در مسئله برنامه‌ریزی توسعه منجر به استخراج مدل‌های غیرخطی مبتنی بر ریسک شده است برای حل آن از روش‌های آزادسازی مک کورمیخ^۲ و برنامه‌ریزی مخروطی^۳ استفاده شده است [۵]. همچنین ترکیب نمودن قیود مربوط به تاب‌آوری شبکه انتقال در شرایط وقوع حوادث طبیعی از جمله مواردی است که مدل را غیرخطی نموده است که توسط الگوریتم جستجوی هارمونی^۴ در چهار مرحله حل شده است [۵].

از دیدگاه لحاظ نمودن بازار برق در مطالعات برنامه‌ریزی توسعه شبکه انتقال می‌توان این تحقیقات را به دو گروه مبتنی بر بازار برق تک قطبی سنتی و بازار برق تجدید ساختار یافته رقابتی تقسیم نمود. در بازارهای برق تک قطبی برنامه‌ریزی تنها با هدف سودرسانی به یکی از بازیگران صورت می‌گیرد [۶]. اما در بازار برق رقابتی منفعت هر یک از مشارکت‌کنندگان تولید، انتقال و توزیع در نظر گرفته می‌شود، تا مصالحه‌ای میان اهداف مختلف بهره‌برداری شبکه به دست آید [۷].

به تدریج با گسترش بازار برق و رقابتی شدن آن، تلاش‌های متعددی جهت مدیریت ازدحام خطوط شبکه و در نظرگیری ساختار بازار در بهینه‌سازی برنامه‌ریزی توسعه صورت گرفت. بیشتر این روش‌ها منجر به مدل‌های غیرخطی از مسئله شده‌اند. برنامه‌ریزی توسعه شبکه انتقال در حضور بازار برق مبتنی بر مزایده دوبل مدلی غیرخطی است که با هدف افزایش مشارکت شرکت‌های تولید و توزیع برق صورت گرفته است و با روش دو مرحله‌ای (انتخاب تقریبی خطوط و تعیین دقیق بهترین خط) مورد حل قرار گرفته است [۸]. مدل غیرخطی دیگری مبتنی بر بازار برق کشور آلمان در [۹] ارائه شده است که از مدل غیر کاهش یافته شبکه استفاده شده است. ادغام نمودن مدیریت ازدحام خطوط انتقال و تلفات شبکه در حضور بازار برق در به صورت غیرخطی مدل شده است که برای حل آن از ترکیب منطق فازی با الگوریتم ژنتیک استفاده شده است.

با تجدید ساختار بازار برق و تشکیل محیط‌های رقابتی، مدل برنامه‌ریزی توسعه شبکه انتقال به صورت مسائل غیر محدب درآمده است. قیمت‌گذاری مکانی، مدیریت پرشدگی و... اهمیت بیشتری نسبت به گذشته پیدا کرده است؛ بنابراین تلاش‌های متعددی برای مدل‌سازی ساختار بازار برق در برنامه‌ریزی توسعه انتقال انجام شده است که بیشتر منجر به پیچیدگی بیشتر مدل شده است.

ادغام برنامه‌ریزی‌های کوتاه مدت پاسخگویی بار و مدیریت منابع تجدید پذیر انرژی منجر به نامحدب شدن مدل برنامه‌ریزی توسعه انتقال شده است که با روش‌های مرتب‌سازی غیر مغلوب حل شده است [۱۰]. در یک بهینه‌سازی مقاوم تطبیقی ارائه شده است که در آن قیود غیرخطی به مساله برنامه‌ریزی عدد صحیح افزوده شده است [۱۱]. یک مدل چند هدف نیز در [۱۲] ارائه شده است که هزینه‌های مربوط به سرمایه‌گذاری اولیه، هزینه ازدحام و بارزدایی گنجانده شده است. برای حل این مسئله، از الگوریتم ژنتیک چندهدفه و منطق فازی استفاده شده است. همچنین مکان‌یابی و ظرفیت‌یابی بهینه فناوری‌های جدید استاتکام^۵ در برنامه‌ریزی توسعه خطوط انتقال گنجانده شده است [۱۳]. مدل‌های برنامه‌ریزی توسعه شبکه انتقال در بازارهای تجدید ساختار یافته از دیدگاه‌های مختلفی بررسی شده است که در [۱۴] مرور شده است که شامل قیمت‌گذاری مکانی، مدیریت ازدحام و مدیریت ریسک می‌باشد. همچنین ساختارهای مختلف مدل‌های مبتنی بر بازار در [۱۵] ارائه شده است. در گروه اول بازارهای برق کامل قرار دارند و در گروه دوم بازارهای سلسله مراتبی تک قطبی (یک رهبر و چند پیرو) قرار دارند.

برای کاهش اختلاف قیمت‌گذاری‌های حاشیه محلی در بازارهای برق استراتژی‌های مختلفی ارائه شده است. یکی از راهکارهای کارآمد نصب تولیدات پراکنده در نزدیکی بارها به صورت محلی است. ادغام برق بادی در برنامه‌ریزی توسعه انتقال یکی از این

¹ Benders

² McCormick

³ Conic Programming

⁴ Harmony Search Algorithm

⁵ STATCOM

راهکارها است [۱۶]. راهکار دیگر مشارکت شرکت های تولید برق به عنوان سرمایه گذار در برنامه ریزی توسعه انتقال است تا هم محدودیت بودجه توسعه انتقال را کاهش دهد و هم تأخیر زمانی نصب آن ها را برطرف نماید [۱۷].

در مدیریت ازدحام شبکه نیاز به محاسبه قیمت گذاری حاشیه محلی است که انواع روش های محاسبه این نوع قیمت در [۱۸] ارائه شده است. مساله مهم این است که این محاسبات چگونه در برنامه ریزی توسعه انتقال گنجانده شود. یک روش دو سطحی در معرفی شده است که در آن قیمت گذاری حاشیه محلی در سطوح مختلف بدون در نظرگیری هیچ گونه پیشامدی در شبکه محاسبه شده است. در یک مرحله قیمت گذاری حاشیه محلی محاسبه می شود و در مرحله دیگر توسعه با ثابت در نظر گرفتن مقدار قیمت گذاری حاشیه محلی انجام می شود.

در این تحقیق، هدف ارائه مدلی تک مرحله ای در برنامه ریزی توسعه شبکه های انتقال در بازار برق رقابتی است. در این روش برخلاف روش های سنتی نیازی به محاسبه قیمت گذاری حاشیه ای محلی نیست و برنامه به نوعی طراحی می شود که هم بهترین توپولوژی شبکه و هم قیمت گذاری حاشیه محلی آن به طور هم زمان به دست آید؛ بنابراین این روش بدون نیاز به استفاده از روش های تجزیه بهینه سازی، می تواند توسط نرم افزارهای برنامه ریزی توسعه شبکه انتقال حل شود. این روش می تواند امکان دستیابی به جواب های سراسری مسئله را به همراه داشته باشد. مقایسه میان روش مبتنی بر بازار برق سنتی، تجدید ساختار یافته و رقابتی نیز در این مقاله ارائه خواهد شد. نتیجه مربوط به آزمودن این روش در دو شبکه ۶ باس و ۲۴ باس IEEE نیز ارائه خواهد شد.

سایر بخش های مقاله به صورت ذیل سازمان دهی شده است. در بخش ۲ توصیف سیستم و مدل سازی آن ارائه شده است. در بخش ۳ مشخصات شبکه مورد بررسی، سناریوها و تحلیل های مقاله ارائه شده است. بخش ۴ نیز به نتیجه گیری اختصاص یافته است.

۲- مدل سازی

۲-۱- مدل برنامه ریزی توسعه انتقال مقید به پیشامد ناگهانی

مجهول مسئله مکان و زمان بهینه تقویت یا احداث خطوط جدید است که با هدف کاهش هزینه های توسعه و بهره برداری شبکه و با در نظرگیری انواع محدودیت های فنی و اقتصادی صورت می گیرد. در مسائل سنتی برنامه ریزی توسعه شبکه انتقال، ساختار شبکه انتقال و پخش بار بهینه معمولاً چندان در نظر گرفته نمی شود. اما در مدل های جدید همواره قیود مربوط به پخش بار در مسئله نقش حیاتی ایفا می نمایند. متغیرهای بهینه سازی شامل وضعیت سرمایه گذاری هر خط در هر سال $X_{ij,y}^{Invest,Tr}$ ، تعداد خطوط جدید احداث شده میان دو باس $n_{ij,y}^{invest,Tr}$ ، توان اکتیو تولیدی هر نیروگاه در هر سال $P_{g,l,v,y,cntg}^{gen}$ ، توان تأمین نشده در هر باس $P_{i,l,v,y,cntg}^{shed}$ می باشد.

به طور کلی تابع هدف یک مسئله برنامه ریزی توسعه تولید به صورت مجموع هزینه های احداث، بهره برداری شبکه و هزینه قابلیت اطمینان نمایش داده می شود:

$$C_{TEP}^{Total} = \frac{1}{N_{cntg}} \sum_{cntg} (C_{TEP}^{Investment} + C_{TEP,cntg}^{Operation} + C_{TEP,cntg}^{Reliability}) \quad (1)$$

که در این رابطه هزینه کل برنامه ریزی توسعه شبکه C_{TEP}^{Total} به صورت مجموع هزینه سرمایه گذاری، هزینه بهره برداری از شبکه و هزینه تأمین قابلیت اطمینان شبکه نوشته شده است و تعریف هر یک از این هزینه ها به ترتیب در رابطه ۲ الی ۴ بیان شده است:

$$C_{TEP}^{Investment} = \sum_{y \in \Omega^{year}} \sum_{ij \in \Omega^{lr}} (1+ir)^{y-1} c_{ij}^{Invest} n_{ij,y}^{invest,Tr} \quad (2)$$

$$C_{TEP,cntg}^{Operation} = P^{base} \sum_{y \in \Omega^{year}} \sum_{lv \in \Omega^{level}} \sum_{g \in \Omega^{gen}} (1+ir)^{y-1} c_g^{oper} h_{g,l,v}^{oper} P_{g,l,v,y,cntg}^{gen} \quad (3)$$

$$C_{TEP,cntg}^{Reliability} = P^{base} \sum_{y \in \Omega^{year}} \sum_{lv \in \Omega^{level}} \sum_{i \in \Omega^{bus}} (1+ir)^{y-1} c_{b,l,v}^{lshed} h_{b,l,v}^{lshed} P_{i,l,v,y,cntg}^{lshed} \quad (4)$$

تعریف هر یک از نمادهای روابط ۲ تا ۴ در جدول علائم و نمادهای اختصاری ذکر شده است. در این رابطه C_{ij}^{oper} ، C_{ij}^{Invest} ، $P_{g,lv,y}^{loadshed}$ ، $P_{b,lv,y}^{load}$ ، $P_{b,lv,y}^{base}$ و $P_{b,lv,y}^{shd}$ به ترتیب توان اکتیو پایه (۱۰۰ مگاوات)، هزینه سرمایه‌گذاری احداث خطوط جدید (دلار)، قیمت حاشیه‌ای توان تولیدی هر نیروگاه (دلار بر مگاوات ساعت)، زمان بهره‌برداری هر نیروگاه، و زمان بارزدایی هر باس به ترتیب هستند.

این هزینه‌ها در برنامه‌ریزی توسعه شبکه انتقال باید کمینه‌سازی شود؛ اما جواب‌ها باید در محدوده مجاز خود قرار گیرد؛ بنابراین قیود مرزی متعددی باید برآورده شود. توازن توان تولیدی و مصرفی در هر یک از بازه‌های زمانی و سطوح مختلف بار طبق رابطه ۵ اعمال می‌شود.

$$\sum_{g \in \Omega_{bus}^{gen}} P_{g,lv,y} + P_{b,lv,y}^{loadshed} - P_{b,lv,y}^{load} = \sum_{j \in \Omega_{bus}^{br}} P_{bj,lv,y}, \forall b \in \Omega^{Bus}, lv \in \Omega^{level}, y \in \Omega^{year} \quad (5)$$

که در سمت چپ این معادله مجموع توان تولیدی هر باس، $P_{b,lv,y}^{loadshed}$ توان بارزدایی شده هر باس و $P_{b,lv,y}^{load}$ توان مصرفی هر باس است. سمت راست این رابطه نیز توان خالص انتقالی به خطوط متصل به آن باس است. لازم به ذکر است که تمامی توان‌ها به صورت پریونیت^۱ نگاشته شده‌اند.

محدودیت توان تولیدی نیروگاه‌ها در هر یک از بازه‌های زمانی و سطوح بار در رابطه ۶ نشان داده شده است:

$$P_g^{min} \leq P_{g,lv,y} \leq P_g^{max}, \forall g \in \Omega^{Gen}, lv \in \Omega^{level}, y \in \Omega^{year} \quad (6)$$

توان عبوری از خطوط نیز طبق رابطه ۷ در هر شرایطی در محدوده مجاز خود باید قرار گیرد:

$$-P_{ij}^{max} \gamma_{ij,y} \leq P_{ij,lv,y} \leq P_{ij}^{max} \gamma_{ij,y}, \forall ij \in \Omega^{Br}, lv \in \Omega^{level}, y \in \Omega^{year} \quad (7)$$

بارزدایی شبکه نیز مقداری نامنفی و کمتر از حداکثر بار مصرفی مستقر در آن باس باید باشد.

$$0 \leq P_{b,lv,y}^{loadshed} \leq P_{b,lv,y}^{load}, \forall b \in \Omega^{Bus}, lv \in \Omega^{level}, y \in \Omega^{year} \quad (8)$$

طبق رابطه ۹ تعداد خطوط نصب شده در بین هر دو باس بزرگ‌تر از مقدار متغیر وضعیت احداث آن خط و کوچک‌تر از حداکثر مقدار مجاز بودجه در نظر گرفته شده برای آن است:

$$x_{ij,y}^{invest,Tr} \leq n_{ij,y}^{invest,Tr} \leq n_{max}^{invest,Tr} \times x_{ij,y}^{invest,Tr}, \forall ij \in \Omega^{br}, y \in \Omega^{year} \quad (9)$$

همچنین ارتباط میان تعداد کل خطوط انتقال نصب شده میان دو باس در هر سال، و تعداد خطوط نصب شده در سال‌های قبل به صورت روابط ۱۰ و ۱۱ است:

$$x_{ij,y}^{invest,Tr} \leq n_{ij,y}^{invest,Tr} \leq n_{max}^{invest,Tr} \times x_{ij,y}^{invest,Tr}, \forall ij \in \Omega^{br}, y \in \Omega^{year} \quad (10)$$

$$x_{ij,y}^{invest,Tr} \leq n_{ij,y}^{invest,Tr} \leq n_{max}^{invest,Tr} \times x_{ij,y}^{invest,Tr}, \forall ij \in \Omega^{br}, y \in \Omega^{year} \quad (11)$$

که در این رابطه $x_{ij,0}^{Tr}$ نشان دهنده وضعیت اولیه خطوط قبل از برنامه‌ریزی است. در نهایت تعریف نوع هر یک از متغیرها در رابطه ۱۲ بیان شده است:

$$\begin{aligned} x_{ij,y}^{invest,Tr} &\in \{0,1\} \\ n_{ij,y}^{invest,Tr}, y_{ij,y}^{Tr} &\in \mathbb{Z} \end{aligned} \quad (12)$$

$$P_{g,lv,y,contg}^{gen}, P_{i,lv,y,contg}^{shd}, P_{ij,lv,y,contg} \in \mathbb{R}$$

رشد سالانه بار و ظرفیت تولید نیز در روابط زیر بیان شده است:

$$P_{i,lv,y,contg}^{load} = (1+k^{Load}) P_{i,lv,y-1,contg}^{load} \quad (13)$$

$$P_{g,lv,y,contg} = (1+k^{gen}) P_{g,lv,y-1,contg} \quad (14)$$

که در این روابط k^{load} و k^{gen} به ترتیب ضریب رشد بار و تولید می باشد.

۲-۲- مدل برنامه‌ریزی توسعه انتقال مقید به پیشامد ناگهانی در بازار رقابتی

مدل برنامه‌ریزی توسعه تولید در بازارهای برق رقابتی هزینه ازدحام شبکه را نیز در برمی‌گیرد که به صورت یک عبارت در تابع هدف گنجانده می‌شود:

¹ Per-unit

$$C_{TEP}^{Market} = C_{TEP}^{Total} + \sum_{y \in \Omega^{year}} \sum_{lv \in \Omega^{level}} \sum_{ij \in \Omega^{Br}} P_{ij,lv,y} (Lmp_{i,lv,y} - Lmp_{j,lv,y}) \quad (15)$$

رابطه ۱۵ بیان می کند که در صورت اختلاف قیمت بالا میان دو باس شبکه،س توان عبوری از خط واصل میان این دو باس کمینه شود تا در صورت نیاز به عبور توان بیشتر از حد، چندان هزینه شبکه افزایش نیابد. محاسبه قیمت گذاری حاشیه ای فرآیندی است که چندان راه حل یا فرمول صریحی برای محاسبه آن ارائه نشده است. محاسبه این مقادیر توسط حل یک مسئله بهینه سازی مجزا معمولاً حل می شود. نکته مهم این است که این پارامتر تابع ساختار شبکه، وضعیت پخش بار شبکه و وابسته است، بنابراین در هر یک از سال ها، سطوح بارگذاری و ... باید محاسبه شود. در فرآیند توسعه شبکه انتقال، هر یک جواب ها نیازمند محاسبه قیمت گذاری حاشیه محلی^۱ خاص خود هستند، بنابراین اگر فرآیند محاسبه قیمت گذاری جدا از فرآیند توسعه شبکه باشد، تعداد بهینه سازی ها به شدت افزایش خواهد یافت. بنابراین در این مقاله، راه کاری ارائه شد که محاسبه قیمت گذاری حاشیه محلی در درون برنامه ریزی توسعه تولید گنجانده شود. گسترش این مدل بسیار ساده بوده و بر اساس مفهوم قیمت گذاری حاشیه محلی می باشد. بر اساس تعریف، قیمت گذاری حاشیه محلی هر باس همان هزینه ای که باید خرج نمود تا ۱ مگاوات بار مازاد همان باس تأمین گردد. در واقع برای هر وضعیت شبکه، باید Π وضعیت (به تعداد باس های شبکه) را بررسی کرد که در هر وضعیت، توان باس مربوطه ۱ مگاوات نسبت به وضعیت ابتدایی آن افزایش می یابد و هزینه آن محاسبه می شود. این هزینه مازاد نسبت به حالت اولیه همان مقدار قیمت گذاری حاشیه محلی خواهد بود. بنابراین رابطه ۱۵ به عنوان تابع هدف جایگزین رابطه ۱ می شود و قیود مرزی زیر به مسئله اضافه می گردد:

$$\sum_{g \in \Omega_b} P_{g,lv,y,Imp} + P_{b,lv,y,Imp}^{loadshed} - P_{b,lv,y,Imp}^{load} = \sum_{j \in \Omega_b^{Br}} P_{bj,lv,y,Imp}, \forall b \in \Omega^{Bus}, lv \in \Omega^{level}, y \in \Omega^{year}, Imp \in \Omega^{Imp} \quad (16)$$

$$P_g^{min} \leq P_{g,lv,v,Imp} \leq P_g^{max}, \forall g \in \Omega^{Gen}, lv \in \Omega^{level}, y \in \Omega^{year}, Imp \in \Omega^{Imp} \quad (17)$$

$$-P_{ij}^{max} \gamma_{ij,y} \leq P_{ij,lv,v,Imp} \leq P_{ij}^{max} \gamma_{ij,y}, \forall ij \in \Omega^{Br}, lv \in \Omega^{level}, y \in \Omega^{year}, Imp \in \Omega^{Imp} \quad (18)$$

$$0 \leq P_{b,lv,v,Imp}^{loadshed} \leq P_{b,lv,v,Imp}^{load}, \forall b \in \Omega^{Bus}, lv \in \Omega^{level}, y \in \Omega^{year}, Imp \in \Omega^{Imp} \quad (19)$$

۳- استراتژی حل مسئله

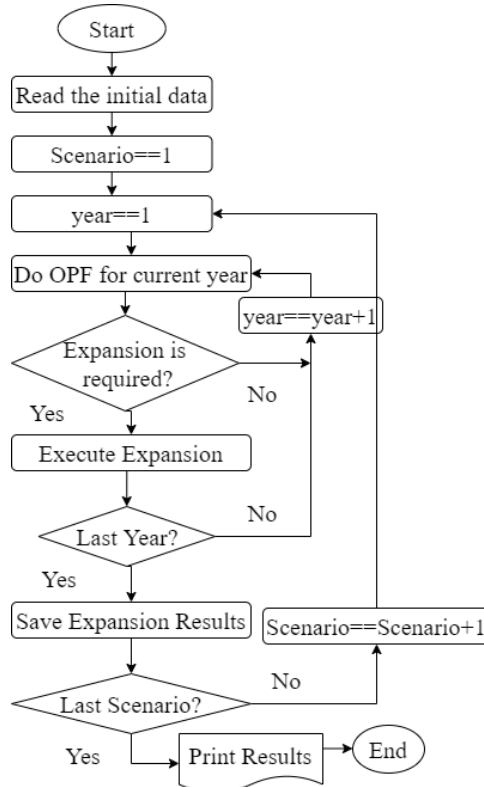
فلوچارت روش پیشنهادی در شکل ۱ نشان داده شده است. پس از قرائت داده های اولیه شبکه برق از قبیل تغییرات بار، داده های فنی پخش بار بهینه و داده های اقتصادی، اقدام به حل مدل در سناریوی اول می شود. قبل از برنامه ریزی توسعه شبکه در هر سال، یک پخش بار بهینه اجرا می شود تا مشخص شود آیا نیاز به توسعه می باشد یا نه. پس از آن اجرای برنامه ریزی توسعه در سال های مختلف انجام می شود. پس از سال نهایی، سناریوی بعدی بررسی خواهد شد و نهایتاً نتایج سناریوها با هم مقایسه خواهد شد.

۴- شبیه سازی و تحلیل نتایج

در این مقاله، شبکه ۶ باس گارور مطالعه شده است. جدول ۱ داده های شبکه اقتباس شده از [۱۹] را نشان می دهد. داده های هزینه واحدهای تولیدی نیز از [۲۰] برگرفته شده است. نرخ رشد بار و ظرفیت تولید نیز از [۲۱] برگرفته شده است. پنج سطح تغییر بار ۰/۵۵۲۶، ۰/۶۴۴۷، ۰/۷۳۶۸، ۰/۸۲۸۹ و ۰/۹۲۱۱ با دوره زمانی ۱۶۶۰، ۲۵۰۰، ۳۰۰۰، ۱۵۰۰ و ۱۰۰ ساعت در هر سال در نظر گرفته شده است. رشد سالانه بار و تولید به ترتیب ۳٪ و ۵٪ در نظر گرفته شده است. نرخ بهره برابر ۱/۰ و حداکثر تعداد خطوط مجاز قابل نصب میان دو باس برابر با ۳ در نظر گرفته شده است. شبکه دیگر مورد مطالعه در این تحقیق شبکه ۲۴ باس IEEE است که داده های آن از نرم افزار متپاور^۲ استخراج شده است که در جدول ۲ آورده شده است. به منظور خلاصه سازی جدول، خطوط موازی با هم ادغام شده اند.

¹ Local marginal pricing (LMP)

² MATPOWER



شکل ۱- فلوچارت اجرای برنامه

Figure.1: The flowchart of the program

جدول ۱: مشخصات شبکه ۶ باس گارور [۱۹]

Table 1: Garver 6 bus system data [19]

خط		باس		مگاوات		دلار بر مگاوات ساعت	
نام	از به	مگاوات	وضعیت	نام	بار مصرفی	تولید	هزینه
۱	۱	۱۰۰	۱	۱	۸۰	۵۰	۳۶
۲	۱	۸۰	۱	۲	۲۴۰	صفر	صفر
۳	۱	۱۰۰	۱	۳	۴۰	۱۶۵	۳۰
۴	۲	۱۰۰	۱	۴	۱۶۰	صفر	صفر
۵	۲	۱۰۰	۱	۵	۲۴۰	صفر	صفر
۶	۲	۱۰۰	صفر	۶	صفر	۵۴۵	۲۰
۷	۳	۱۰۰	۱				
۸	۴	۱۰۰	صفر	جمع	۷۶۰	۷۶۰	صفر

۴-۱- تحلیل مدل برنامه‌ریزی توسعه انتقال مقید به پیشامد ناگهانی

به منظور درک عمیق‌تری از نتایج مدل برنامه‌ریزی توسعه انتقال مقید به پیشامد، ۱۲ سناریو مورد مطالعه قرار گرفته است تا تأثیر نرخ بهره، نسبت رشد تولید به بار، و رخداد پیشامد در نتایج مدل برنامه‌ریزی توسعه انتقال طبق جدول ۳ بررسی گردد. از مقایسه سناریوهای ۱ تا ۳ با سناریوهای ۴ تا ۶ اثر نرخ بهره مشخص می‌گردد. همچنین مقایسه سناریوهای ۱ تا ۶ با سناریوهای ۷ تا ۱۲ اثر پیش‌آمد را انواع شرایط بارگذاری شبکه نشان می‌دهد. نتایج مربوط به اجرای این سناریوها در برنامه‌ریزی توسعه انتقال مقید به پیشامد در جدول ۴ و ۵ نمایش داده شده است.

جدول ۲: مشخصات شبکه ۲۴ باس IEEE [۲۱]

Table 2: IEEE 24bus system data [21]

نام	از	به	خط		وضعیت	باس	مگاوات		دولار بر مگاوات ساعت
			مگاوات	بار مصرفی			تولید	هزینه	
۱	۱	۲	۱۷۵	۱	۱	۱	۱۰۸	۱۹۲	۳۹/۸۳
۲	۱	۳	۱۷۵	۱	۱	۲	۹۷	۱۹۲	۳۹/۸۳
۳	۱	۵	۱۷۵	۱	۱	۳	۱۸۰	صفر	صفر
۴	۲	۴	۱۷۵	۱	۱	۴	۷۴	صفر	صفر
۵	۲	۶	۱۷۵	۱	۱	۵	۷۱	صفر	صفر
۶	۳	۹	۱۷۵	۱	۱	۶	۱۳۶	صفر	صفر
۷	۳	۲۴	۴۰۰	۱	۱	۷	۱۲۵	۳۰۰	۴۳/۶۶
۸	۴	۹	۱۷۵	۱	۱	۸	۱۷۱	صفر	صفر
۹	۵	۱۰	۱۷۵	۱	۱	۹	۱۷۵	صفر	صفر
۱۰	۶	۱۰	۱۷۵	۱	۱	۱۰	۱۹۵	صفر	صفر
۱۱	۷	۸	۱۷۵	۱	۱	۱۱	صفر	صفر	صفر
۱۲	۸	۹	۱۷۵	۱	۱	۱۲	صفر	صفر	صفر
۱۳	۸	۱۰	۱۷۵	۱	۱	۱۳	۲۶۵	۵۹۱	۴۸/۵۸
۱۴	۹	۱۱	۴۰۰	۱	۱	۱۴	۱۹۴	صفر	صفر
۱۵	۹	۱۲	۴۰۰	۱	۱	۱۵	۳۱۷	۱۵۵	۱۲/۳۸
								۶۰	۵۶/۵۶
۱۶	۱۰	۱۱	۴۰۰	۱	۱	۱۶	۱۰۰	۱۵۵	۱۲/۳۸
۱۷	۱۰	۱۲	۴۰۰	۱	۱	۱۷	صفر	صفر	صفر
۱۸	۱۱	۱۳	۵۰۰	۱	۱	۱۸	۳۳۳	۴۰۰	۴/۴۲
۱۹	۱۱	۱۴	۵۰۰	۱	۱	۱۹	۱۸۱	صفر	صفر
۲۰	۱۲	۱۳	۵۰۰	۱	۱	۲۰	۱۲۸	صفر	صفر
۲۱	۱۲	۲۳	۵۰۰	۱	۱	۲۱	صفر	۴۰۰	۴/۴۲
۲۲	۱۳	۲۳	۵۰۰	۱	۱	۲۲	صفر	۳۰۰	صفر
۲۳	۱۴	۱۶	۵۰۰	۱	۱	۲۳	صفر	۳۱۰	۱۲/۳۸
								۳۵۰	۱۱/۸۴
۲۴	۱۵	۱۶	۵۰۰	۱	۱	۲۴	صفر	صفر	صفر
۲۵	۱۵	۲۱	۱۰۰۰	۱	۱	جمع	۲۵۸۰	۳۴۰۵	
۲۶	۱۵	۲۴	۵۰۰	۱	۱				
۲۷	۱۶	۱۷	۵۰۰	۱	۱				
۲۸	۱۶	۱۹	۵۰۰	۱	۱				
۲۹	۱۷	۱۸	۵۰۰	۱	۱				
۳۰	۱۷	۲۲	۵۰۰	۱	۱				
۳۱	۱۸	۲۱	۱۰۰۰	۱	۱				
۳۲	۱۹	۲۰	۱۰۰۰	۱	۱				
۳۳	۲۰	۲۳	۱۰۰۰	۱	۱				
۳۴	۲۱	۲۲	۵۰۰	۱	۱				

جدول ۳: سناریوهای مورد مطالعه

Table 3: case studies

سناریو	نوع حادثه	نرخ بهره	نسبت رشد تولید به مصرف
۱	بدون حادثه	صفر	۱
۲			۱/۲
۳			۱/۵
۴		۰/۱	۱
۵			۱/۲
۶			۱/۵
۷	خروج یک خط	صفر	۱
۸			۱/۲
۹			۱/۵
۱۰		۰/۱	۱
۱۱			۱/۲
۱۲			۱/۵

جدول ۴: خطوط جدید احداث شده در شبکه گارور ۶ باس

Table 4: the new constructed lines in Garver 6bus system

سناریو	سال اول	سال دوم	سال سوم	سال چهارم	سال پنجم
۱	(۱)۱-۵، (۳)۲-۶، (۱)۳-۵، (۳)۴-۶	(۱)۲-۳	(۱)۲-۶	--	--
۲	(۱)۱-۵، (۱)۲-۳، (۳)۲-۶، (۱)۳-۵، (۳)۴-۶	--	--	(۱)۲-۶	--
۳	(۱)۱-۵، (۱)۲-۳، (۱)۳-۵، (۳)۲-۶، (۳)۴-۶	(۱)۲-۶	--	--	--
۵، ۴	(۱)۲-۳، (۳)۲-۶، (۱)۳-۵، (۳)۴-۶	(۱)۲-۶، (۱)۴-۶	--	--	--
۶	(۱)۱-۵، (۱)۲-۳، (۳)۲-۶، (۱)۳-۵، (۳)۴-۶	(۱)۲-۶، (۱)۴-۶	--	--	--
۷	(۱)۱-۵، (۱)۲-۳، (۱)۲-۴، (۳)۲-۶، (۳)۳-۵، (۳)۴-۶	(۱)۲-۶	--	--	--
۸، ۹، ۱۰، ۱۱، ۱۲	(۱)۱-۵، (۱)۲-۳، (۱)۲-۴، (۳)۲-۶، (۳)۳-۵، (۳)۴-۶	(۱)۲-۶	--	--	--

طبق جدول ۴ در شرایطی که نرخ بهره صفر باشد و مدل مقید به پیشامد باشد (سناریوهای ۱ تا ۳)، تمایل چندانی به نصب خطوط جدید در سال اول مشاهده نمی‌شود و بیشتر در سال‌های سوم و چهارم احداث خطوط جدید انجام شده است. اما زمانی که نرخ بهره ۰/۱ فرض شود، بدون وقوع پیشامد (سناریوی ۴ تا ۶)، هزینه نصب خطوط جدید در گذر زمان افزایش پیدا خواهد کرد. بنابراین برنامه‌ریزی جهت کاهش هزینه‌ها طوری انجام می‌شود که تا جایی که امکان دارد در سال اول توسعه بیشترین خطوط تا جایی که بودجه اجازه می‌دهد (نهایتاً سه خط موازی در هر سال) انجام شود. با در نظرگیری پیشامد در مدل (سناریوهای ۷ تا ۱۲)، مشاهده می‌شود که نیاز به نصب خطوط جدید بین دو باس ۲ و ۴ است که در سایر سناریوهای قدیم نبود. علت نصب این خط، ناشی از پیشامد خروج خط متصل به باس ۲ می‌باشد. تحلیل پخش بار می‌تواند حقیقت اهمیت احداث این خط را مشخص کند. همچنین طبق جدول ۴ واضح است که افزایش ضریب رشد تولید به مصرف اثر چندانی بر توسعه مقید به پیشامد ندارد. بر اساس جدول ۵، هزینه سرمایه‌گذاری در نظرگیری پیشامد افزایش می‌یابد. همچنین در نظرگیری نرخ بهره موجب افزایش هزینه سرمایه‌گذاری اولیه می‌شود. اما افزایش نسبت تولید به مصرف اثری بر هزینه سرمایه‌گذاری اولیه ندارد. بر اساس این جدول، در نظرگیری پیشامد می‌تواند هزینه سرمایه‌گذاری اولیه را در حدود ۲۹/۶۲ درصد در نرخ بهره صفر و ۲۳/۴۲ درصد در نرخ بهره ۰/۱ افزایش دهد. هزینه بهره‌برداری برنامه‌ریزی توسعه خطوط انتقال، نقش ضریب رشد تولید به مصرف را به خوبی نشان می‌دهد. می‌توان متوجه شد که با افزایش نسبت تولید به مصرف، هزینه بهره‌برداری شبکه کاهش می‌یابد. مقدار بارزدایی در تمامی سناریوها قابل صرف نظر است و زمان اجرای برنامه در حدود ۱۵۳ برابر بزرگ‌تر از مدل بدون پیشامد است.

این نتایج بر اساس یک سیستم کامپیوتر با پردازنده A8 و حافظه ۸ گیگابایت به دست آمده است. از نرم افزار یالمیپ^۱ (نسخه ۲۰۱۹۰۴۲۵)، نرم افزار متلب^۲ و موسک^۳ با لایسنس آکادمیک استفاده شده است.

جدول ۵: مقایسه نتایج سناریوهای مختلف شبکه ۶ باس گارور

Table 5: comparison of several case studies in Garver 6 bus

سناریو	هزینه سرمایه گذاری (میلیون دلار)	هزینه بهره برداری (میلیون دلار)	هزینه کل (میلیون دلار)	بارزدایی (مگاوات)	زمان (ثانیه)
۱	۰/۰۲۷۰	۴۹۹/۳۵	۴۹۹/۳۷	صفر	۰/۹۰
۲	۰/۰۲۷۰	۴۹۷/۸۴	۴۹۷/۸۷	صفر	۰/۸۹
۳	۰/۰۲۷۰	۴۹۶/۳۳	۴۹۶/۳۵	صفر	۰/۵۰
۴	۰/۰۲۸۶	۶۱۲/۹۹	۶۱۳/۰۲	صفر	۰/۵۵
۵	۰/۰۲۸۶	۶۱۰/۹۸	۶۱۱/۰۱	صفر	۰/۵۲
۶	۰/۰۳۰۶	۶۰۹/۰۱	۶۰۹/۰۴	صفر	۰/۵۱
۷	۰/۰۳۵۰	۴۹۹/۳۵	۴۹۹/۳۸	صفر	۱۶۲/۴
۸	۰/۰۳۵۰	۴۹۷/۸۴	۴۹۷/۸۸	صفر	۱۳۹/۱
۹	۰/۰۳۵۰	۴۹۶/۳۳	۴۹۶/۳۶	صفر	۱۴۱/۹
۱۰	۰/۰۳۵۳	۶۱۲/۹۹	۶۱۳/۰۳	صفر	۱۵۵/۴
۱۱	۰/۰۳۵۳	۶۱۰/۹۸	۶۱۱/۰۱	صفر	۱۳۶/۴
۱۲	۰/۰۳۵۳	۶۰۹/۰۱	۶۰۹/۰۴	صفر	۱۵۲/۱

نتایج به دست آمده از شبیه سازی شبکه ۲۴ باس IEEE در جدول ۶ و جدول ۷ نشان داده شده است. اثر افزایش نرخ بهره در مسئله در حالت بدون در نظرگیری پیشامد و با در نظرگیری وقوع آن بررسی شده است. نتایج نشان می دهد که با ۰/۱ افزایش در نرخ بهره، هزینه سرمایه گذاری در حدود ۴۰ درصد (به طور میانگین با انحراف استاندارد ۹/۰۲ درصد) چه در حالت در نظرگیری پیشامد و یا عدم در نظرگیری آن افزایش می یابد.

جدول ۶: خطوط جدید نصب شده (به همراه تعداد) در هر سناریوی شبکه ۲۴ باس IEEE

Table 6: the new lines (with number) in each scenarios in IEEE 24bus system

سناریو	سال اول	سال دوم	سال سوم	سال چهارم	سال پنجم
۱	(۱)۳-۹، (۱)۱-۲	--	(۱)۸-۱۰	(۱)۱-۳، (۱)۶-۱۰	(۱)۴-۹
۲	(۲)۳-۹، (۱)۱-۲	--	(۱)۸-۱۰	(۱)۳-۹، (۱)۶-۱۰	(۱)۴-۹
۳	(۲)۳-۹، (۱)۱-۲	--	(۱)۳-۹، (۱)۸-۱۰	(۱)۱-۳، (۱)۴-۹، (۱)۶-۱۰	(۱)۴-۹، (۱)۶-۱۰
۴	(۱)۳-۹	--	(۱)۳-۹	(۱)۶-۱۰	(۱)۱۹
۵	(۲)۳-۹، (۱)۱-۲	--	(۱)۸-۱۰، (۱)۱۶-۱۹	(۱)۱-۳	(۱)۶-۱۰
۶	(۲)۳-۹، (۱)۱-۲	(۱)۱-۲، (۱)۱-۳، (۱)۳-۹، (۱)۶-۱۰	(۱)۴-۹، (۱)۳-۲۴	(۱)۱-۳	(۱)۶-۱۰
		(۱)۱۰، (۱)۸-۱۰، (۱)۱۶-۱۹	(۱)۲۱-۲۲		

¹ YALMIP

² MATLAB-2018b

³ MOSEK(ver 9)

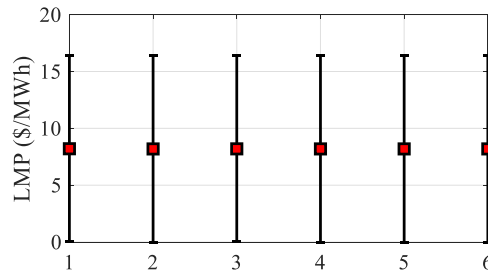
جدول ۷: مقایسه نتایج سناریوهای مختلف شبکه ۲۴ باس IEEE

Table VII: comparison of scenarios in IEEE 24 bus system

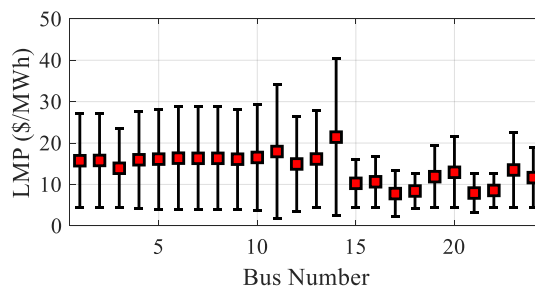
سناریو	هزینه سرمایه‌گذاری (میلیون دلار)	هزینه بهره‌برداری (میلیون دلار)	هزینه کل (میلیون دلار)	بارزدایی (مگاوات)	زمان (ثانیه)
۱	۰/۰۰۳۰	۶۷۴/۷۳	۶۷۴/۷۳	صفر	۳/۸۱
۲	۰/۰۰۳۰	۶۶۷/۰۵	۶۶۷/۰۶	صفر	۴/۲۳
۳	۰/۰۰۳۵	۶۵۶/۹۸	۶۵۶/۹۸	صفر	۳/۵۷
۴	۰/۰۰۳۸	۸۲۸/۲۸	۸۲۸/۲۸	صفر	۳/۴۰
۵	۰/۰۰۴۰	۸۱۱/۰۵	۸۱۱/۰۵	صفر	۳/۵۳
۶	۰/۰۰۵۷	۸۰۴/۶۴۳	۸۰۴/۶۴۹	صفر	۳/۶۷

۴-۲- تحلیل قیمت‌گذاری حاشیه محلی در شبکه

قبلاً از تحلیل نتایج برنامه‌ریزی توسعه انتقال، بررسی اطلاعات پخش بار و قیمت‌گذاری حاشیه محلی در هر دو شبکه تست از دیدگاه وضعیت پرشدگی خطوط ضروری است. مقادیر قیمت‌گذاری حاشیه محلی شبکه‌ها در شکل‌های ۲ و ۳ به ترتیب برای شبکه‌های ۶ باس و ۲۴ باس رسم شده است. مقادیر یکسان قیمت‌گذاری حاشیه محلی در شبکه ۶ باس نشان دهنده عدم وجود پرشدگی در شرایط مدیریت نرمال این شبکه است. بنابراین تأمین ۱ مگاوات نیاز بیشتر در هر باسی از این شبکه می‌تواند به سادگی بدون هیچ محدودیتی انجام شود. در شبکه ۲۴ باس IEEE مقادیر قیمت‌گذاری حاشیه محلی با یکدیگر متفاوت است چون تأمین ۱ مگاوات بیشتر بار در شبکه با پرشدگی خطوط مواجه می‌شود. باس‌های ۱۰ تا ۱۴ بالاترین قیمت حاشیه محلی را دارند چون در خطوط مواصلاتی به آن‌ها ازدحام بالایی وجود دارد. هرچه تغییرات قیمت‌گذاری حاشیه محلی بیشتر باشد، انعطاف شبکه در مقابل نوسانات روزانه بار کمتر خواهد بود. شکل‌های ۲ و ۳ فقط نتایج پخش بار شبکه را بدون رشد بار نشان داده است. بدون شک، رشد بار، ازدحام خطوط و نوسانات قیمت‌گذاری حاشیه محلی را ایجاد می‌کند. بنابراین ضرورت دارد تا قیمت‌گذاری حاشیه محلی در بازارهای برق رقابتی در نظر گرفته شود تا مدیریت ازدحام بهتری صورت گیرد. با توجه به محدودیت صفحات، نتایج مربوط به قیمت‌گذاری حاشیه محلی در رشد بارهای مختلف دو شبکه ارائه نشده است.



شکل ۲: وضعیت قیمت‌گذاری حاشیه محلی در شبکه ۶ باس گارور قبل از توسعه شبکه انتقال
Figure2: local marginal pricing status in each bus in Garver 6 bus system before expansion



شکل ۳: وضعیت قیمت‌گذاری حاشیه محلی در شبکه ۲۴ باس IEEE قبل از توسعه انتقال
Figure3: local marginal pricing status in each bus in IEEE24 bus system before expansion

۳-۴-مدل مبتنی بر قیمت گذاری حاشیه محلی در شبکه

نتایج برنامه ریزی توسعه انتقال در شبکه باس در جدول ۸ و جدول ۹ نشان داده شده است. همان طور که در این جداول مشخص است، نتایج شبکه ۶ باس دقیقاً مشابه نتایج جداول ۴ و ۵ می باشد. تنها مدت زمان اجرای برنامه آن ها با یکدیگر تفاوت دارد؛ چون قیود مرزی شبکه افزایش یافته است. علت مشابهت این نتایج، یکسان بودن قیمت گذاری حاشیه محلی در باس های شبکه قبل از توسعه انتقال می باشد که در شکل ۲ نشان داده شده بود؛ بنابراین امکان رقابت در این شبکه فراهم شده است؛ بنابراین در نظریه قیمت گذاری حاشیه محلی تأثیری بر برنامه ریزی توسعه انتقال این شبکه ندارد. در نظریه قیمت گذاری حاشیه محلی معمولاً شبکه را به سمت رقابت بیشتر پیش می برد؛ اما در این شبکه به خودی خود این رقابت توسط ساختار شبکه فراهم شده است.

جدول ۸: خطوط احداث شده جدید (با تعداد) در هر سناریو شبکه ۶ باس گارور در بازار رقابتی

Table 8: the new constructed line (with number) in Garver 6 bus system in the competitive market

سناریو	سال اول	سال دوم	سال سوم	سال چهارم	سال پنجم
۱	(۱)۲-۳، (۳)۲-۶، (۱)۳-۵، (۳)۴-۶	(۱)۱-۵، (۱)۲-۶	--	--	--
۲	(۱)۱-۵، (۳)۲-۶، (۱)۳-۵، (۳)۴-۶	(۱)۲-۳، (۱)۲-۶	--	--	--
۳	(۱)۱-۵، (۱)۲-۳، (۳)۲-۶، (۱)۳-۵، (۳)۴-۶	(۱)۲-۶	--	--	--
۴	(۱)۱-۵، (۱)۲-۳، (۳)۲-۶، (۱)۳-۵، (۳)۴-۶	(۱)۲-۶	--	--	--
۵	(۱)۲-۳، (۳)۲-۶، (۱)۳-۵، (۳)۴-۶	(۱)۲-۶	--	--	--
۶	(۱)۱-۵، (۱)۲-۳، (۳)۲-۶، (۱)۳-۵، (۳)۴-۶	(۱)۲-۶	--	--	--

جدول ۹: مقایسه نتایج سناریوهای مختلف شبکه ۶ باس گارور در بازار رقابتی

Table 9: scenario comparison in Garver 6 bus system in the competitive market

سناریو	هزینه سرمایه گذاری (میلیون دلار)	هزینه بهره برداری (میلیون دلار)	هزینه کل (میلیون دلار)	بارزدایی (مگاوات)	زمان (ثانیه)
۱	۰/۰۲۷۰	۴۹۹/۳۶	۴۹۹/۳۹	صفر	۴۹/۳
۲	۰/۰۲۷۰	۴۹۷/۸۴	۴۹۷/۸۷	صفر	۵۰/۵
۳	۰/۰۲۷۰	۴۹۶/۳۴	۴۹۶/۳۷	صفر	۵۱/۴
۴	۰/۰۲۷۳	۶۱۲/۹۹	۶۱۳/۰۲	صفر	۵۴/۱۸
۵	۰/۰۲۵۳	۶۱۰/۹۸	۶۱۱/۰۱	صفر	۵۳/۵۷
۶	۰/۰۲۷۳	۶۰۹/۰۱	۶۰۹/۰۴	صفر	۵۴/۳

جدول ۱۰: خطوط جدید احداث شده در شبکه ۲۴ باس IEEE در بازار رقابتی

Table 10: the new constructed line in IEEE 24 bus system in the competitive market

سناریو	سال اول	سال دوم	سال سوم	سال چهارم	سال پنجم	
۱	(۱)۱-۲، (۲)۱-۳، (۱)۱-۳، (۳)۳-۹، (۱)۳-۲۴، (۱)۳-۹، (۱)۴-۹، (۱)۶-۱۰، (۱)۷-۸، (۱)۸-۱۰، (۱)۸-۱۴	(۱)۱۶، (۱)۱۵-۲۴، (۱)۱۶-۱۷، (۱)۱۶-۱۹، (۱)۲۱-۲۲	--	--	--	--
۲	(۱)۱-۳، (۱)۳-۹، (۱)۳-۲۴، (۱)۷-۸، (۱)۷-۱۰، (۱)۸-۱۰، (۱)۸-۱۶، (۱)۱۴-۱۶، (۱)۱۵-۲۴	(۱)۱۷	--	--	--	--
۳	(۱)۱-۲، (۳)۳-۹، (۳)۳-۲۴، (۳)۳-۹، (۲)۷-۸، (۳)۸-۱۰، (۳)۸-۱۰، (۲)۱۲-۲۳، (۱)۱۴-۱۶، (۱)۱۵-۱۹	(۲)۲۴، (۲)۱۶-۱۷	--	--	--	--
۴	(۱)۱-۳، (۱)۳-۹، (۱)۳-۲۴، (۱)۷-۸، (۱)۷-۱۰، (۱)۸-۱۰، (۱)۸-۱۰، (۱)۱۲-۲۳، (۱)۱۴-۱۶، (۱)۱۵-۱۹	(۱)۲۴، (۱)۱۶-۱۷	--	--	--	--
۵	(۱)۱-۳، (۱)۳-۹، (۱)۳-۲۴، (۱)۷-۸، (۱)۷-۱۰، (۱)۸-۱۰، (۱)۸-۱۰، (۱)۱۲-۲۳، (۱)۱۵-۲۴، (۱)۱۶-۱۰	(۱)۱۷	--	--	--	--
۶	(۱)۱-۳، (۱)۳-۹، (۱)۳-۲۴، (۱)۷-۸، (۱)۷-۱۰، (۱)۸-۱۰، (۱)۸-۱۰، (۱)۱۲-۲۳، (۱)۱۴-۱۶، (۱)۱۵-۱۹	(۱)۲۴، (۱)۱۶-۱۷	--	--	--	--

نتایج در نظرگیری قیمت‌گذاری حاشیه محلی شبکه ۲۴ باس در جدول ۱۰ و ۱۱ نشان داده شده است. این نتایج با جداول ۶ و ۷ تا حدودی تفاوت دارد. این تفاوت از اختلاف میان قیمت‌های حاشیه محلی باس‌های شبکه قبل از توسعه ناشی می‌شود. زمانی که محاسبات قیمت-گذاری حاشیه محلی در مدل برنامه‌ریزی توسعه انتقال گنجلنده می‌شود، برنامه اقدام به کمینه‌سازی انحراف قیمت‌گذاری حاشیه محلی می‌کند و طوری نقطه کار نیروگاه‌ها را تنظیم می‌کند تا هزینه تأمین ۱ مگاوات بر در هر یک از باس‌های شبکه یکسان و متعادل شود. نتایج برنامه‌ریزی توسعه شبکه به سمتی همگرا می‌شود که قیمت‌گذاری حاشیه محلی باس‌ها با یکدیگر برابر شود. هزینه ازدحام کل شبکه ۱۳/۳۸۸۳ دلار بر ساعت در نظر گرفته شده است. در برخی از سطوح بارگذاری، قیمت‌گذاری حاشیه محلی برابر با ۱۶/۰۸۱۱ دلار بر ساعت و به عبارتی هزینه تأمین ۱ مگاوات ساعت انرژی برای هر باس در طول زمان افزایش یافته است. سطح بارگذاری نیز بر داده قیمت‌گذاری حاشیه محلی اثرگذار است.

جدول ۱۱: نتایج مربوط به شبکه ۲۴ باس IEEE در بازار رقابتی

Table 11: IEEE 24bus results in the competitive market

سناریو	هزینه سرمایه‌گذاری (میلیون دلار)	هزینه بهره‌برداری (میلیون دلار)	هزینه کل (میلیون دلار)	بارزدایی (مگاوات)	زمان (ثانیه)
۱	۰/۰۱۲۷	۶۷۴/۹۹	۶۷۵/۰۰	صفر	۲۱۰۴
۲	۰/۰۰۹۶	۶۶۷/۳۱	۶۶۷/۳۲	صفر	۲۵۹۹
۳	۰/۰۰۳۵	۶۵۶/۹۸	۶۵۶/۹۸	صفر	۲۳۶۲
۴	۰/۰۱۲۱	۸۲۸/۳۳	۸۲۸/۳۴	صفر	۲۶۵۵
۵	۰/۰۱۱۱	۸۱۸/۰۹	۸۱۱/۱۰	صفر	۲۷۷۶
۶	۰/۰۱۲۱	۸۰۴/۶۸۴	۸۰۴/۷۰	صفر	۷۶۷

۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله روشی جهت وارد نمودن محاسبات مربوط به قیمت‌گذاری حاشیه‌ای محلی در مسئله برنامه‌ریزی توسعه شبکه انتقال پیشنهاد شده است که نیاز به محاسبات جداگانه این قیمت را برطرف ساخته است. نتایج مربوط به پیاده‌سازی این روش در دو شبکه ۶ باس گارور و شبکه ۲۴ باس IEEE در بازار برق رقابتی با نتایج مربوط بازار برق سنتی مقایسه شده است. نتایج نشان می‌دهد که در بازار رقابتی تمایل بیشتری به خطوطی است که در محدودیت پرشدگی شدیدتری قرار گرفته‌اند و عبور حتی ۱ پریونیت^۱ توان از آن‌ها با هزینه‌های بالاتری نسبت به سایر خطوط شبکه باید صورت پذیرد. اما در بازار سنتی، هر خطی که ارزان‌تر باشد، گزینه‌ی مناسب‌تری جهت توسعه شبکه به شمار می‌آید مگر اینکه ظرفیت خطی به آستانه اشباع خود رسیده باشد. به‌منظور مطالعات آتی، ارائه مدل تصادفی از این روش در دستور کار نویسندگان این مقاله قرار گرفته است تا شرایط مربوط به در نظرگیری عدم قطعیت در مسئله لحاظ گردد و روش به مدل واقعی نزدیک‌تر شود.

مراجع

- [1] E. Naderi, M. Pourakbari-Kasmaei and M. Lehtonen, "Transmission expansion planning integrated with wind farms: A review, comparative study, and a novel profound search approach," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 115, p. 105460, 2020, doi: 10.1016/j.ijepes.2019.105460.
- [2] M. Esmaili, M. Ghamsari-Yazdel, N. Amjady, C. Y. Chung and A. J. Conejo, "Transmission Expansion Planning Including TCSCs and SFCLs: A MINLP Approach," in *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 35, no. 6, pp. 4396-4407, Nov. 2020, doi: 10.1109/TPWRS.2020.2987982.
- [3] S. L. Gbadamosi and N. I. Nwulu, "Reliability assessment of composite generation and transmission expansion planning incorporating renewable energy sources," *Journal of Renewable and Sustainable Energy*, vol. 12, no. 2, p. 026301, 2020, doi: 10.1063/1.5119244.

^۱ Per-Unit

- [4] A. S. Zakeri, O. A. Gashteroodkhani, I. Niazazari and H. Askarian-Abyaneh, "The effect of different non-linear demand response models considering incentive and penalty on transmission expansion planning," *European Journal of Electrical Engineering and Computer Science*, vol. 3, no. 1, 2019, pp. 1-17, doi: 10.24018/ejece.2019.3.1.57.
- [5] M. Mehrtash and A. Kargarian, "Risk-based dynamic generation and transmission expansion planning with propagating effects of contingencies," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 118, p. 105762, 2020, doi: 10.1016/j.ijepes.2019.105762.
- [6] M. Parham and S. Mortazavi, "Optimization of random scheduling combining wind farm and storage pumps in the electricity market," *Journal of Southern Communication Engineering*, vol. 9, no. 34, 2020.
- [7] 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. 43-58, 2021.
- [8] V. K. Yadav, K. Singh, and S. Gupta, "Market-oriented transmission expansion planning using non-linear programming and multi-criteria data envelopment analysis," *Sustainable Energy, Grids and Networks*, vol. 19, p. 100234, 2019, doi: 10.1016/j.segan.2019.100234.
- [9] D. S. Stock, Y. Harms, D. Mende, and L. Hofmann, "Robust nonlinear mathematical transmission expansion planning based on German electricity market simulation," *Electric Power Systems Research*, vol. 189, p. 106685, 2020, doi: 10.1016/j.epr.2020.106685.
- [10] R. Hejeejo and J. Qiu, "Probabilistic transmission expansion planning considering distributed generation and demand response programs," *IET Renewable Power Generation*, vol. 11, no. 5, pp. 650-658, 2017, doi: 10.1049/iet-rpg.2016.0725.
- [11] L. Baringo and A. Baringo, "A stochastic adaptive robust optimization approach for the generation and transmission expansion planning," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 33, no. 1, pp. 792-802, 2017, doi: 10.1109/TPWRS.2017.2713486.
- [12] M. Khakpoor, M. Jafari-Nokandi and A. A. Abdoos, "Dynamic generation and transmission expansion planning in the power market-based on a multiobjective framework," *International Transactions on Electrical Energy Systems*, vol. 27, no. 9, p. e2353, 2017, doi: 10.1002/etep.2353.
- [13] M. Khadem and M. Esmailbeig, "Optimize the Number, Locating, and Sizing of D-STATCOM and DGs Using GA Algorithm," *Journal of Southern Communication Engineering*, vol. 11, no. 41, pp. 29-42, 2021.
- [14] R. Hemmati, R. A. Hooshmand and A. Khodabakhshian, "Comprehensive review of generation and transmission expansion planning," *IET Generation, Transmission & Distribution*, vol. 7, no. 9, pp. 955-964, 2013, doi: 10.1049/iet-gtd.2013.0031.
- [15] I. C. Gonzalez-Romero, S. Wogrin and T. Gómez, "Review on generation and transmission expansion co-planning models under a market environment," *IET Generation, Transmission & Distribution*, vol. 14, no. 6, pp. 931-944, 2020, doi: 10.1049/iet-gtd.2019.0123.
- [16] S. M. Mousavi and T. Barforoushi, "Strategic wind power investment in competitive electricity markets considering the possibility of participation in intraday market," *IET Generation, Transmission & Distribution*, vol. 14, no. 14, pp. 2676-2686, 2020, doi: 10.1049/iet-gtd.2019.1237.
- [17] M. Karimi, A. Pirayesh and M. Kheradmandi, "Participation of generating companies in transmission investment in electricity markets," *IET Generation, Transmission & Distribution*, vol. 12, no. 3, pp. 624-632, 2018, doi: 10.1049/iet-gtd.2017.0413.
- [18] S. Majumder, R. Shereef and S. A. Khaparde, "Two-stage algorithm for efficient transmission expansion planning with renewable energy resources," *IET Renewable Power Generation*, vol. 11, no. 3, pp. 320-329, 2017, doi: 10.1049/iet-rpg.2016.0085.

- [19] L. L. Garver, "Transmission Network Estimation Using Linear Programming," in *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, vol. PAS-89, no. 7, pp. 1688-1697, Sept. 1970, doi: 10.1109/TPAS.1970.292825.
- [20] A. De Paola, D. Papadaskalopoulos, D. Angeli and G. Strbac, "Investigating the social efficiency of merchant transmission planning through a non-cooperative game-theoretic framework," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 33, no. 5, pp. 4831-4841, 2018, doi: 10.1109/TPWRS.2018.2817360.
- [21] R.-C. Leou, "A multi-year transmission planning under a deregulated market," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 33, no. 3, pp. 708-714, 2011, doi: 10.1016/j.ijepes.2010.11.020.

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. 14/ No. 53/Autumn 2024

Research Article

A Complete Analysis for Detection and Localization of Partial Discharges in XLPE Cables, Power Transformers and Generators

Amir Ghaedi, Associate Professor^{1*}  | Reza Sedaghati, Assistant Professor²  | Mehrdad Mahmoudian, Assistant Professor³ 

¹Department of Electrical Engineering, Dariun Branch, Islamic Azad University, Dariun, Iran, Amir.ghaedi@miau.ac.ir

²Department of Electrical Engineering, Beyza Branch, Islamic Azad University, Beyza, Iran, Reza.sedaghati@iau.ac.ir

³Department of Electrical and Electronic Engineering, Apadana Institute of Higher Education, Shiraz, Iran, m.mahmoudian@apadana.ac.ir

Correspondence

Amir Ghaedi, Associate Professor of Electrical Engineering, Dariun Branch, Islamic Azad University, Dariun, Iran, Amir.ghaedi@miau.ac.ir

Received: 15 July 2023

Revised: 4 August 2023

Accepted: 14 August 2023

Abstract

The failures of the power system are caused by insulation damages of HV apparatus including transformers, HV cables and generators. They are expensive. In the beginning, insulation failures occur in limited regions of insulation, which is called partial discharge (PD). When PDs are not detected online, they will spread along the insulation and bridge the whole of the insulation that eventually results in total breakdown. Thus, the HV apparatus fails. In this research, different sensors such as HFCT and coupling capacitor required to detect the PD of different HV devices including power transformers, HV cables, switchgears, motors and generators are introduced. The properties of PD signals occurred in HV apparatus is determined by experimental results related to PD signals detected from these HV apparatus. Then, an approach uses the correlation between signals energy is suggested to determine the location of PD occurred in the HV devices. The suitability of the proposed approach is satisfied by simulating the PD signals in the EMTP-RV software and processing the detected signals by MATLAB software. It is concluded from the experimental outcomes that the suggested sensors can accurately detect the PD signals occurred in the XLPE cables and transformers. The outcomes shown that the suggested method based on the correlation between signals energy can accurately determine the location of PD source in HV devices.

Keywords: Partial Discharge, Power Transformer, XLPE Cable, Correlation, EMTP-RV Software.

Highlights

- Performing a complete study on various sensors used for partial discharge detecting in the power transformers, high voltage cables and generators.
- Localization of partial discharges occurred in the power transformers, high voltage cables and generators through detecting of similarity and correlation of PD signals.
- Investigating the effectiveness of localization of PDs in the high voltage apparatus by simulation performed by MATLAB and EMTP-RV software.

Citation: A. Ghaedi, R. Sedaghati, and M. Mahmoudian, "A Complete Analysis for Detection and Localization of Partial Discharges in XLPE Cables, Power Transformers and Generators," *Journal of Southern Communication Engineering*, vol. 14, no. 53, pp. 29–52, 2024, doi:10.30495/jce.2023.1991428.1213, [in Persian].

مقاله پژوهشی

تجزیه و تحلیل کامل برای تشخیص و مکان یابی تخلیه های جزئی در کابل های XLPE، ترانسفورماتورهای قدرت و ژنراتورها

امیر قائدی*^۱ | رضا صداقتی^۲ | مهرداد محمودیان^۳

چکیده:

اکثر خرابی های سیستم قدرت ناشی از آسیب های عایقی در تجهیزات فشار قوی از جمله ترانسفورماتورهای قدرت، کابل های فشار قوی و موارد مشابه است که گران ترین تجهیزات در سیستم قدرت هستند. خرابی های عایقی در مراحل اولیه در قسمت های محدودی از عایق رخ می دهد که به آن تخلیه جزئی (PD) گفته می شود. اگر این تخلیه ها به موقع تشخیص داده نشوند، در امتداد عایق گسترش می یابند و کل عایق را پوشش داده و در نهایت منجر به تخلیه کامل و آسیب عایقی تجهیزات فشار قوی می شوند. در این مقاله، حسگرهای مختلفی مانند ترانسفورماتور جریان فرکانس بالا و خازن کوپلینگ که برای تشخیص PD در تجهیزات فشار قوی مختلف از جمله ترانسفورماتورهای قدرت، کابل های فشار قوی، کلیدهای قدرت، موتورها و ژنراتورها مورد نیاز هستند، معرفی می شوند. ویژگی های سیگنال های PD ایجاد شده در تجهیزات فشار قوی با استفاده از نتایج تجربی مربوط به سیگنال های PD تشخیص داده شده از این تجهیزات فشار قوی تعیین می شود. سپس یک روش مبتنی بر همبستگی بین انرژی سیگنال ها برای تعیین محل PD رخ داده در تجهیزات فشار قوی پیشنهاد می شود. اثربخشی روش پیشنهادی با شبیه سازی سیگنال های PD در نرم افزار EMTP-RV و پردازش سیگنال های تشخیص داده شده با استفاده از نرم افزار MATLAB تأیید می شود. از نتایج تجربی استنباط می شود که حسگرهای پیشنهادی می توانند به دقت PD رخ داده در کابل های XLPE و ترانسفورماتورها را تشخیص دهند. این نتایج نشان می دهند که تکنیک پیشنهادی مبتنی بر همبستگی بین انرژی سیگنال ها می تواند به دقت محل وقوع PD در تجهیزات فشار قوی را تعیین کند.

کلید واژه ها: تخلیه جزئی، ترانسفورماتور قدرت، کابل XLPE، همبستگی، نرم افزار EMTP-RV

^۱ گروه برق، واحد داریون، دانشگاه آزاد اسلامی، داریون، ایران.
amir.ghaedi@iau.ac.ir

^۲ گروه برق، واحد بیضا، دانشگاه آزاد اسلامی، بیضا، ایران.
Reza.sedaghati@iau.ac.ir

^۳ دانشکده فنی و مهندسی، گروه مهندسی برق، موسسه آموزش عالی آپادانا شیراز، ایران.
m.mahmoudian@apadana.ac.ir

نویسنده مسئول

^{*} امیر قائدی، دانشیار، گروه برق، واحد داریون، دانشگاه آزاد اسلامی، داریون، ایران.
amir.ghaedi@iau.ac.ir

تاریخ دریافت: ۲۴ تیر ۱۴۰۲

تاریخ بازنگری: ۱۳ مرداد ۱۴۰۲

تاریخ پذیرش: ۲۳ مرداد ۱۴۰۲

<https://doi.org/10.30495/jce.2023.1991428.1213>

۱-مقدمه

امروزه، قابلیت اطمینان سیستم قدرت که منجر به ارائه خدمات مداوم با حداقل قطعی برق می شود، یک ویژگی مهم از سیستم قدرت است. تجربه نشان داده است که بیشتر خرابی های ثبت شده در سیستم قدرت ناشی از آسیب عایقی تجهیزات فشار قوی از جمله ترانسفورماتورهای قدرت، کابل های XLPE فشار قوی، موتورها و ژنراتورها، کلیدهای قدرت و موارد مشابه است. این تجهیزات گران ترین دستگاه های شبکه برق هستند و بنابراین خرابی آن ها می تواند هزینه های زیادی را به سیستم قدرت تحمیل

کند. تخلیه‌های جزئی (PD) سیگنال‌های فرکانس بالایی هستند که در محدوده کوچکی از عایق تجهیزات فشار قوی ناشی از کاهش استحکام عایق در آن ناحیه رخ می‌دهند. اگر این سیگنال‌های PD در مراحل اولیه تشخیص داده نشوند، در امتداد عایق گسترش می‌یابند و کل عایق را پوشش می‌دهند که منجر به شکست کامل عایق می‌شود. بنابراین، پایش وضعیت سیگنال‌های PD رخ داده در تجهیزات فشار قوی سیستم قدرت برای جلوگیری از آسیب عایقی این تجهیزات مهم است. با توجه به اهمیت تشخیص PD در تجهیزات سیستم قدرت، تحقیقات زیادی برای بررسی این سیگنال‌های فرکانس بالا رخ داده در تجهیزات فشار قوی از جمله ترانسفورماتورهای قدرت، کابل‌های XLPE، کلیدهای قدرت، موتورها و ژنراتورها انجام شده است. در [۱]، یک روش برای مکان‌یابی منابع مختلف PD با استفاده از متدولوژی‌های یادگیری ماشین از جمله استخراج ویژگی‌ها با کمک محاسبات ریاضی و طبقه‌بندی آنها پیشنهاد شده است. در این مقاله، حسگرهای نوری برای ثبت PD رخ داده در یک جعبه مکعبی که شامل یک مانع استوانه‌ای برای شبیه‌سازی ساختار هندسی در داخل کلیدهای قدرت است، به کار گرفته شده‌اند. در [۲]، یک مدل فیزیکی برای ترانسفورماتورهای فشار قوی با در نظر گرفتن تأثیر سیم‌پیچ‌ها و هسته‌ها بر انتشار امواج صوتی پیشنهاد شده است. در این مدل، هر گره یک نامزد برای محل PD است. در این مقاله، یک روش برای برآورد انتشار PD در طول زمان پیشنهاد شده است که از روش بهینه‌سازی ازدحام ذرات برای محاسبه زمان انتشار و جستجوی موقعیت منبع PD استفاده می‌کند. در [۳]، ولتاژ شروع و محل PD با استفاده از تئوری پاشن^۱ تعیین می‌شود. در این مقاله، از محاسبات المان محدود دو بعدی و معادلات الکترواستاتیکی برداری و اسکالر برای تعیین ولتاژ شروع سیگنال‌های PD و محل منبع آن‌ها استفاده شده است. در [۴]، متدولوژی‌های مکان‌یابی PD در انتهای کابل‌ها به صورت آفلاین مورد بررسی قرار گرفته است. در این مقاله، سه روش مختلف مبتنی بر روش آشکارسازی اعوجاج زمانی برای مکان‌یابی منبع PD در انتهای کابل‌ها پیشنهاد شده است. در [۵]، یک روش عملی برای تشخیص سیگنال‌های PD رخ داده در سیستم‌های خلا پیشنهاد شده است. در این مقاله، ولتاژ شروع PD رخ داده در کابل‌های محوری مختلف در محیط‌های متفاوت مشخص شده و یک مدل عنصر متراکم برای شبیه‌سازی توزیع فشار پیشنهاد شده است. در [۶]، یک الگوریتم جدید مبتنی بر تکنیک برآورد حداکثر دقت برای مکان‌یابی سیگنال‌های PD رخ داده در سیستم عایق روغنی با دقت بالا پیشنهاد شده است. در این مقاله، آمار توالی‌های پویای نويز و اندازه‌گیری در یک سیستم مکان‌یابی PD شناسایی شده و موقعیت منبع PD با استفاده از روش فیلتر کالمن گسترده تخمین زده می‌شود. در [۷]، یک روش جدید برای پایش آنلاین PD رخ داده در عایق تجهیزات فشار قوی از جمله کلیدهای قدرت، ترانسفورماتورها و ماشین‌های دوار پیشنهاد شده است. در این مقاله، مکان‌های استراتژیک در سرتاسر شبکه برای نصب حسگرهای PD آنلاین پیشنهادی برای پایش کامل وضعیت شبکه فشار قوی معرفی شده است. در [۸]، یک روش جدید برای برآورد اختلاف بین زمان‌های ورود سیگنال‌های تشخیص داده شده توسط حسگرهای صوتی نصب شده بر روی دیواره‌های ترانسفورماتور قدرت پیشنهاد شده است. در این مقاله، از اختلاف زمانی رسیدن بین سیگنال‌های تشخیص داده شده توسط چندین حسگر صوتی برای مکان‌یابی پالس‌های PD رخ داده در مخزن ترانسفورماتور استفاده شده است. در [۹]، حسگر فیبر نوری فابری-پروت برای تشخیص و مکان‌یابی سیگنال‌های PD در ترانسفورماتورهای قدرت پیشنهاد شده است. در این تحقیق، مکان‌یابی PD در ترانسفورماتورهای قدرت نوع روغنی از طریق یک سیستم تشخیص فراصوت متشکل از آرایه‌های حسگر فیبری با تیزی جهت خوب که منجر به مکان‌یابی دقیق می‌شود، انجام می‌گیرد. در [۱۰]، بر اساس شکل موج جریان سیگنال‌های PD، چهار نوع روش تشخیص PD مطابق با تکنیک یادگیری عمیق معرفی شده است. در این مقاله، یک سکوی آزمایشی مجهز به فرکانس بالا و جریان بر اساس استاندارد اصلاح شده IEC-60270 برای تشخیص شکل موج‌های جریان PD و سیگنال‌های ضربه‌ای جریان و فرکانس فوق بالای ضربه‌ای مرتبط ساخته شده است.

مقاله [۱۱] تأثیر میدان مغناطیسی بر PD رخ داده در رزین اپوکسی مورد استفاده در عایق سیم‌پیچ ابرسانا را مطالعه می‌کند. در این تحقیق، هدایت الکتریکی رزین اپوکسی و ویژگی‌های PD رخ داده در میدان مغناطیسی قوی ارزیابی می‌شود. در [۱۲]، مکان‌یابی دقیق سیگنال‌های PD رخ داده در هندسه‌های محوری انجام می‌شود. این تحقیق، رویکرد جدیدی را برای تعیین موقعیت بارهای متحرک که از جریان القا شده در یک مجموعه از الکترودهای مناسب بهره می‌برد، پیشنهاد می‌کند. مقاله [۱۳]

^۱ Paschen's law

اندازه گیری پالس های جریان PD حاوی فاصله های تخلیه کوچک رخ داده در فیلم های پلی ایمید را مطالعه می کند. این تحقیق، شکل موج های جریان پالس PD در مقیاس نانو ثانیه را تحت یک ولتاژ پیک AC ۲ کیلوولت با محدوده فرکانسی ۵۰ تا ۱۰۰۰ هرتز اندازه گیری می کند. مقاله [۱۴] روش شناسایی مبتنی بر فیبر فلوئورسنت را برای تشخیص PD رخ داده در نیتروژن مایع برای دستگاه های قدرت فوق رسانای دمای بالا مطالعه می کند. در این مقاله، از یک حسگر فیبر نوری فلوئورسنت برای شناسایی سیگنال های PD رخ داده در LN2 استفاده شده است. در [۱۵]، تأثیر ولتاژ هارمونیک بر ویژگی های سیگنال های PD رخ داده در عایق کاغذ لامینه شده نیتروژن مایع-پروپیلن مورد استفاده در کابل های DC دمای بالا مورد مطالعه قرار گرفته است. بر اساس روش شناسی پیشنهادی این مقاله، مؤلفه های هارمونیک که شامل فرکانس های ۵۰ تا ۳۵۰ هرتز هستند، بر روی ولتاژ DC برای بررسی مکانیسم دامنه و توالی هارمونیک بر روی PD اعمال می شوند. در [۱۶]، تجزیه و تحلیل طیفی تشخیص خطای تخلیه جزئی در ایستگاه فشار قوی گازی با یک حسگر نوری داخلی میکرو اعمال می شود. این تحقیق یک حسگر PD نوری سه باند فوق حساس را پیشنهاد می کند که به یک حسگر فرکانس فوق بالا با یک فلنج موجود در ایستگاه فشار قوی گازی متصل می شود. مقاله [۱۷] نقشه های زمان-فرکانس را برای جداسازی منابع متعدد PD در انتهای کابل ها ارائه می دهد. در این تحقیق، شکل موج هر پالس PD توسط تبدیل موجک سنکرونیزه-فشرده ارزیابی می شود و ۶ پارامتر ویژگی برای تشکیل نقشه های زمان-فرکانس پیشنهاد می شود. در [۱۸]، برهم کنش بین PD و حباب های تولید شده تحت پالس های صاعقه تکرار شونده در ترانسفورماتورها از طریق یک مدل ساختاری پیچیده مطالعه می شود. مدل پیشنهادی در این مقاله برای مطالعه ساختار عایقی مرتبط با فاصله گذارهای شعاعی و محوری متصل در ترانسفورماتورهای قدرت مناسب است. مقاله [۱۹] تأثیر فاز اعمال پالس سوئیچینگ را بر روی سیگنال های PD با شکل موج AC رخ داده در سطح اپوکسی در گاز SF6 مطالعه می کند. در این تحقیق، یک سکوی آزمایشی برای تولید ولتاژ ترکیبی با فاز قابل کنترل ارائه شده است. مقاله [۲۰] طراحی یک آنتن فراکتالی هیلبرت فرکانس بسیار بالا انعطاف پذیر را برای تشخیص سیگنال های PD رخ داده در کلیدهای قدرت عایق گازی ارائه می دهد. آنتن فراکتالی پیشنهادی روی ماده پلی دی متیل سیلوکسان انعطاف پذیر بارگذاری شده با یک شکاف دایره ای، ۲ شکاف مستطیلی در صفحه زمین هر زیربلوک، و یک شکاف مستطیلی در باز شو باریک برای گسترش باند تطبیق و بهبود بهره آنتن طراحی شده است. بر اساس مرور ادبیات صورت گرفته، یک مطالعه کامل در مورد روش های تشخیص و مکان یابی PD ضروری است. علاوه بر این، مکان یابی سیگنال های PD رخ داده در تجهیزات فشار قوی مختلف از جمله کابل های XLPE، ترانسفورماتورهای قدرت و ژنراتورها از طریق همبستگی بین انرژی سیگنال ها در تحقیقات قبلی انجام نشده است. جدول ۱ خلاصه مقالات بررسی شده در این بخش را به همراه مزایا و معایب اصلی آن ها ارائه می دهد.

به دلیل اهمیت تشخیص و مکان یابی PD، در این تحقیق تجزیه و تحلیل کاملی در مورد تشخیص و مکان یابی PD در تجهیزات فشار قوی شبکه برق انجام شده است. نوآوری اصلی این مقاله این است که مکان یابی PD در تجهیزات فشار قوی شامل کابل های XLPE، ترانسفورماتورهای قدرت و ژنراتورها از طریق تعیین همبستگی انرژی سیگنال های PD انجام می شود. برای ارائه اثربخشی رویکرد پیشنهادی، شبیه سازی PD در تجهیزات فشار قوی با استفاده از نرم افزارهای EMTP-RV و MATLAB انجام می شود. در فرایند شبیه سازی باید یک مدل دقیق از عایق تجهیزات فشار قوی در نظر گرفته شود. به دلیل مولفه های فرکانس بالای PD رخ داده در تجهیزات فشار قوی، مدل فشرده عایق دقیق نیست. بنابراین، یک مدل توزیع شده متشکل از مقاومت، خازن و سلف مربوط به عایق اعمال می شود. بنابراین، سازماندهی مقاله به شرح زیر خواهد بود:

در بخش دوم، پدیده PD و حسگرهای مختلف مانند ترانسفورماتور جریان فرکانس بالا و خازن کوپلینگ مناسب برای تشخیص این سیگنال ها رخ داده در تجهیزات فشار قوی مختلف از جمله ترانسفورماتورهای قدرت، کابل های فشار قوی، کلیدهای قدرت، موتورها و ژنراتورها معرفی می شوند. در بخش سوم، ویژگی های سیگنال های PD رخ داده در تجهیزات فشار قوی ارائه می شود که با استفاده از نتایج تجربی مربوط به سیگنال های PD تشخیص داده شده از این تجهیزات فشار قوی تعیین شده است. در بخش چهارم، یک روش مبتنی بر همبستگی بین انرژی سیگنال ها برای مشخص کردن محل PD رخ داده در تجهیزات فشار قوی پیشنهاد می شود. در این بخش، مناسب بودن روش پیشنهادی با شبیه سازی سیگنال های PD در نرم افزار EMTP-RV و پردازش سیگنال های تشخیص داده شده با استفاده از نرم افزار MATLAB تایید می شود. خلاصه مقاله در بخش پنجم ارائه می شود.

جدول ۱: خلاصه مرور مقالات بررسی شده
Table 1. The summary of the literature review

مراجع	مزایای اصلی	معایب
[۱]	مکان یابی PD در کلیدهای قدرت توسط تکنیک‌های یادگیری ماشین انجام می‌شود.	مکان یابی PD در تجهیزات فشار قوی دیگر مانند کابل، ترانسفورماتور و ژنراتور انجام نشده است.
[۲]	یک مدل فیزیکی برای ترانسفورماتور برای تعیین انتشار PD توسعه یافته است.	تشخیص و مکان یابی PD انجام نشده است.
[۳]	از تئوری پاشن برای تعیین ولتاژ شروع و محل منبع PD استفاده شده است.	حسگرهای مختلف و مسائل عملی مربوط به مکان یابی PD مورد بررسی قرار نگرفته است.
[۴]	مکان یابی PD در کابل‌ها در حالت آفلاین توسط روش انعکاس زمانی مورد مطالعه قرار گرفته است.	مکان یابی آنلاین تجهیزات فشار قوی انجام نشده است.
[۵]	یک روش عملی برای تشخیص PD در کابل‌های محوری ارائه شده است.	مکان یابی PD در تجهیزات فشار قوی انجام نشده است.
[۶]	از روش برآورد حداکثر درست‌نمایی برای مکان یابی PD در سیستم عایق روغنی استفاده شده است.	مکان یابی PD در تجهیزات فشار قوی مانند کابل انجام نشده است.
[۷]	پایش آنلاین PD در کلید قدرت، ترانسفورماتور و ماشین‌های دوار انجام شده است.	مکان یابی PD در تجهیزات فشار قوی انجام نشده است.
[۹-۸]	مکان یابی PD در ترانسفورماتورها توسط حسگرهای صوتی و نوری انجام شده است.	مکان یابی PD در تجهیزات فشار قوی دیگر مانند کابل انجام نشده است.
[۱۱]-	PD رخ داده در رزین اپوکسی، فیلم‌های پلی‌ایمید، نیتروژن مایع و ایستگاه فشار قوی عایق گازی مورد مطالعه قرار گرفته است.	تشخیص و مکان یابی PD در تجهیزات فشار قوی انجام نشده است.
[۱۹]-		
[۱۶-۱۳]		
[۱۲]	مکان یابی دقیق سیگنال‌های PD رخ داده در هندسه‌های محوری انجام شده است.	مکان یابی PD در تجهیزات فشار قوی دیگر مانند کابل، ترانسفورماتور و ژنراتور انجام نشده است.
[۱۷]	از نقشه‌های زمان-فرکانس برای جداسازی منابع متعدد PD در انتهای کابل‌ها استفاده شده است.	مکان یابی PD در تجهیزات فشار قوی مانند کابل، ترانسفورماتور و ژنراتور انجام نشده است.
[۱۸]	برهم‌کنش بین PD و حباب‌های تولید شده تحت پالس‌های صاعقه تکرار شونده در ترانسفورماتورها مورد مطالعه قرار گرفته است.	مکان یابی PD در تجهیزات فشار قوی مانند کابل، ترانسفورماتور و ژنراتور انجام نشده است.
[۲۰]	یک آنتن هیلبرت فرکانس بسیار بالای انعطاف‌پذیر برای تشخیص PD در کلیدهای قدرت عایق گازی مورد مطالعه قرار گرفته است.	مکان یابی PD در تجهیزات فشار قوی مانند کابل، ترانسفورماتور و ژنراتور انجام نشده است.

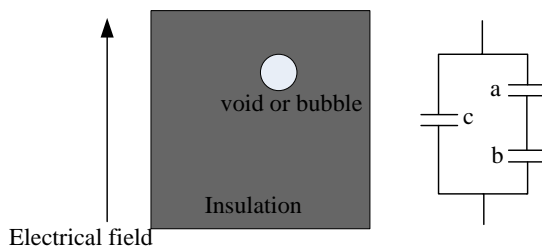
۲-تخلیه جزئی

در این بخش، پدیده PD رخ داده در تجهیزات فشار قوی سیستم قدرت و حسگرهای مناسب برای تشخیص این سیگنال‌ها در تجهیزات فشار قوی از جمله ترانسفورماتورهای قدرت، کلیدهای قدرت، کابل‌های XLPE، موتورها و ژنراتورها توضیح داده می‌شود.

۲-۲-پدیده تخلیه جزئی

به دلیل وجود ناخالصی‌ها، حفره‌ها، حباب‌های هوا و قطرات آب در عایق تجهیزات فشار قوی، استقامت عایق کاهش می‌یابد و شدت میدان الکتریکی اعمال شده به این ناخالصی‌ها منجر به ایجاد جریان‌های فرکانس بالا به نام PD می‌شود. در شکل ۱، مدل abc از PD نشان داده شده است. در این مدل، حفره یا حباب با خازن a، عایق موجود در بالا و پایین حفره با خازن b مدل‌سازی شده و بقیه عایق موجود در سمت راست و چپ حفره با خازن c نشان داده شده است. استحکام عایقی حفره کمتر از سایر

بخش های عایق است و اگر شدت میدان الکتریکی اعمال شده به حفره بیشتر از استحکام عایق باشد، PD در حفره رخ می دهد [۲۱].



شکل ۱: مدل abc از PD [۲۱]
Figure 1. The abc model of the PD [21]

اگر ولتاژ اعمال شده بر روی عایق $v(t)$ باشد، ولتاژ اعمال شده بر روی حفره طبق معادله (۱) خواهد بود. اگر ولتاژ اعمال شده بر روی حفره بیشتر از ولتاژ شروع آن (حداکثر ولتاژی که حفره می تواند تحمل کند) باشد، خازن مربوطه a اتصال کوتاه شده و جریان های PD طبق معادله (۲) تولید می شوند [۲۱].

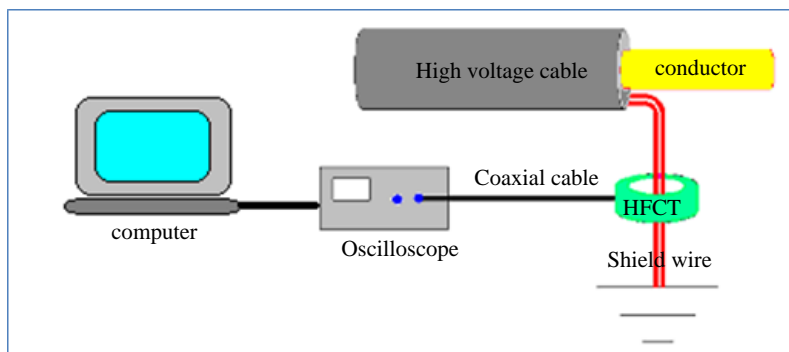
$$u(t) = \frac{C_b}{C_a + C_b} v(t) \quad (1)$$

$$i_{PD}(t) = C_a \frac{du(t)}{dt} \quad (2)$$

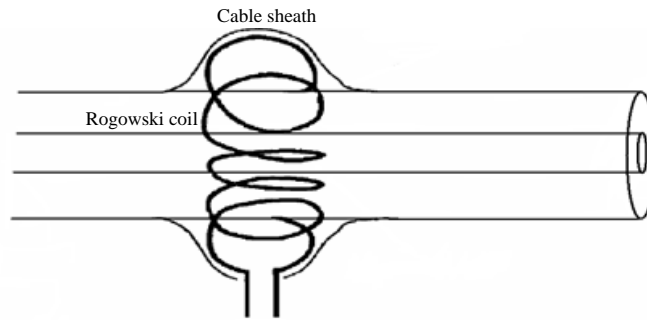
ویژگی های جریان PD رخ داده در تجهیزات فشار قوی مختلف به ویژگی های مواد داخل حفره یا حباب ها، ویژگی های عایق، فرکانس و دامنه ولتاژ و دمای حفره بستگی دارد. برای تشخیص پالس های فرکانس بالای PD، باید حسگرهای مختلفی در تجهیزات فشار قوی از جمله ترانسفورماتورهای قدرت، کابل های XLPE، کلیدهای قدرت، موتورها و ژنراتورها نصب شود.

۲-۲- حسگرهای مناسب برای تشخیص تخلیه جزئی

از میان روش های مختلف اعمال شده برای تشخیص PD رخ داده در دستگاه فشار قوی، مانند روش های صوتی، شیمیایی و الکتریکی، به دلیل حساسیت بالا، روش های الکتریکی برای تشخیص پالس های جریان PD به کار می روند. برای تشخیص این پالس های فرکانس بالا، می توان از حسگرهای مختلفی از جمله حسگرهای کوپلینگ القایی، حسگرهای کوپلینگ گالوانیک، حسگرهای کوپلینگ خازنی، حسگرهای کوپلینگ جهت دار و حسگرهای اثر هال استفاده کرد. جریان های فرکانس بالای PD، میدان مغناطیسی در اطراف خود ایجاد می کنند. میدان مغناطیسی تولید شده می تواند جریان الکتریکی متناسب با دامنه خود را در ترانسفورماتور جریانی که سیم حاوی PD را احاطه می کند، القا کند. شکل ۲، تشخیص PD کابل XLPE را با استفاده از ترانسفورماتور جریان فرکانس بالا (HFCT) نشان می دهد. شکل ۳، سیم پیچ روگوفسکی را که می تواند به عنوان یک حسگر کوپلینگ القایی برای تشخیص سیگنال های PD کابل XLPE استفاده شود، نشان می دهد.

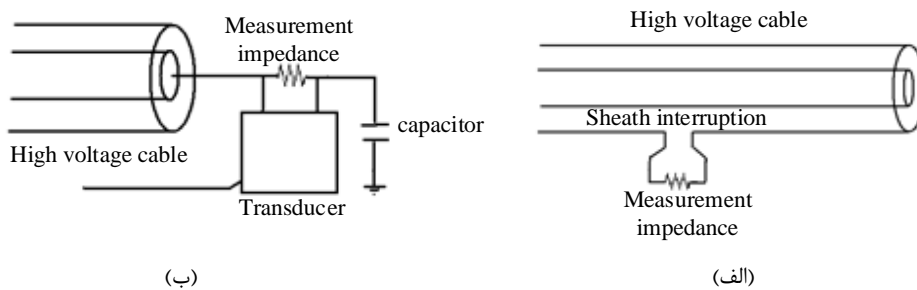


شکل ۲: تشخیص PD با استفاده از ترانسفورماتور جریان فرکانس بالا [۲۱]
Figure 2. PD detection using high frequency current transformer [21]



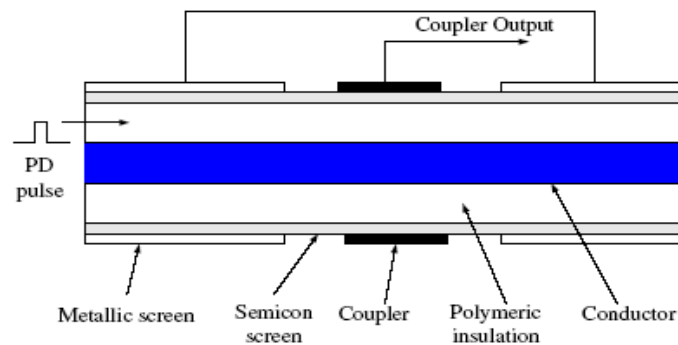
شکل ۳: سیم‌پیچ روگوفسکی [۲۲]
Figure 3. The Rogowski coil [22]

در حسگرهای کوپلینگ گالوانیک، ولتاژ تولید شده به دلیل عبور جریان PD از یک مقاومت می‌تواند برای تشخیص دامنه رخ داده در تجهیزات فشار قوی به کار رود. برای فیلتر کردن جریان فرکانس قدرت از سیگنال‌های PD، می‌توان از یک فیلتر RC پل استفاده کرد. در شکل ۴، دو حسگر گالوانیک مورد استفاده در کابل‌های XLPE برای تشخیص PD ارائه شده است.

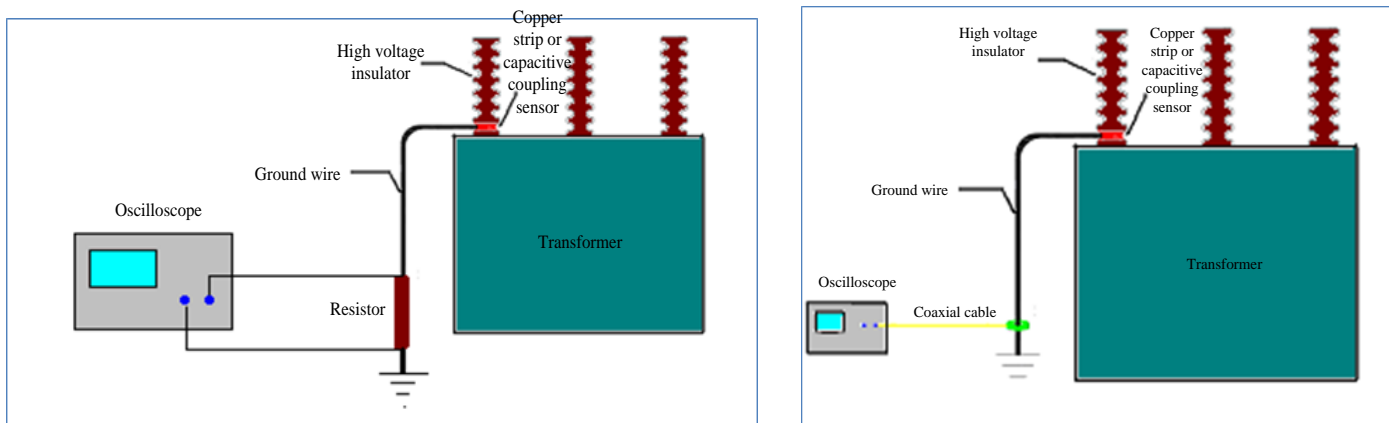


شکل ۴: حسگر گالوانیک، (الف) امپدانس قرار گرفته در غلاف کابل، (ب) امپدانس به هادی متصل شده است [۲۲]
Figure 4. The galvanic sensor, (a) impedance placed in the cable sheath, (b) impedance is connected to the conductor [22]

به دلیل فرکانس بالای PD، امپدانس خازن‌ها کاهش می‌یابد و بنابراین، پالس‌های PD می‌توانند با استفاده از حسگرهای کوپلینگ خازنی تشخیص داده شوند. در شکل‌های ۵ و ۶، حسگرهای کوپلینگ خازنی مورد استفاده برای تشخیص سیگنال‌های PD کابل‌های XLPE و ترانسفورماتورهای قدرت به ترتیب ارائه شده است.



شکل ۵: حسگر کوپلینگ خازنی مورد استفاده در کابل XLPE [۲۲]
Figure 5. The capacitive coupling sensor used in the XLPE cable [22]

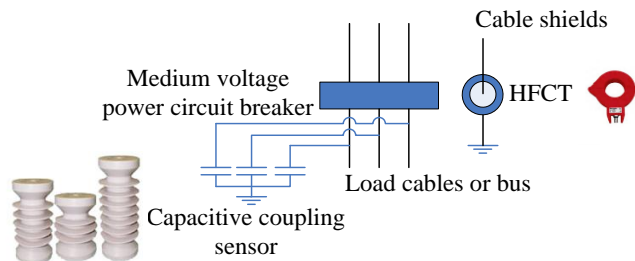


(ب)

(الف)

شکل ۶: حسگر کوپلینگ خازنی مورد استفاده در ترانسفورماتورها، (a) مجهز به HFCT، (b) مجهز به حسگر گالوانیک [۲۳-۲۴]
Figure 6. The capacitive coupling sensor used in the transformers, (a) equipped to the HFCT, (b) equipped to the galvanic sensor [23-24]

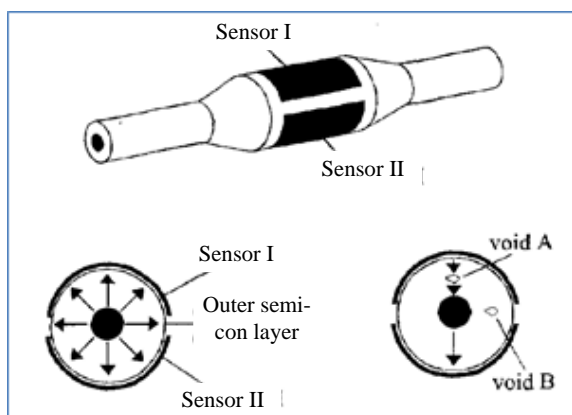
برای تشخیص PD رخ داده در کلیدهای قدرت ولتاژ متوسط، می توان از حسگرهای کوپلینگ خازنی و ترانسفورماتورهای جریان فرکانس بالا استفاده کرد، همانطور که در شکل ۷ نشان داده شده است.



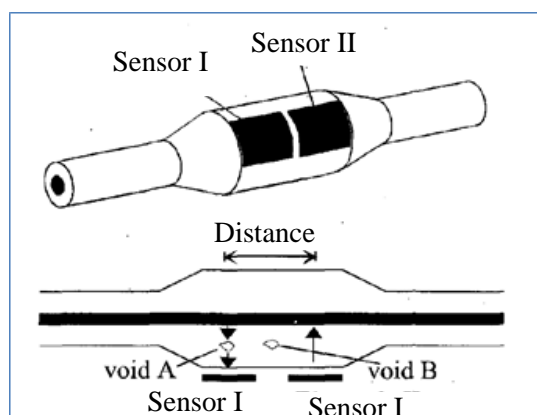
شکل ۷: تشخیص PD در کلیدهای قدرت [۲۲]

Figure 7. Detection of PD in the switchgears [22]

می توان از دو حسگر کوپلینگ خازنی در مفصل کابل برای مکان یابی منبع PD استفاده کرد، همانطور که در شکل ۸ نشان داده شده است. در این روش، دو حسگر خازنی دیفرانسیلی در امتداد یا اطراف مفصل کابل قرار می گیرند تا با استفاده از تأخیر زمانی بین سیگنال های PD تشخیص داده شده از طریق حسگرها، محل PD رخ داده در مفصل کابل را تعیین کنند.



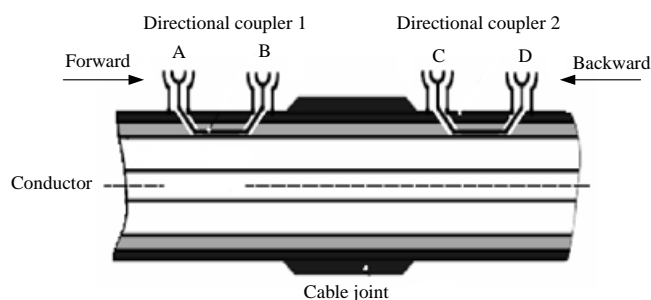
(ب)



(الف)

شکل ۸: حسگرهای خازنی دیفرانسیلی (a) در امتداد اتصال کابل، (b) در اطراف اتصال کابل [۲۲]
Figure 8. Differential capacitive sensors (a) along the cable joint, (b) around the cable joint [22]

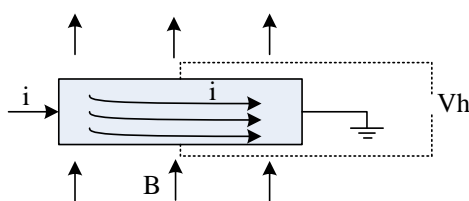
برای تعیین جهت PD رخ داده در تجهیزات فشار قوی، می‌توان از حسگرهای کوپلینگ جهت‌دار استفاده کرد. در این حسگرها، جهت PD تعیین می‌شود که می‌تواند در مکان‌یابی منبع PD کمک کند. در شکل ۹، یک حسگر کوپلینگ جهت‌دار، مبتنی بر حسگرهای کوپلینگ خازنی، که در مفصل کابل فشار قوی استفاده می‌شود، نشان داده شده است. همانطور که در شکل مشخص است، از حسگرهای A و C به صورت دیفرانسیلی برای حذف نویزها و تشخیص پالس‌های PD رو به جلو و از حسگرهای B و D برای تشخیص سیگنال‌های PD رو به عقب استفاده می‌شود.



شکل ۹: حسگر کوپلینگ جهت‌دار [۲۲]

Figure 9. Directional coupling sensor [22]

اگر یک میدان مغناطیسی از یک صفحه حامل جریان‌های الکتریکی عبور کند، طبق قانون لورنتز، میدان مغناطیسی یک نیرو بر روی جریان‌ها وارد می‌کند و آن‌ها را منحرف می‌سازد. بنابراین، یک ولتاژ بین دو طرف صفحه به نام ولتاژ اثر هال تولید می‌شود (شکل ۱۰). ولتاژ تولید شده متناسب با حاصل ضرب خارجی جریان الکتریکی و میدان مغناطیسی است و به ضخامت صفحه بستگی دارد. دامنه ولتاژ تولید شده پایین است و با استفاده از تقویت‌کننده تقویت می‌شود. حساسیت این حسگر بالا است و بنابراین می‌تواند برای تشخیص PD عبوری از هادی شیلد کابل‌های فشار قوی استفاده شود.



شکل ۱۰: اثر هال [۲۲]

Figure 10. The Hall Effect [22]

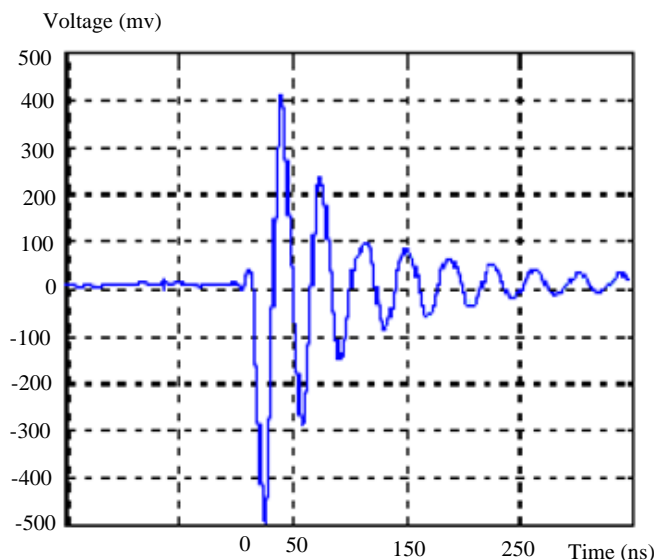
از لایه نیمه‌هادی خارجی می‌توان به عنوان یک حسگر بسیار حساس برای تشخیص PD رخ داده در کابل‌های XLPE استفاده کرد. دتکتورهای مقاومت دما (RTD) آنتن‌های رادیویی هستند که می‌توانند پالس‌های فرکانس بالای جریان‌های PD را تشخیص دهند. به دلیل پالس‌های فرکانس بالای PD، میزان تضعیف آن‌ها در کابل‌ها، سیم‌پیچ‌های ترانسفورماتورها، موتورها، ژنراتورها و سایر دستگاه‌ها زیاد است. بنابراین، ترانسفورماتورهای جریان فرکانس بالا و حسگرهای کوپلینگ خازنی که دور از منبع PD قرار دارند، نمی‌توانند آن‌ها را به درستی تشخیص دهند. با این حال، در ماشین‌های دوار مانند ژنراتورها و موتورها، RTDها نزدیک به منبع PD نصب می‌شوند و بنابراین می‌توانند پالس‌های PD را به دقت تشخیص دهند. برای تشخیص سیگنال‌های PD آنلاین تجهیزات فشار قوی، باید از تکنیک‌های حذف نویز استفاده کرد تا پالس‌های فرکانس بالای PD را از سایر نویزها استخراج نمایند.

۳- ویژگی‌های تخلیه جزئی

در این بخش، PD رخ داده در تجهیزات فشار قوی سیستم قدرت از جمله کابل‌های XLPE فشار قوی و ترانسفورماتورها تشخیص داده می‌شود و با استفاده از تجزیه و تحلیل فرکانسی، ویژگی‌های این جریان‌های فرکانس بالا تعیین می‌گردد.

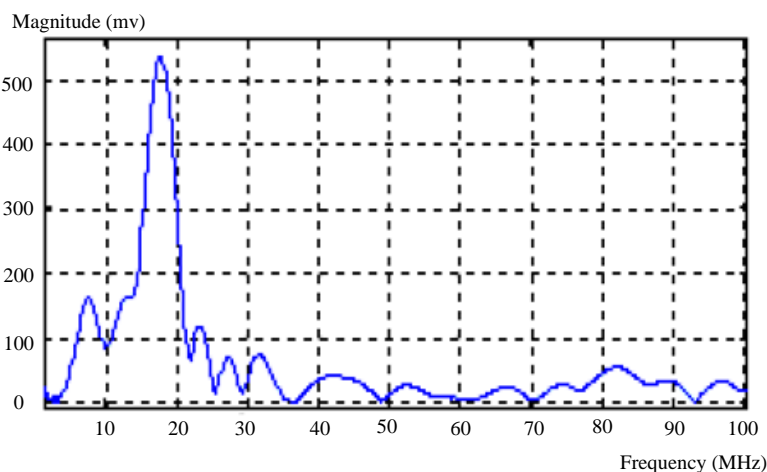
۳-۱- تخلیه جزئی کابل های پلی اتیلن کراس لینک شده

یک منبع ولتاژ AC متغیر ۲۰ کیلوولت به هادی یک کابل XLPE ۱۱ کیلوولت اعمال می شود. غلاف کابل به زمین متصل شده و با استفاده از HFCT قرار گرفته در اطراف سیم زمین، PD رخ داده در کابل مورد مطالعه تشخیص داده می شود. در شکل ۱۱، پالس PD تولید شده و در شکل ۱۲، مشخصه فرکانسی این پالس به ترتیب ارائه شده اند. همانطور که در شکل مشخص است، PD رخ داده در کابل XLPE یک پالس نوسانی است که شامل فرکانس کمتر از ۲۰ مگاهرتز با دامنه بالا و فرکانس بیش از ۲۰ مگاهرتز تا ۱۰۰ مگاهرتز با دامنه پایین است. برای تشخیص PD رخ داده در کابل XLPE، مشخصات دستگاه های پایش مانند ترانسفورماتور جریان فرکانس بالا و نوسان نگار باید مناسب انتخاب شوند.



شکل ۱۱: پالس PD رخ داده در کابل XLPE [۲۱]

Figure 11. The PD pulse occurred in XLPE cable [21]



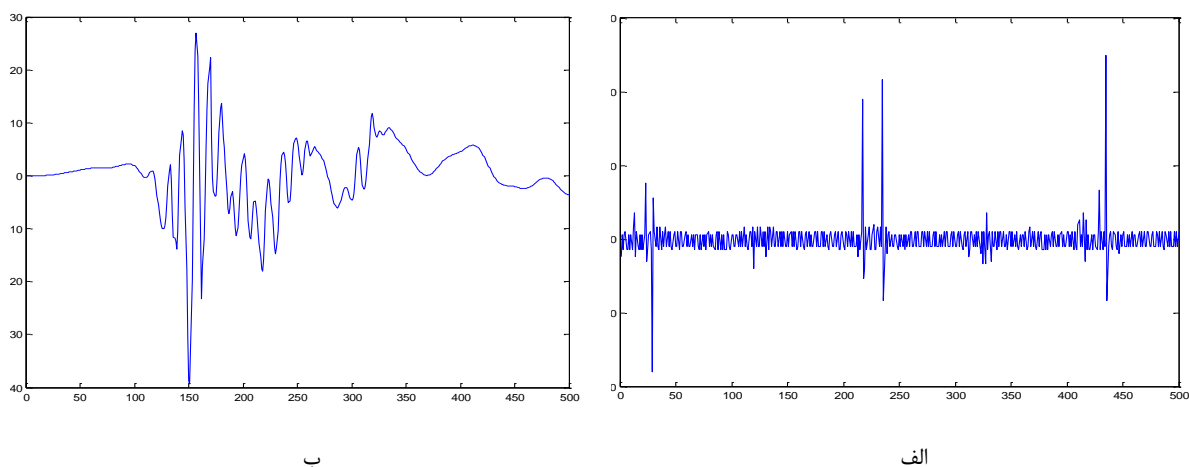
شکل ۱۲: مشخصه فرکانسی پالس PD رخ داده در کابل XLPE [۲۱]

Figure 12. The frequency-characteristic of PD pulse occurred in XLPE cable [21]

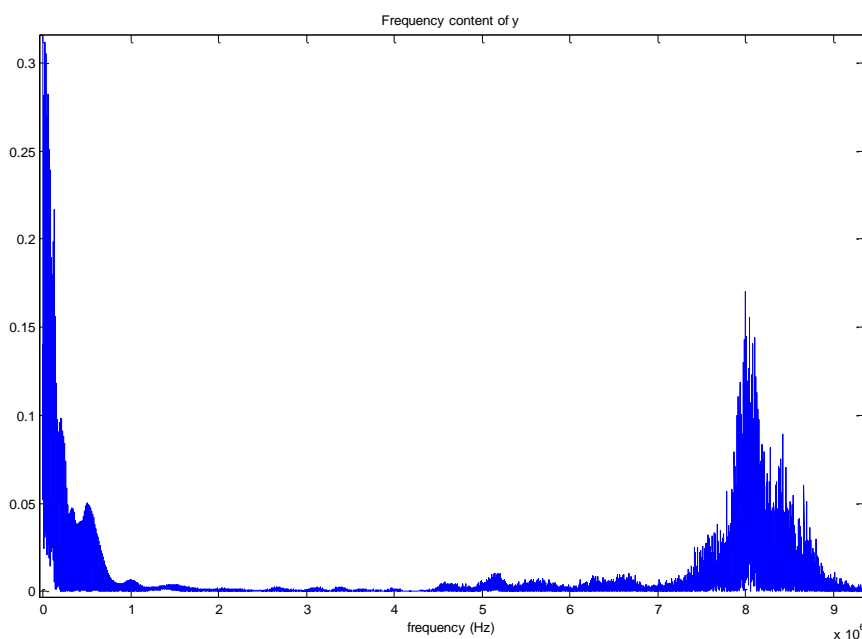
۳-۲- تخلیه جزئی در ترانسفورماتور

در این بخش یک منبع ولتاژ AC متغیر ۲۰ کیلوولت به سمت فشار قوی یک ترانسفورماتور قدیمی ۲۰ کیلوولت/۴۰۰ ولت اعمال می شود. یک نوار مسی به عنوان یک حسگر خازنی در اطراف بوشینگ فشار قوی ترانسفورماتور قرار داده شده و با استفاده از یک سیم، این نوار مسی به زمین متصل می شود. یک ترانسفورماتور جریان فرکانس بالا در اطراف سیم زمین برای تشخیص پالس های PD رخ داده در ترانسفورماتور قرار گرفته و شکل موج PD را بر روی صفحه نمایش نوسان نگار نمایش می دهد، همانطور

که در شکل ۶-a نشان داده شده است. پالس‌های PD تولید شده در شکل ۱۳ و مشخصه فرکانسی این پالس‌ها در شکل ۱۴ ارائه شده است. همان‌طور که در شکل‌ها مشخص است، دامنه پالس‌های PD مربوط به فرکانس‌های چند صد کیلوهرتز و بین ۳ تا ۷ مگاهرتز قابل توجه است.



شکل ۱۳: پالس‌های PD رخ داده در ترانسفورماتور، الف- چندین پالس، ب- یک پالس بزرگ‌نمایی شده [۲۳]
Figure 13. The PD pulses occurred in the transformer, (a) several pulses, (b) a magnified pulse [23]



شکل ۱۴: مشخصه فرکانسی پالس‌های PD رخ داده در ترانسفورماتور [۲۳]
Figure 14. The frequency characteristic of PD pulses occurred in transformer [23]

۴- مکان یابی تخلیه جزئی

در این بخش، تکنیک پیشنهادی برای مکان‌یابی PD رخ داده در تجهیزات فشار قوی معرفی می‌شود. با استفاده از نرم‌افزار EMTP-RV، خروجی‌های شبیه‌سازی برای بررسی مناسب بودن روش پیشنهادی ارائه می‌شود.

۴-۱- تکنیک مکان‌یابی

در این مقاله، یک روش جدید با در نظر گرفتن اندازه‌گیری سیگنال‌های جریان با استفاده از محاسبه همبستگی انرژی آن‌ها برای مکان‌یابی منبع PD پیشنهاد می‌شود. برای این منظور، پالس PD به تجهیزات فشار قوی تزریق می‌شود. ویژگی پالس‌های PD برای تجهیزات فشار قوی مختلف، متفاوت است و به مکانیسم‌های مختلفی که منجر به تخلیه می‌شوند، مواد عایق،

ناخالصی های داخل عایق و دامنه و فرکانس ولتاژ اعمال شده بستگی دارد. ویژگی های اصلی سیگنال های PD شامل عرض پالس، دامنه، طیف فرکانسی، زمان صعود و زمان میرایی است. بر اساس ویژگی PD مربوط به تجهیز مورد مطالعه، پالس های PD مربوطه شبیه سازی می شوند. به دلیل حرکت سیگنال های PD در عایق، پالس ها تغییر می کنند و تضعیف می شوند (دامنه و عرض پالس سیگنال ممکن است تغییر کند). الگوریتم پیشنهادی می تواند موقعیت منبع PD را بر اساس تغییر شکل سیگنال به دلیل حرکت در عایق تعیین کند. یک پایگاه داده متشکل از سیگنال های PD رخ داده در مکان های مختلف عایق باید در دسترس باشد. در این روش، فاصله بین آشکارساز تا موقعیت منبع PD تغییر می کند و در هر وضعیت، شکل موج سیگنال PD تعیین می شود. برای مکان یابی منبع PD، PD تشخیص داده شده توسط حسگرهای مناسب با سیگنال های PD رخ داده در مکان های مختلف مقایسه می شود. موقعیت منبع PD با سیگنال موجود در پایگاه داده که بیشترین شباهت را با سیگنال PD تشخیص داده شده دارد، تعیین می شود. در این مطالعه، برای تشخیص شباهت بین دو سیگنال، معیار همبستگی بین انرژی دو سیگنال طبق رابطه [۲۵] محاسبه می شود:

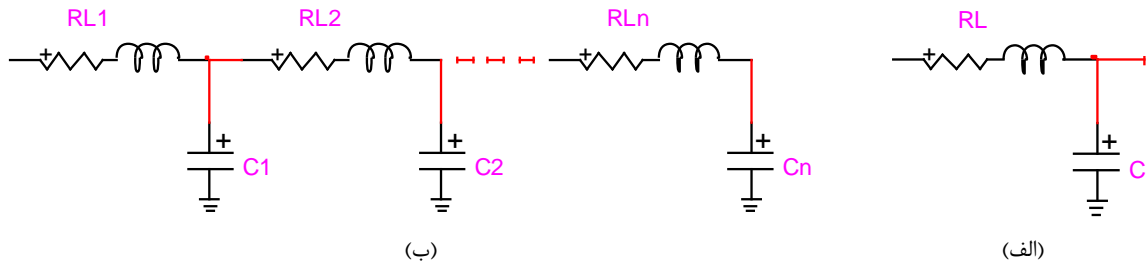
$$cor(A, B) = \frac{AB'}{\sqrt{(AA')(BB')}} \quad (3)$$

که A و B ماتریس های مرتبط با دو سیگنال هستند و A و B ماتریس ترانزاده مربوط به این دو ماتریس می باشند. پس از به دست آوردن سیگنال ثبت شده مشابه ترین به سیگنال شناسایی شده، استنباط می شود که تخلیه در نزدیکی محلی رخ می دهد که PD مربوط به سیگنال به دست آمده در پایگاه داده در آنجا واقع شده است. بنابراین، موقعیت منبع PD به طور دقیق تعیین می شود. برای پیاده سازی این روش متناظر با هر تجهیز، بر اساس ویژگی های سیگنال های PD، سیگنال PD مربوط به عایق تجهیز می تواند شبیه سازی شود. بنابراین، برای هر تجهیز، ابتدا پالس PD به بخش اول تجهیز (که می تواند سیم پیچ اول ترانسفورماتور، موتور و ژنراتور یا ابتدای طول کابل باشد) اعمال می شود و سیگنال پاسخ مربوطه، یعنی جریان دریافتی $i_1(t)$ در انتهای تجهیز (جایی که آشکارساز PD قرار گرفته) تعیین می شود. برای این حالت، موقعیت منبع PD و فاصله بین منبع PD و آشکارساز PD مشخص است و سیگنال بر اساس این فاصله در پایگاه داده ثبت می شود. همین کار برای کل بخش تجهیز (بسته به دقت، ممکن است تعداد مختلفی از دورها برای هر ترانسفورماتور، موتور و ژنراتور در نظر گرفته شود یا برای کابل های با طول های مختلف، هر بخش در نظر گرفته شود) و جریان های مربوطه، یعنی $i_2(t)$ تا $i_n(t)$ ثبت می شوند. بنابراین، پایگاه داده ای از سیگنال های پاسخ به اعمال پالس های PD در مکان های مختلف به دست می آید. برای تعیین موقعیت سیگنال های PD، با مقایسه سیگنال شناسایی شده با سیگنال های پایگاه داده، سیگنال مشابه ترین به پالس PD شناسایی شده مشخص می شود و موقعیت منبع PD تعیین می گردد.

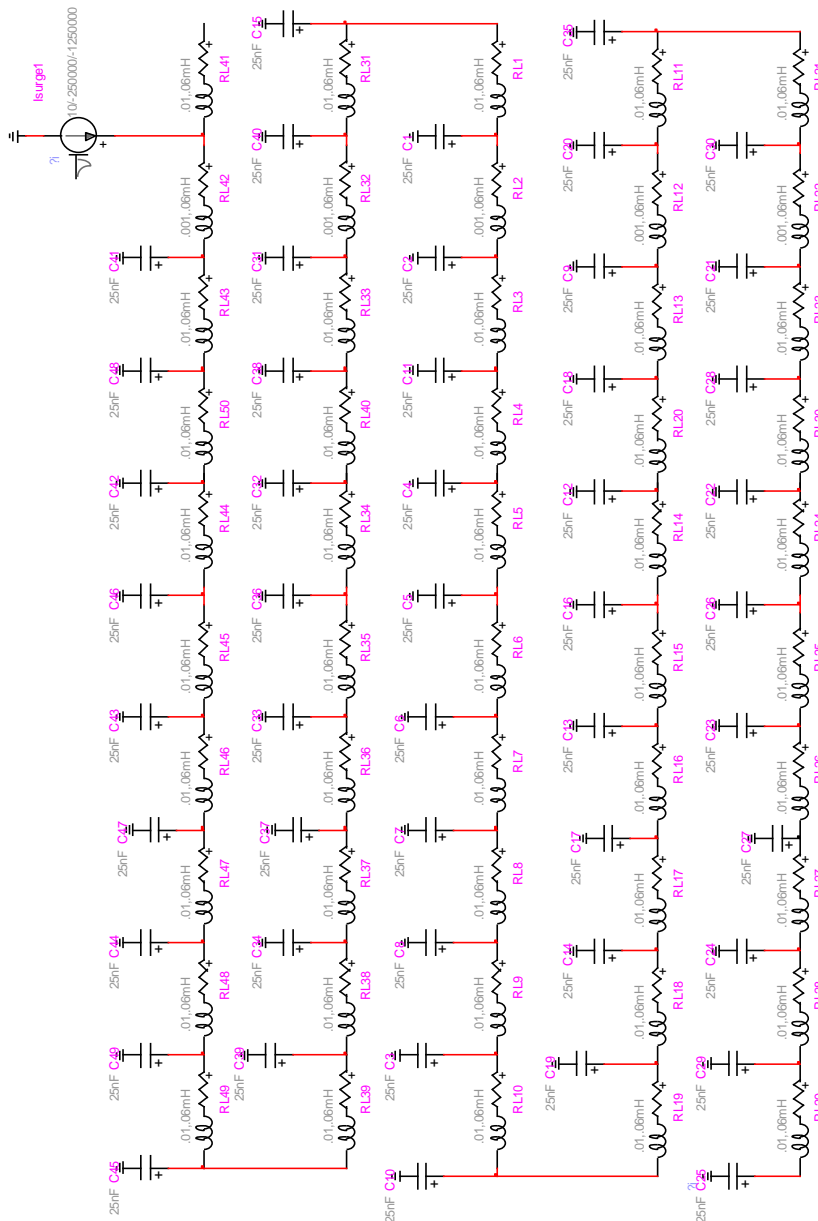
۴-۲- مطالعه موردی ۱: تخلیه جزئی در کابل های XLPE

در این بخش، از نرم افزار EMTP-RV برای شبیه سازی تکنیک پیشنهادی برای موقعیت یابی سیگنال های PD در کابل های XLPE فشار قوی استفاده می شود. به دلیل محتوای فرکانس بالای امواج PD، نمی توان از مدل متراکم برای مدل سازی تجهیزات فشار قوی سیستم قدرت استفاده کرد. بنابراین، یک مدل توزیع شده متشکل از مدارهای متراکم متعدد همانطور که در شکل ۱۵ ارائه شده است، برای این منظور پیشنهاد می شود. برای تجهیزات مختلف، مقادیر R، L و C متفاوت است. مقادیر R، L و C از [۲۲] و [۲۶-۲۷] استخراج شده است. برای افزایش دقت مدل، هر مدار متراکم می تواند طول کوتاه تری (یا تعداد کمتری از دورها) از تجهیز را مدل کند.

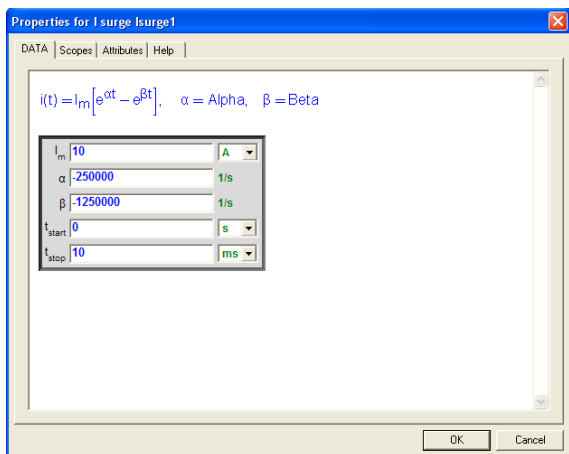
در این بخش، یک کابل XLPE در نرم افزار EMTP-RV همانطور که در شکل ۱۶ نشان داده شده است، با ۵۰ بخش متراکم مدل سازی شده است. یک پالس PD همانطور که در شکل ۱۷ نشان داده شده است، در مکان های مختلف به این کابل اعمال می شود و سیگنال های دریافتی در انتهای کابل تعیین و در شکل ۱۸ ارائه شده است. سیگنال های کامل دریافتی در انتهای کابل مربوط به اعمال سیگنال PD در مکان های مختلف نیز در شکل ۱۹ ارائه شده است.



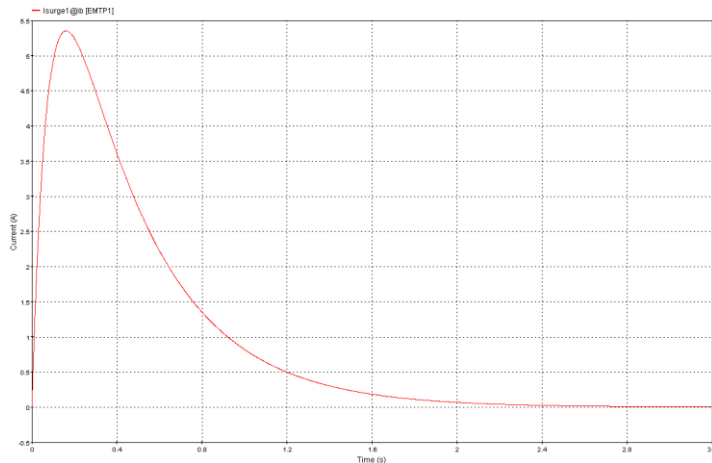
شکل ۱۵: مدل تجهیزات فشار قوی برای انتشار سیگنال‌های PD (الف) مدل یک طول کوتاه از تجهیز، (ب) مدل کامل
 Figure 15. The model of high voltage apparatus for PD signals propagation (a) the model of a short length of the equipment, (b) total model



شکل ۱۶: مدل کابل XLPE در نرم‌افزار EMTP-RV
 Figure 16. The model of the XLPE cable in the EMTP-RV software

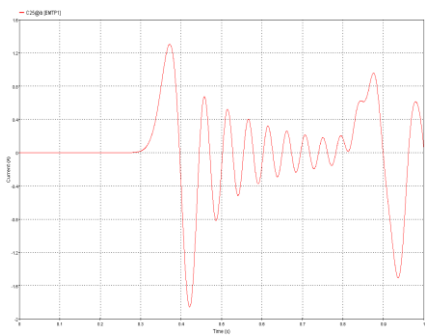


(ب)

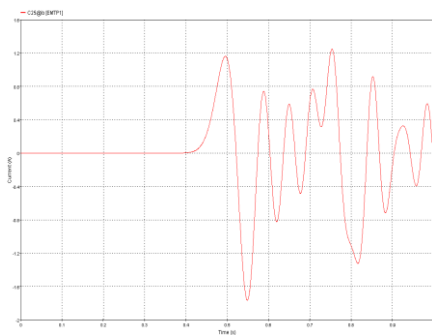


(الف)

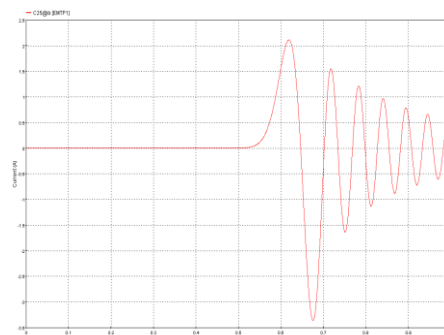
شکل ۱۷: سیگنال PD (الف) شکل موج، (ب) پارامترهای پالس
Figure 17. The PD signal (a) the waveform, (b) the parameters of the pulse



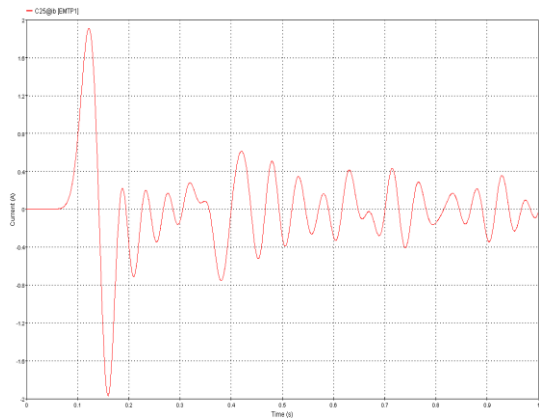
(ج)



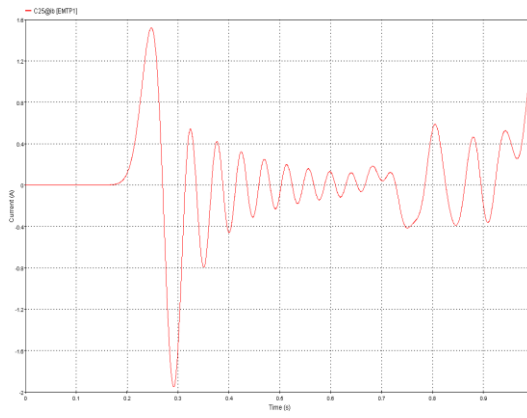
(ب)



(الف)

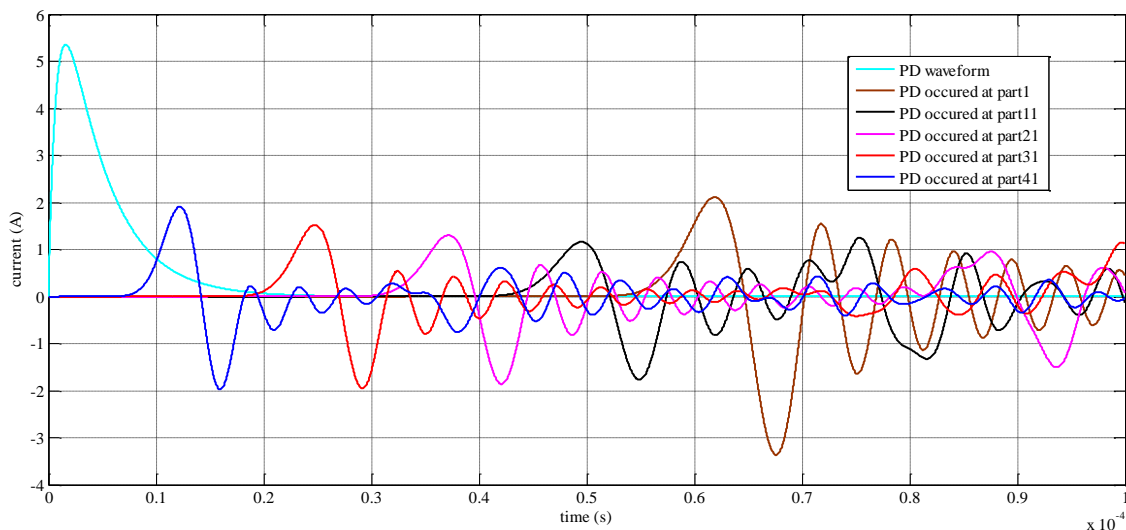


(ه)



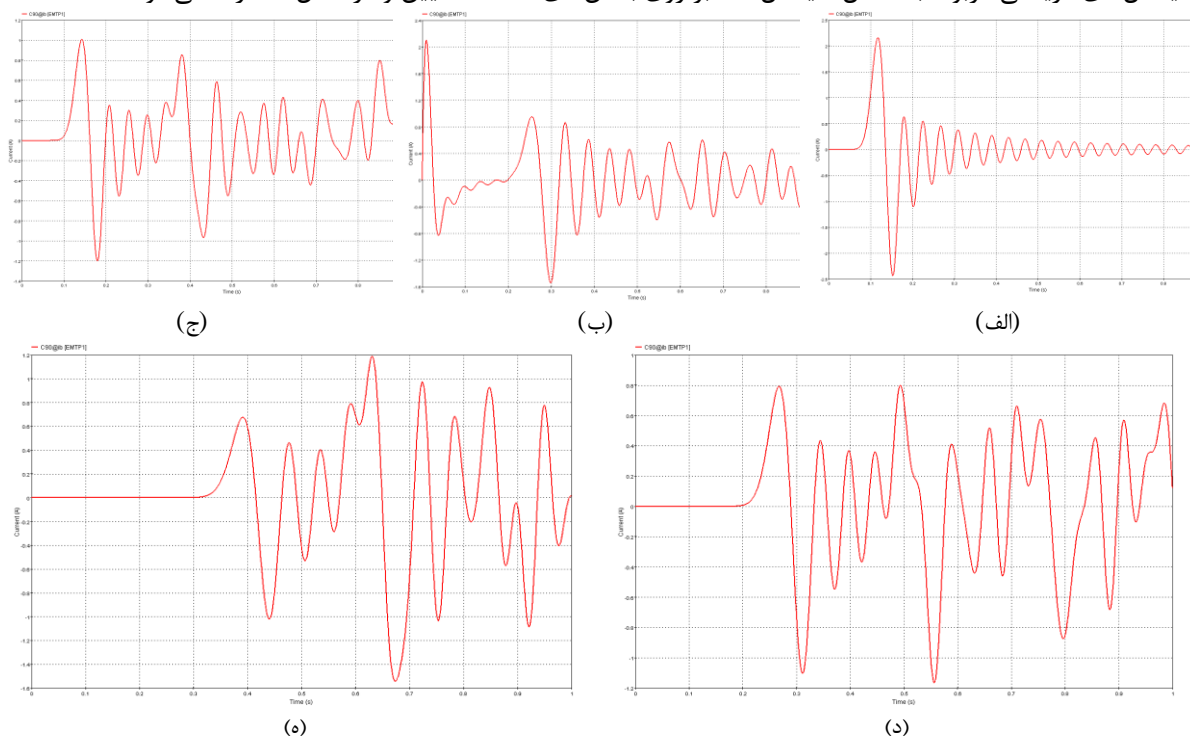
(د)

شکل ۱۸: سیگنال های دریافتی (الف) بخش ۰۱، (ب) بخش ۰۱، (ج) بخش ۲۱، (د)، بخش ۳۱، (ه) بخش ۴۱
Figure 18. The received signals (a) part 1, (b) part 11, (c) part 21, (d), part 31, (e) part 41



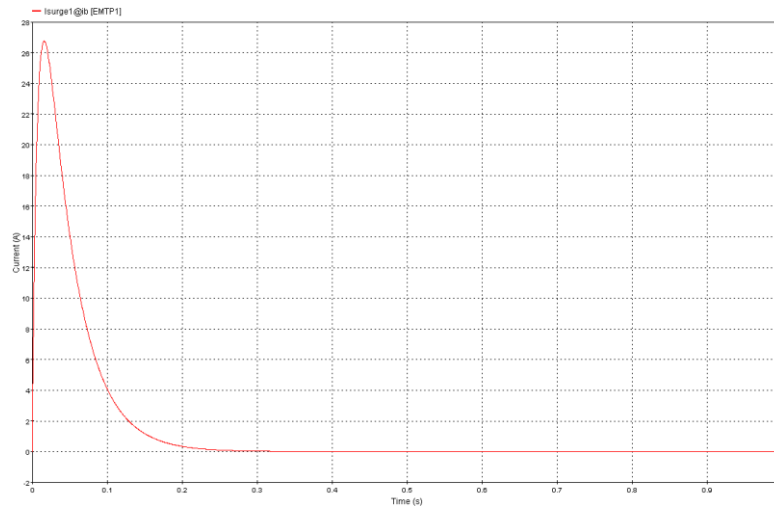
شکل ۱۹: سیگنال‌های دریافتی
Figure 19. The received signals

برای تکمیل پایگاه داده، موقعیت آشکارساز تغییر می‌کند و سیگنال‌های دریافتی مربوط به اعمال سیگنال‌های PD بر روی بخش‌های مختلف تجهیز تعیین و ثبت می‌شوند. در این مرحله، آشکارساز در ۲۰٪ طول کابل (بخش ۱۰) قرار می‌گیرد و سیگنال‌های دریافتی مربوط به اعمال سیگنال PD بر روی بخش‌های مختلف تعیین و در شکل ۲۰ ارائه می‌شوند.



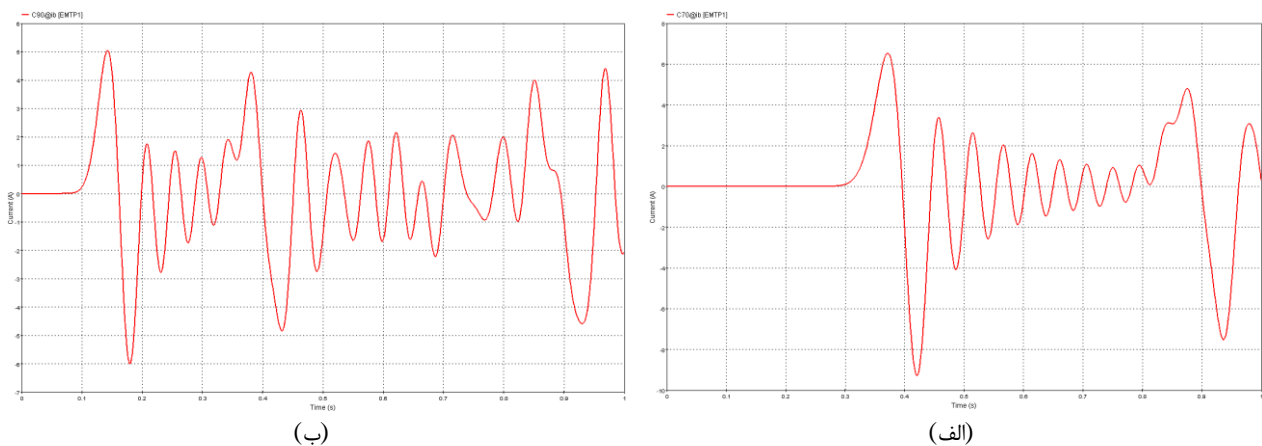
شکل ۲۰: سیگنال‌های دریافتی (الف) بخش ۰۱، (ب) بخش ۰۱۱، (ج) بخش ۰۲۱، (د)، بخش ۰۳۱، (ه) بخش ۰۴۱
Figure 20. The received signals (a) part 1, (b) part 11, (c) part 21, (d), part 31, (e) part 41

در این مرحله، یک پالس PD همانطور که در شکل ۲۱ نشان داده شده است، در بخش ۲۱ کابل اعمال می‌شود و سیگنال‌های دریافتی توسط آشکارسازهای قرار گرفته در بخش ۱۰ و انتهای کابل تعیین و در شکل ۲۲ ارائه می‌شوند. همبستگی بین سیگنال‌های ثبت شده در پایگاه داده و سیگنال‌های شناسایی شده در مرحله دوم تعیین و در جدول ۲ ارائه شده است. نتایج نشان می‌دهد که روش پیشنهادی می‌تواند منبع PD را با دقت خوبی مکان‌یابی کند.



شکل ۲۱: سیگنال PD

Figure 21. The PD signal



شکل ۲۲: سیگنال‌های دریافتی (الف) آشکارساز در انتها قرار گرفته، (ب) آشکارساز در بخش ۱۰ قرار گرفته

Figure 22. The received signals (a) detector placed at the end, (b) detector placed at part 10

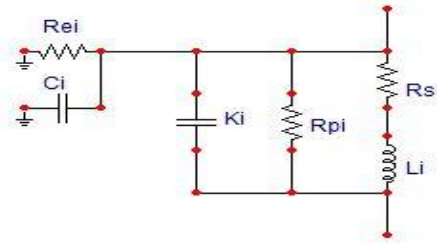
جدول ۲: همبستگی بین سیگنال‌ها

Table 2. The correlation between the signals

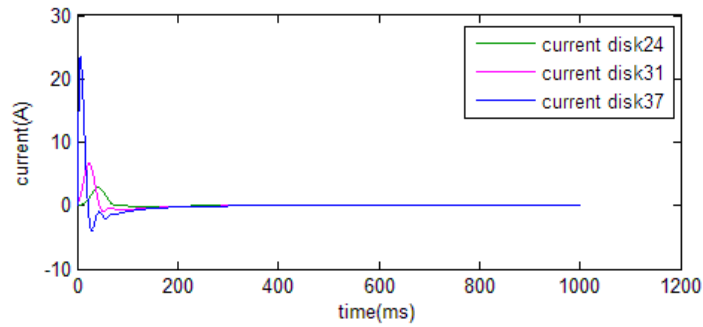
بخشی که PD اعمال شده است	۱	۱۱	۲۱	۳۱	۴۱
همبستگی با سیگنال آشکار شده در انتها	۰/۱۲۹۵	۰/۲۵۲۱	۰/۷۴۷۵	۰/۶۷۹۳	۰/۰۰۰۴
همبستگی با سیگنال آشکار شده در بخش ۱۰	۰/۱۳۳۴	۰/۴۷۴۸	۱	۰/۶۸۷۲	۰/۴۱۷۱

۴-۳- مطالعه موردی ۲: تخلیه جزئی در ترانسفورماتور

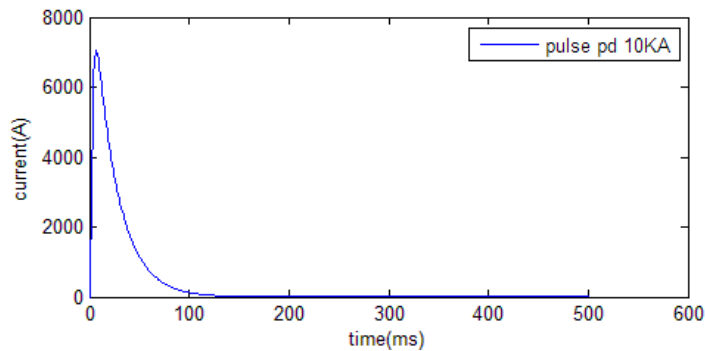
در این بخش، از نرم‌افزار ATP-Draw برای شبیه‌سازی تکنیک پیشنهادی برای مکان‌یابی سیگنال‌های PD در ترانسفورماتورها استفاده می‌شود. مدل توزیع شده معادل هر دور سیم‌پیچ ترانسفورماتور در ATP-Draw در شکل ۲۳ ارائه شده است. یک سیگنال PD همانطور که در شکل ۲۴ نشان داده شده است، به ترانسفورماتور اعمال می‌شود و سیگنال‌های دریافتی در دیسک‌های مختلف ترانسفورماتور در شکل ۲۴ ارائه شده است. سپس، یک سیگنال PD همانطور که در شکل ۲۵ نشان داده شده است، در دیسک‌های ناشناخته به ترانسفورماتور اعمال می‌شود و سیگنال‌های دریافتی در دیسک‌های مختلف تعیین و در شکل ۲۶ ارائه شده است.



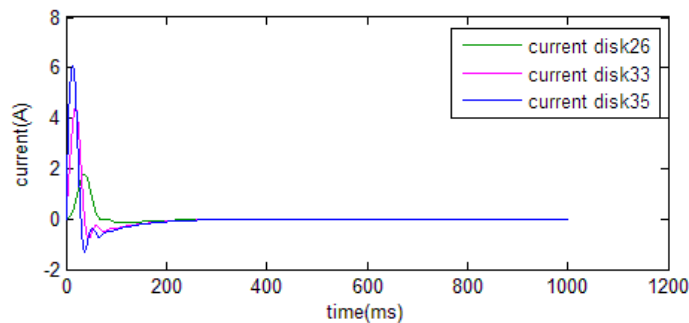
شکل ۲۳: مدل معادل هر دور سیم‌پیچ ترانسفورماتور در نرم‌افزار ATP-Draw
 Figure 23. The equivalent model of each turn of the transformer winding in the ATP-Draw software



شکل ۲۴: سیگنال‌های دریافتی
 Figure 24. The received signals



شکل ۲۵: سیگنال PD اعمال شده به ترانسفورماتور
 Figure 25. The PD signal applied to the transformer



شکل ۲۶: سیگنال‌های دریافتی
 Figure 26. The received signals

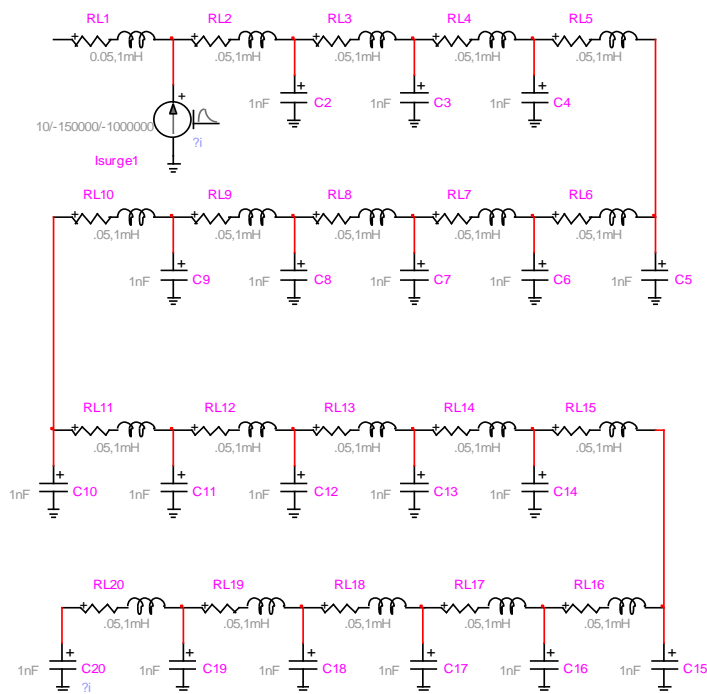
بر اساس روش پیشنهادی، همبستگی‌های بین سیگنال‌های مختلف محاسبه و در جدول ۳ ارائه شده است. این جدول نشان می‌دهد که سیگنال PD به ترتیب در دیسک‌های ۲۶ و ۳۵ ترانسفورماتور اعمال شده است.

جدول ۳: همبستگی بین سیگنال‌ها
Table 3. The correlation between signals

	I1	I2	I3	I4	I5	I6
I26	-.1185	-.1168	-.1132	-.1075	-.0991	-.0874
I35	-.1500	-.1513	-.1539	-.1576	-.1623	-.1679
	I7	I8	I9	I10	I11	I12
I26	-.0717	-.0513	-.0254	-.0068	-.0457	-.0916
I35	-.1741	-.1806	-.1870	-.1929	-.1978	-.2015
	I13	I14	I15	I16	I17	I18
I26	-.1448	-.2051	-.2720	-.3451	-.4234	-.5056
I35	-.2035	-.2036	-.2016	-.1972	-.1903	-.1804
	I19	I20	I21	I22	I23	I24
I26	-.5902	-.6749	-.7571	-.8334	-.9001	-.9529
I35	-.1671	-.1499	-.1279	-.1000	-.0650	-.0214
	I25	I26	I27	I28	I29	I30
I26	-.9876	1	-.9866	-.9451	-.8748	-.7772
I35	-.0326	-.0988	-.1785	-.2729	-.3817	-.5031
	I31	I32	I33	I34	I35	I36
I26	-.6563	-.5186	-.3727	-.2291	-.0988	-.0071
I35	-.6224	-.7617	-.8784	-.9653	1	-.9563
	I37	I38	I39			
I26	-.0779	-.1062	-.0961			
I35	-.8111	-.5684	-.2934			

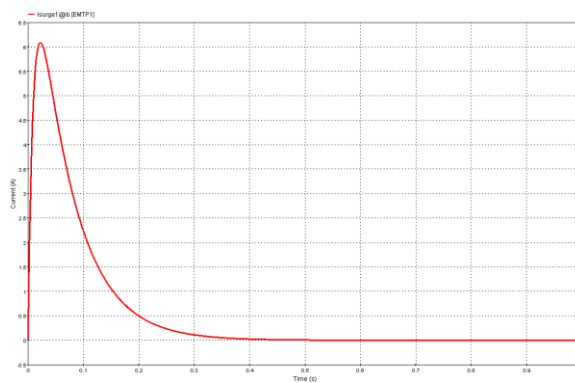
۴-۴- مطالعه موردی ۳: تخلیه جزئی در ژنراتور

در این بخش، یک سیم پیچ ژنراتور متشکل از ۲۰ مدار متراکم همانطور که در شکل ۲۷ در نرم افزار EMTP-RV نشان داده شده است، در نظر گرفته می شود. پالس PD همانطور که در شکل ۲۸ نشان داده شده است، به سیم پیچ ژنراتور اعمال می شود.

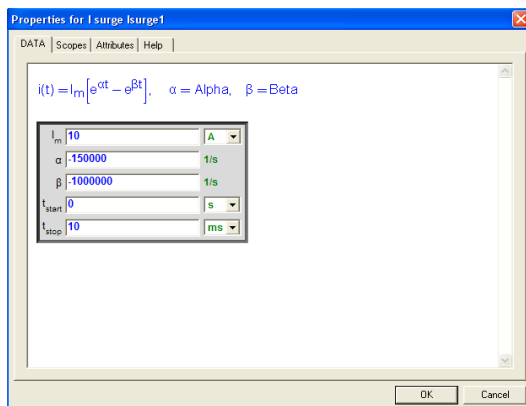


شکل ۲۷: مدل سیم پیچ ژنراتور

Figure 27. The model of the generator winding

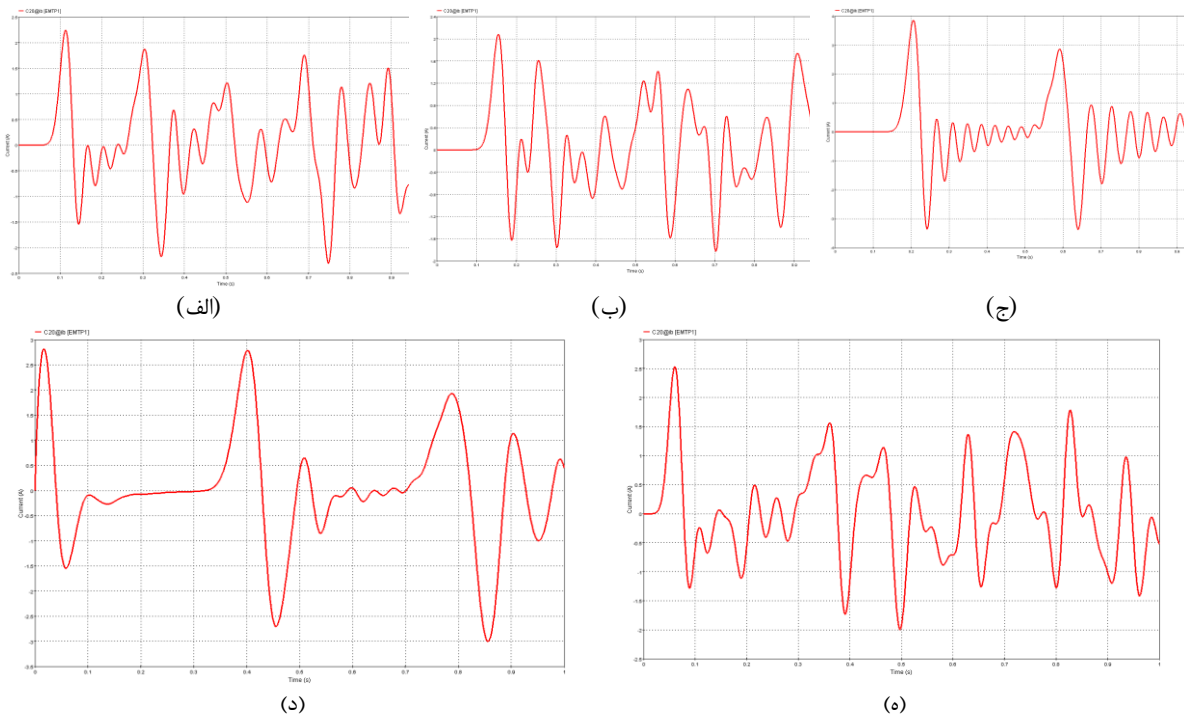


(الف)



(ب)

شکل ۲۸: سیگنال PD (الف) شکل موج، (ب) پارامترهای پالس
Figure 28. The PD signal (a) the waveform, (b) the parameters of the pulse



(الف)

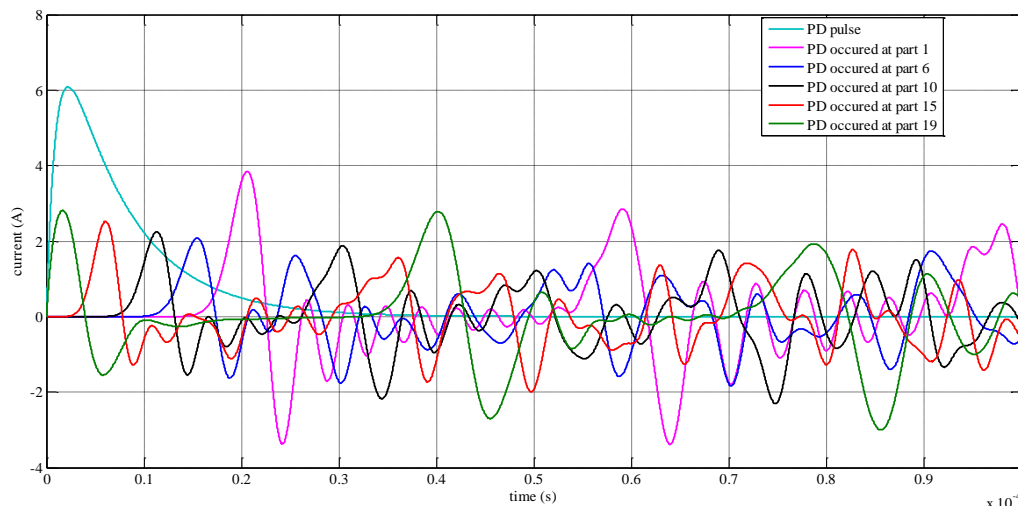
(ب)

(ج)

(د)

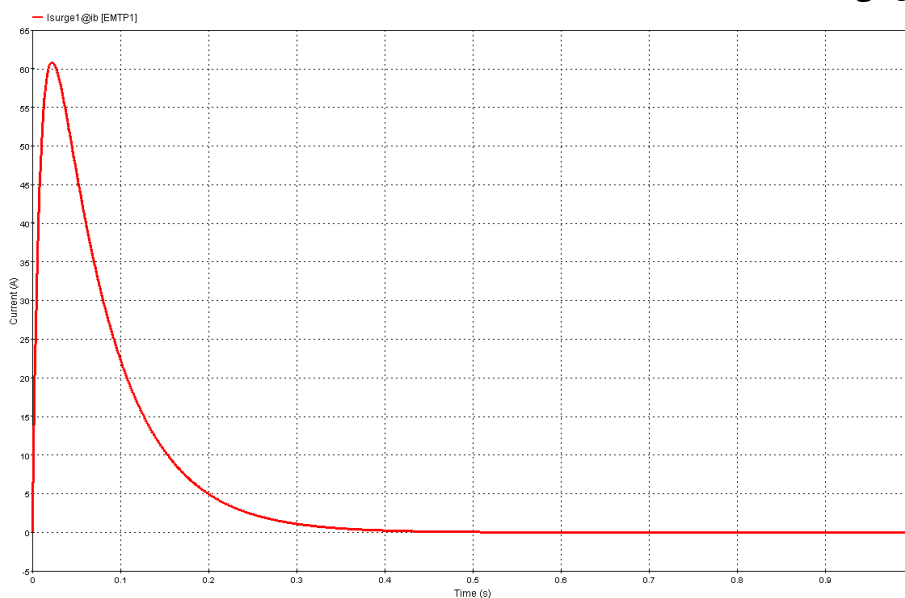
(ه)

شکل ۲۹: سیگنال‌های دریافتی (الف) بخش ۱، (ب) بخش ۶، (ج) بخش ۱۰، (د) بخش ۱۵، (ه) بخش ۱۹
Figure 29. The PD signal (a) the waveform, (b) the parameters of the pulse

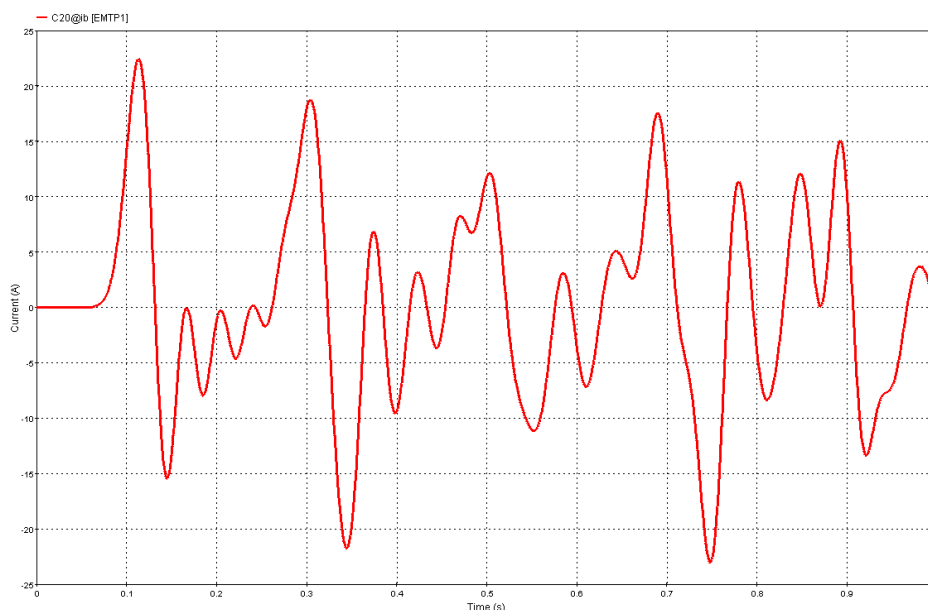


شکل ۳۰: سیگنال های دریافتی
Figure 30. The received signals

در این مرحله، موقعیت اعمال پالس PD بر روی سیم پیچ ژنراتور تغییر می کند و سیگنال های دریافتی تعیین و در شکل ۲۹ ارائه می شوند. برای مقایسه شکل موج سیگنال های دریافتی، همه شکل موجها در شکل ۳۰ رسم شده اند. همانطور که می بینید، به دلیل حرکت سیگنال های PD در عایق سیم پیچ ژنراتور، شکل موج سیگنال PD تغییر شکل می یابد. در این مرحله، یک پالس PD همانطور که در شکل ۳۱ نشان داده شده است، به عایق سیم پیچ ژنراتور در قسمت ۱۰ اعمال می شود و سیگنال دریافتی تعیین و در شکل ۳۲ ارائه می شود. معیارهای همبستگی بین سیگنال دریافتی و ۵ سیگنال دریافتی از پایگاه داده محاسبه و در جدول ۴ ارائه می شوند. این جدول نشان می دهد که روش پیشنهادی با دقت خوبی می تواند منبع PD را در ژنراتور مکان یابی کند.



شکل ۳۱: پالس اعمال شده در قسمت ۱۰
Figure 31. The PD pulse applied at part 10



شکل ۳۲: سیگنال دریافتی

Figure 32. The received signals

جدول ۴: همبستگی بین سیگنال دریافت شده و سیگنال‌های مختلف پایگاه داده

Table 4. The correlation between the received signal and different signals of database

شماره پالس PD اعمال شده	۱	۶	۱۰	۱۵	۱۹
میزان همبستگی	۰/۳۲۵۴	۰/۳۹۶۲	۱	۰/۲۵۴۵	۰/۰۹۷۵

در این بخش، برای ارائه اثربخشی روش پیشنهادی که برای مکان‌یابی سیگنال‌های PD در تجهیزات فشار قوی استفاده می‌شود، مقایسه‌ای بین روش پیشنهادی و سایر رویکردها انجام می‌شود. در [۲۸]، یک بررسی بر پیشرفت‌های اخیر انجام شده برای روش‌های مکان‌یابی PD انجام شده است. در این تحقیق، روش‌های مختلفی از جمله تکنیک رادیو فرکانسی، حسگرهای آکوستیک و نوری و روش استفاده از آنتن‌های مختلف ارزیابی می‌شوند. خطاهای مرتبط با روش‌های مختلف استفاده شده برای مکان‌یابی PD ها در جدول ۵ ارائه شده است.

جدول ۵: مقایسه روش‌های مختلف مورد استفاده برای مکان‌یابی PD

Table 5. Comparison of different methods used for localization of PDs

روش‌های استفاده شده برای مکان‌یابی PD ها:	میزان خطا
اختلاف زمانی رسیدن سیگنال به حسگرهای مستقر در مکان‌های مختلف	۰/۲۱ متر برای PD ۲، ۰/۴۵ متر برای PD ۳ در آزمایشگاه و حدود ۰/۶ تا ۲ متر خطا در حالت واقعی
فیبر نوری نوع interference-type دو حلقه ای Signac	مقدار ± 80 متر برای کابل ۶ کیلومتری
پراب فرکانس بسیار بالا	حدود ۱۰ سانتی متر
روش بازگشت زمانی الکترومغناطیسی	۰/۵ درصد خطا برای SNR=7dB
رفلکتومتری (reflectometry) حوزه زمان	۱۳۰ متر یا ۵ درصد

خطای روش پیشنهادی در مکان‌یابی سیگنال‌های PD رخ داده در تجهیزات فشار قوی، بستگی به پایگاه داده جمع آوری شده دارد. برای مثال، برای یک کابل XLPE یک کیلومتری، اگر مدل‌های فشرده سیگنال‌های PD از قسمت‌های مختلف با طول ۱ متر در دسترس باشد، خطای مکان‌یابی PD حدود ۰/۱ درصد است. بنابراین، برای یک ترانسفورماتور یا ژنراتور با ۱۰۰۰ دور، اگر مدل فشرده هر دور (یا سیگنال‌های PD رخ داده در تمام دورها) در پایگاه داده موجود باشد، خطای مکان‌یابی PD یک دور یا ۰/۱ درصد خواهد بود.

۵- نتیجه گیری

در این مقاله، تشخیص و مکان یابی سیگنال های PD رخ داده در تجهیزات فشار قوی سیستم قدرت مورد مطالعه قرار گرفته است. به دلیل ویژگی های پایش آنلاین PD تجهیزات فشار قوی سیستم قدرت، حسگرهای مختلفی از جمله حسگرهای کاپلینگ القایی مانند ترانسفورماتور جریان فرکانس بالا و بوبین روگوسکی، حسگرهای کاپلینگ خازنی، حسگرهای کاپلینگ جهتی، حسگرهای کاپلینگ گالوانیک، حسگرهای اثر هال، حسگرهای مقاومت دمایی و لایه نیمه هادی کابل معرفی شده اند. مشخصات فرکانسی سیگنال های PD رخ داده در کابل های XLPE و ترانسفورماتورها بر اساس ارزیابی فرکانسی سیگنال های PD ثبت شده در آزمایشگاه فشار قوی تعیین شده است. در این مطالعات تجربی، یک کابل XLPE ۱۱ کیلوولت و یک ترانسفورماتور ۲۰ کیلوولت/۴۰۰ ولت در نظر گرفته شده و با استفاده از منبع ولتاژ متغیر ۲۰ AC کیلوولت، PD در این تجهیزات رخ داده و با استفاده از حسگرهای پیشنهادی تشخیص داده می شود. برای تعیین موقعیت منبع PD در دستگاه های فشار قوی، این مقاله محاسبه شباهت بین سیگنال PD تشخیص داده شده و سیگنال های ثبت شده در پایگاه داده را بر اساس معیار همبستگی انرژی سیگنال ها پیشنهاد می کند. برای بررسی اثربخشی روش پیشنهادی، سه مطالعه موردی مربوط به مکان یابی سیگنال های PD رخ داده در کابل XLPE، ترانسفورماتور و ژنراتور با استفاده از نرم افزارهای EMT-PV و ATP-Draw شبیه سازی شده اند. برای تعیین معیارهای همبستگی بین سیگنال های مختلف، از نرم افزار MATLAB استفاده شده است. از خروجی های عملی نتیجه گرفته می شود که حسگرهای پیشنهادی می توانند PD رخ داده در کابل های XLPE و ترانسفورماتورها را به طور دقیق تشخیص دهند. همچنین از خروجی های شبیه سازی نتیجه گرفته می شود که روش پیشنهادی مبتنی بر همبستگی بین انرژی سیگنال ها می تواند به طور دقیق موقعیت منبع PD را در تجهیزات فشار قوی تعیین کند.

مراجع

- [1] A. Baug, N. Ray Choudhury, R. Ghosh, S. Dalai and B. Chatterjee, "Identification of single and multiple partial discharge sources by optical method using mathematical morphology aided sparse representation classifier," *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 24, no. 6, pp. 3703-3712, 2017, doi: 10.1109/TDEI.2017.006398.
- [2] Y.B. Wang, D.G. Chang, Y.H. Fan, G.J. Zhang, J.Y. Zhan and X.J. Shao, "Acoustic localization of partial discharge sources in power transformers using a particle-swarm-optimization-route-searching algorithm," *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 24, no. 6, pp. 3647-3656, 2017, doi: 10.1109/TDEI.2017.006857.
- [3] G. Parent, M. Rossi, S. Duchesne and P. Dular, "Determination of Partial Discharge Inception Voltage and Location of Partial Discharges by Means of Paschen's Theory and FEM," *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 55, no. 6, pp. 1-4, 2019, doi: 10.1109/TMAG.2019.2902374.
- [4] A.R. Mor, P.H.F. Morshuis, P. Liovera, V. Fuster and A. Quijano, "Localization techniques of partial discharges at cable ends in off-line single-sided partial discharge cable measurements," *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 23, no. 1, pp. 428-434, 2016, doi: 10.1109/TDEI.2015.005395.
- [5] A.B.J.M. Driessen, J. Van Duivenbode and P.A.A.F. Wouters, "Partial discharge detection for characterizing cable insulation under low and medium vacuum conditions," *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 25, no. 1, pp. 306-315, 2018, doi: 10.1109/TDEI.2018.006837.
- [6] A. Wadi, W. Al-Masri, W. Siyam, M.F. Abdel-Hafez and A.H. El-Hag, "Accurate Estimation of Partial Discharge Location using Maximum Likelihood," *IEEE sensors letters*, vol. 2, no. 4, pp. 1-4, doi: 10.1109/LENS.2018.2878922.
- [7] L.A. Renforth, R. Giussani, M.T. Mendiola and L. Dodd, "Online partial discharge insulation condition monitoring of complete high-voltage networks," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 55, no. 1, pp. 1021-1029, 2018, doi: 10.1109/TIA.2018.2866983.

- [8] R. Ghosh, R., B. Chatterjee and S. Dalai, "A method for the localization of partial discharge sources using partial discharge pulse information from acoustic emissions," *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 24, no. 1, pp. 237-245, 2017, doi: 10.1109/TDEI.2016.006080.
- [9] C. Gao, W. Wang, S. Song, S. Wang, L. Yu and Y. Wang, "Localization of partial discharge in transformer oil using Fabry-Pérot optical fiber sensor array," *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 25, no. 6, pp. 2279-2286, 2018, doi: 10.1109/TDEI.2018.007065.
- [10] L. Duan, J. Hu, G. Zhao, K. Chen, J. He and S.X. Wang, "Identification of partial discharge defects based on deep learning method," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 34, no. 4, pp. 1557-1568, 2019, doi: 10.1109/TPWRD.2019.2910583.
- [11] M.Y. Wang, B.X. Du, X.T. Han and Z.L. Li, "Effects of magnetic field on partial discharge in epoxy resin for superconducting coil insulation," *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, vol. 31, no. 8, pp. 1-3, 2021, doi: 10.1109/TASC.2021.3116560.
- [12] A. Villa, L. Barbieri and R. Malgesini, "Precise partial discharge localization in axisymmetric geometries," *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 27, no. 2, pp. 606-612, 2020, doi: 10.1109/TDEI.2019.008444.
- [13] T. Okamoto and H. Uehara, "Partial Discharge Current Measurements with Small Discharge Gaps Over Polyimide Film," *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 30, no. 1, pp. 158-164, 2022, doi: 10.1109/TDEI.2022.3226133.
- [14] G. D. P.Mahidhar, R. Sarathi and B. Srinivasan, "Fluorescence fiber based identification of partial discharges in liquid nitrogen for high-temperature superconducting power apparatus," *IEEE Sensors Letters*, vol. 4, no. 2, pp. 1-4, 2020, doi: 10.1109/LESEN.2020.2971015.
- [15] Z. Li, Z. Zhang, T. Han, B. Du, J. Li and L. Zhang, "Effect of Harmonic Voltage On Partial Discharge Properties of LN 2/PPLP Insulation for HTS DC Cable," *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, vol. 31, no. 8, pp. 1-4, 2021, doi: 10.1109/TASC.2021.3091055.
- [16] M. Ren, Ming, J. Zhou and J. Miao, "Adopting spectral analysis in partial discharge fault diagnosis of GIS with a micro built-in optical sensor," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 36, no. 2, pp. 1237-1240, 2020, doi: 10.1109/TPWRD.2020.3028511.
- [17] Y. Li, J. Han, Y. Du and H. Jin, "Time-frequency Maps for Multiple Partial Discharge Sources Separation in Cable Terminations," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 38, no. 3, pp. 2228-2231, 2023, doi: 10.1109/TPWRD.2023.3256127.
- [18] L. Lu, S. Ichimura and T. Rokunohe, "Interaction between partial discharge and generated bubbles under repeated lightning impulses in transformers using a complex structure model," *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 28, no. 2, pp. 727-735, 2021, doi: 10.1109/TDEI.2020.009341.
- [19] C. He, L. Zhang, X. Zhang, J. Li and X. Yao, "Study on the influence of switching impulse superposition phase on AC partial discharge of epoxy surface in SF 6 Gas," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 35, no. 3, pp. 1596-1598, 2019, doi: 10.1109/TPWRD.2019.2941121.
- [20] J. Tian, G. Zhang, C. Ming, L. He, Y. Liu, J. Liu and X. Zhang, "Design of a Flexible UHF Hilbert Antenna for Partial Discharge Detection in Gas-insulated Switchgear," *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 22, no. 4, pp. 794-798, 2022, doi: 10.1109/LAWP.2022.3225627.
- [21] A. Ghaedi, M. Moeini Aghtaie and A. Ghaffari, "Detection of online PD signals in XLPE cables using the Bhattacharyya distance," *Turkish Journal of Electrical Engineering and Computer Sciences*, vol. 24, no. 5, pp. 3552-3563, 2016, doi: 10.3906/elk-1410-10.
- [22] D. Pommerenke, T. Strehl, R. Heinrich, W. Kalkner, F. Schmidt and W. Weissenberg, "Discrimination between internal PD and other pulses using directional coupling sensors on HV cable systems," *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 6, no. 6, pp. 814-824, doi: 10.1109/94.822021.

- [23] M. Ghaffarian, M. Vakilian, V. Parvin and A. Ghaedi, "Investigation of online detected partial discharges in power transformer," *Australasian Universities Power Engineering Conference*, Sydney, NSW, Australia, 2008, pp. 1-6.
- [24] A.R. Alesaadi, A. Ghaedi, A. Ghaffari and V. Parvin, "De-noising of Online PD Signals in Power Transformers Using the Bhattacharyya Distance," *Trends in Applied Sciences Research*, vol. 7, no.10, pp. 813-828, 2012, doi: tasr.2012.813.828.
- [25] T. Pham-Gia and V. Choulakian, "Distribution of the sample correlation matrix and applications," *Open Journal of Statistics*, vol. 4, no. 5, 2014, doi: 10.4236/ojs.2014.45033.
- [26] N. Kartalović, D. Kovačević and S. Milosavljević, "An advanced model of partial discharge in electrical insulation," *Facta universitatis-series: Electronics and Energetics*, vol. 24, no. 1, pp. 41-55, 2011, doi: 10.2298/FUEE1101041K.
- [27] A. Mazhab Jafari, A. Akbari, H. R. Mirzaei, M. Kharezi and M. Allahbakhshi, "An algorithm for partial discharge localization in transformers using winding design data," *International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis*, Beijing, China, 2008, pp. 919-922, doi: 10.1109/CMD.2008.4580433.
- [28] J.Q. Chan, W.J.K. Raymond, H.A. Illias and M. Othman, "Partial Discharge Localization Techniques: A Review of Recent Progress," *Energies*, vol. 16, no. 6, p. 2863, 2023, doi: 10.3390/en16062863.

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>



Low-Power and Reliable Approximate Subtractors for Image Processing Applications

Fatemeh Pooladi, Ph.D. Student¹  | Farshad Pesaran, Assistant Professor^{2*}  | Nabiollah Shiri, Assistant Professor³ 

¹Department of Electrical Engineering, Shiraz Branch, Islamic Azad University, Shiraz, Iran, Fatemehpooladi353@gmail.com

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

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

Correspondence

Farshad Pesaran, Assistant Professor, Department of Electrical Engineering, Shiraz Branch, Islamic Azad University, Shiraz, Iran
farshad.pesaran@iau.ac.ir

Received: 10 June 2023

Revised: 29 June 2023

Accepted: 12 July 2023

Abstract

In this paper, two new approximate subtractors are presented. The proposed circuits are implemented based on gate diffusion input (GDI) and dynamic threshold (DT) techniques and are named Proposed-1 and Proposed-2. The Proposed-1 subtractor has 10 transistors, while Proposed-2 has 12 transistors. Subtractors are implemented by 32 nm carbon nanotube field effect transistor (CNTFET) technology. Various studies have been performed and show the high efficiency and performance of the circuits in different conditions without reducing their output voltage, which is caused by the use of DT in their implementation. The proposed circuits use XOR and NOT gates, both of which have 4 out of 8 error states. The presented subtractors can be implemented in an unsigned non-recovery divider with different structures including vertical, horizontal, square and triangular, etc., and finally, they can be used in image processing applications to detect the difference between two images, either medical or standard images. The simulation results show the better performance of the proposed circuits, Proposed-1 and Proposed-2 save PDP of 88.36% and 83.25%, respectively.

Keywords: Approximate Computing, Subtractor, GDI technique, CNTFET

Highlights

- Using of approximate computing and GDI technique to reduce power consumption
- Integration of DT technique and CNTFET technology to solve problems of GDI gates
- Design of low-power and small-area approximate subtractors due to the use of only 10 and 12 transistors

Citation: F. Pooladi, F. Pesaran, and N. Shiri, "Low-Power and Reliable Approximate Subtractors for Image Processing Applications," *Journal of Southern Communication Engineering*, vol. 14, no. 53, pp. 53–66, 2024, doi: 10.30495/jce.2023.1988196.1208, [in Persian].

تفریق کننده های تقریبی کم مصرف و قابل اعتماد برای کاربردهای پردازش تصویر

فاطمه پولادی^۱ | فرشاد پسران*^۲ | نبی اله شیری^۳^۱گروه مهندسی برق، دانشکده فنی و مهندسی، واحد شیراز، دانشگاه آزاد اسلامی، شیراز، ایران، Fatemehpoladi353@gmail.com^۲گروه مهندسی برق، دانشکده فنی و مهندسی، واحد شیراز، دانشگاه آزاد اسلامی، شیراز، ایران، Farshad.pesaran@ian.ac.ir^۳گروه مهندسی برق، دانشکده فنی و مهندسی، واحد شیراز، دانشگاه آزاد اسلامی، شیراز، ایران، Na.shiri@iau.ac.ir

نویسنده مسئول

*فرشاد پسران، استادیار، گروه مهندسی برق، دانشکده فنی و مهندسی، واحد شیراز، دانشگاه آزاد اسلامی، شیراز، ایران، Farshad.pesaran@ian.ac.ir

تاریخ دریافت: ۲۰ خرداد ۱۴۰۲

تاریخ بازنگری: ۸ تیر ۱۴۰۲

تاریخ پذیرش: ۲۱ تیر ۱۴۰۲

<https://doi.org/10.30495/jce.2023.1988196.1208>

چکیده:

در این مقاله، دو تفریق کننده تقریبی جدید ارائه شده است. مدارهای پیشنهادی براساس تکنیک های ورودی انتشار گیت (GDI) و آستانه دینامیکی (DT) پیاده سازی شده اند و مدار پیشنهادی ۱ و مدار پیشنهادی ۲ نام گذاری شده اند. تفریق کننده پیشنهادی ۱ دارای ۱۰ ترانزیستور است، در حالی که مدار پیشنهادی ۲ دارای ۱۲ ترانزیستور است. تفریق کننده ها توسط فناوری ترانزیستور اثر میدانی نانولوله کربنی ۳۲ نانومتری (CNTFET) پیاده سازی می شوند. مطالعات مختلفی انجام شده و نشان دهنده راندمان و عملکرد بالای مدارها در شرایط مختلف بدون کاهش ولتاژ خروجی آنهاست که ناشی از استفاده از DT در اجرای آنها می باشد. مدارهای پیشنهادی از گیت های XOR و NOT استفاده می کنند که هر دو دارای ۴ حالت از ۸ حالت خطا هستند. تفریق کننده های ارائه شده را می توان در یک تقسیم کننده بدون علامت با ساختارهای مختلف اعم از عمودی، افقی، مربع و مثلثی و غیره پیاده سازی کرد و در نهایت می توان از آنها در برنامه های پردازش تصویر برای تشخیص تفاوت بین دو تصویر اعم از پزشکی یا پزشکی استفاده کرد. تصاویر استاندارد نتایج شبیه سازی عملکرد بهتر مدارهای پیشنهادی، مدار پیشنهادی ۱ و مدار پیشنهادی ۲ را به ترتیب ۸۸/۳۶٪ و ۸۳/۲۵٪ صرفه جویی در PDP نشان می دهد.

کلید واژه ها: محاسبات تقریبی، تفریق، تکنیک دروازه ورودی انتشار، ترانزیستورهای اثر میدانی نانولوله کربنی

۱-مقدمه

محاسبات تقریبی (AC)^۱ به عنوان یک تکنیک نوظهور است که می تواند برای طراحی مدارها و سیستم های کم مصرف استفاده شود. برای بسیاری از مدارهای محاسباتی تقریبی پیشنهادی، درک یک روش طراحی یا تقریب مهم است. خواص جمع کننده های کامل^۲ (FAS)، ضرب کننده ها^۳ و تقسیم کننده های تقریبی^۴ برای عملکرد بهتر بهینه شده اند. محاسبات تقریبی عمدتاً برای مدارهای حسابی مانند جمع، تفریق، ضرب و تقسیم مناسب هستند [۱]. در مقایسه با جمع و ضرب، تفریق و تقسیم کمتر مورد توجه قرار گرفته است [۲]. از مدارهای محاسباتی می توان در پردازش تصویر، افزایش وضوح، فشرده سازی و ضرب ارزیابی می شوند. علاوه بر این، مدارهای در پردازش تصویر به عنوان یک برنامه مقاوم در برابر خطا قابل استفاده هستند [۳-۴].

¹ Approximate Computing (AC)² Full adders (FA)³ Multiplier⁴ dividers

جدول ۱: مقایسه تفریق‌کننده‌های تقریبی

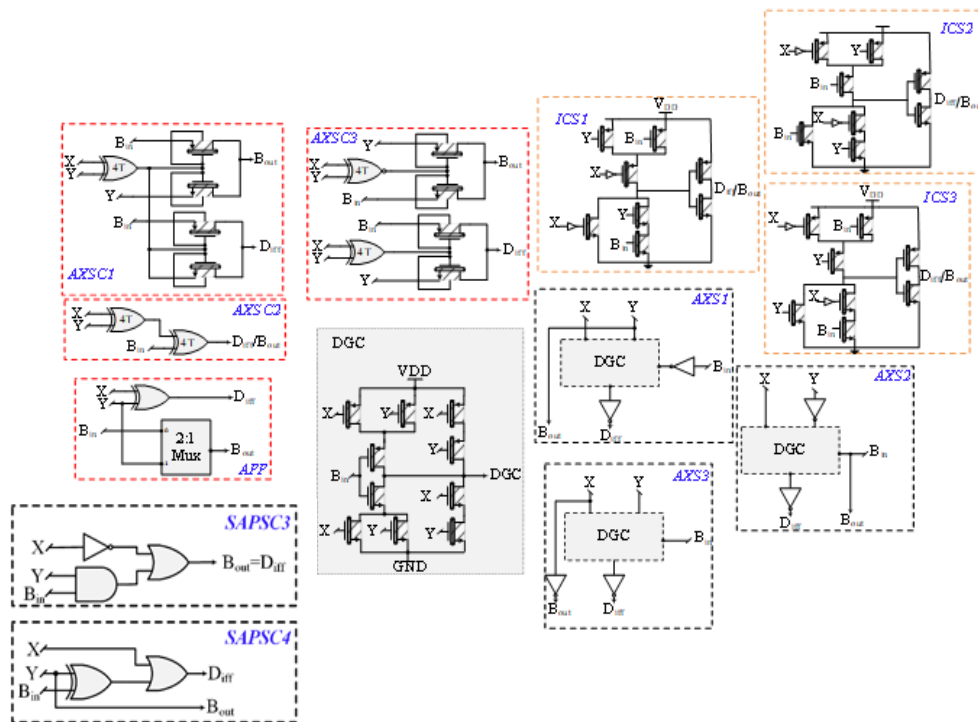
Table 1: Comparison of approximate subtractors

Name	Difference (D)	Borrow (B _{out})
AXSC1 [۶]	$(X \oplus Y) \oplus B_{in}$	$\overline{(X \oplus Y)}.B_{in} + \overline{XY}$
AXSC2 [۶]	$X \oplus Y \oplus B_{in}$	$D \text{ or } B_{out}$
AXSC3 [۶]	B_{out}	$\overline{(X \oplus Y)}.B_{in} + \overline{XY}$
AXS1 [۱۲]	$\overline{B}_{in} (X + Y) + XY$	Y
AXS2 [۱۲]	$B_{in} (X + \overline{Y}) + X\overline{Y}$	B_{in}
AXS3 [۱۲]	$B_{in} (X + Y) + XY$	\overline{X}
ICS1 [۳]	B_{out}	$\overline{X} + YB_{in}$
ICS2 [۳]	B_{out}	$Y + \overline{X}B_{in}$
ICS3 [۳]	B_{out}	$B_{in} + \overline{XY}$
Apps [۱۳]	$X \oplus Y$	$B_{in} \overline{(X \oplus Y)} + Y(X \oplus Y)$
SAPSC1 [۱۴]	$B_{out} + X\overline{Y}\overline{B}_{in}$	$\overline{X}(Y + B_{in}) + YB_{in}$
SAPSC2 [۱۴]	B_{out}	$\overline{X}(Y + B_{in}) + YB_{in}$
SAPSC3 [۱۴]	B_{out}	$\overline{X} + YB_{in}$
SAPSC4 [۱۴]	$X + (Y \oplus B_{in})$	Y
SAPSC5 [۱۴]	$\overline{X} + YB_{in}$	Y
SAPSC6 [۱۴]	$X + Y$	Y

مدار تفریق‌کننده^۱ (FS) کامل عملیات تفریق سه ورودی را انجام می‌دهد و دو خروجی تولید می‌کند. ورودی‌های مدار X ، Y ، B_{in} و D هستند که D نشان‌دهنده اختلاف بین X و Y است و B_{in} بیت قرض است. خروجی مدارها تفاوت و B_{out} است. مهمترین کاربرد تفریق‌کننده در طراحی تقسیم‌کننده‌ها است و تقسیم‌کننده‌ها در پردازش تصویر برای تقسیم‌بندی پیکسل، تشخیص تغییر و حذف پس‌زمینه استفاده می‌شوند [۳، ۴]. در [۵] چندین طرح تفریق‌کننده تقریبی برای جایگزینی تفریق‌کننده‌های دقیق در تقسیم‌کننده‌های بازبازی و غیربازیابی کننده کم توان طراحی شده است. یک تقسیم‌کننده احیا کننده کم توان با استفاده از یک سلول تقریبی تقریبی [۶] طراحی شد. برای رفع برخی از اشکالات اصلی مدارهای تفریق‌کننده دقیق، طراحان مدارهای تقریبی را طراحی کرده‌اند. در عملکرد یک تفریق، دقت B_{out} به‌طور کلی با اهمیت تراز D است. بنابراین، در طراحی $AXSC$ ، B_{out} بدون تغییر است [۶]. تاخیر را می‌توان با ترکیب D و B_{out} کاهش داد. عمق جایگزینی d برای نشان دادن تعداد $AXSC$ های جایگزین شده به جای $EXSC$ است. البته هر چه عمق بیت تقریبی در یک ساختار آبشاری بیشتر باشد، احتمال خطا بیشتر است. در [۷] سلول‌های تفریق‌کننده ارائه شده‌اند که جایگزین سلول تفریق‌کننده دقیق در تقسیم‌کننده می‌شوند که انرژی را کاهش می‌دهد. تقسیم‌کننده تقریبی ترکیبی با ترکیب یک تقسیم‌کننده لگاریتمی تقریبی با یک تقسیم‌کننده بازیابی طراحی شده است [۸]. این مقاله یک کمپرسور تقریبی جدید ۴:۲ با ۱۲ ترانزیستور را معرفی می‌کند. اجرای این کمپرسور با استفاده از فناوری ترانزیستور اثر میدانی نانولوله کربنی ۱۶ نانومتری (CNTFET) حداقل مساحت را به همراه دارد [۹]. FA و کمپرسورها هسته‌های اصلی آی‌سی‌ها مانند ضرب‌کننده‌ها، تفریق‌کننده‌ها و فیلترهای دیجیتال هستند و به دلیل میزان بالای مصرف انرژی شناخته شده‌اند [۱۰-۱۱]. در این مقاله دو مدار تفریق‌کننده جدید ارائه و تحلیل شده است. به‌طور کلی در مورد مدارهای تفریق‌کننده تقریبی، صرف‌نظر از ساختار فیزیکی آنها، این مدارها را می‌توان به دو گروه تقسیم کرد: برخی مدارها دارای خطای کم و برخی دارای خطای زیاد هستند. مدارها در جدول ۱ مقایسه شده‌اند. در [۶] تفریق‌کننده‌های AXSC1-AXSC3 ارائه شده‌اند که با استفاده از تکنیک CMOS و TG پیاده‌سازی شده‌اند. از این سه مدار، در AXSC1 و AXSC3، خروجی B_{out} دقیق

¹ Full subtractor (FS)² Difference (D_{diff})

است، درحالی که خروجی D دارای خطا است. برخلاف دو مدار قبلی، در AXSC2، B_{out} تقریبی است. شکل ۱ شماتیک مدارهای مورد بررسی را نشان می دهد. در AXSC2، B_{out} = D_{diff} یا B_{in} = B_{out} در حالی که در AXSC3، B_{out} = D با یک خروجی تقریبی. طبق جدول ۲، Apps دارای ۴ خطا از ۸ خطا است، بقیه طرحها دارای دو خطا هستند، به جز سه مورد ICS1-ICS3 که دارای یک خطا هستند، اگرچه این سه مدار خطای کمتری نسبت به بقیه طرحها دارند. پیچیده تر هستند. بنابراین عملکرد این مدارها توان بالا و تاخیر زیاد در سطح ترانزیستور را نشان می دهد. سه طرح از AXS1-AXS3 [۱۲] شامل DGC مبتنی بر CMOS^۱ است. DGC مسیره های بین V_{DD} و GND و هم چنین گره های داخلی را افزایش می دهد که به معنای افزایش توان استاتیک است. طرح های [۱۲] باعث ایجاد خطا در D و B_{out} شد. با این حال، AXS1-AXS3 دارای ۲ حالت خطا از ۸ حالت است. بنابراین، اکثر این مدارها تعداد خطاهای بالایی دارند. این مدارها دارای چند اینورتر با استفاده از DGC در ساختار خود هستند که باعث افزایش مساحت این مدارها شده است. مدار Apps [۱۳] یکی از ساده ترین مدارهایی است که دارای XOR و مالتی پلکسر (MUX) در ساختار خود است، B_{out} آن دقیق و D تقریبی با ۴ خطا است. این مدار شامل XOR و MUX معمولی با تکنیک CMOS، هر کدام دارای ۱۲ ترانزیستور و ۴ ترانزیستور به عنوان اینورتر است که تعداد ترانزیستورها را افزایش داده است. یکی از تحقیقاتی که اخیراً در مورد مدارهای تفریق کننده تقریبی منتشر شده است [۱۴] است که در آن از تکنیک تفریق کننده های تقریبی ساده شده (SAPSCs) استفاده شده است و بر این اساس، ۶ مدار مبتنی بر CMOS ارائه شده است. SAPSC1 با بیشترین تعداد ترانزیستور، ۴۴، به عنوان مبنای ساده سازی در نظر گرفته شده است. SAPSC2 تا SAPSC6 تعداد بسیار کمتری ترانزیستور دارند که به ترتیب برابر با ۲۶، ۱۴، ۱۸، ۱۴ و ۶ می باشد. نکته قابل توجه در برخی از این طرحها ضریب خطای بالای آن است. به عنوان مثال SAPSC5 و SAPSC6 دارای ۵ و ۴ خطا در خود هستند. نکته قابل توجه در برخی از این طرحها میزان خطای بالای آن است.



شکل ۱. طرح های تفریق کننده های تقریبی ICS1-ICS3 [۳]، AXSC1-AXSC3 [۶]، AXS1-AXS3 [۱۲]، و APP [۱۳]، و SAPSC3- SAPSC4 [۱۴].
Figure 1. Schemes of approximate subtractors of ICS1-ICS3 [3], AXSC1-AXSC3 [6], AXS1-AXS3 [12], and APP [13] and SAPSC3-SAPSC4 [14].

¹ Complementary Metal-Oxide Semiconductor (CMOS)

جدول ۲: جدول درستی تفریق‌کننده‌های تقریبی.

Table 2: Accuracy table of approximate subtractors.

	EXACT	AXSC1	AXSC2	AXSC3	ICS1	ICS2	ICS3	Apps	AXS1	AXS2	AXS3	SAPSC3	SAPSC4	Proposed-1	Proposed-2	
XYB _{in}	B _{out} D _{diff}	B _{out} D _{diff}	B _{out} D _{diff}	B _{out} D _{diff}	B _{out} D _{diff}	B _{out} D _{diff}	B _{out} D _{diff}	B _{out} D _{diff}	B _{out} D _{diff}	B _{out} D _{diff}	B _{out} D _{diff}	B _{out} D	B _{out} D	B _{out} D	B _{out} D	B _{out} D
...	..	..	..	..	۱۱	..	..	..	..	..	..	۱۱	۱۱	..	۱۱	۱۱
۰۰۱	۱۱	۱۱	۱۱	۱۱	۱۱	۱۱	۱۱	۱۰	..	۱۱	۱۱	۱۱	۱۱	۰۱	۱۱	۱۱
۰۱۰	۱۱	۱۱	۱۱	۱۱	۱۱	۱۱	۱۱	۱۱	..	..	۱۱	۱۱	۱۱	۱۱	۱۱	۱۱
۰۱۱	۱۰	۱۱	..	۱۱	۱۰	۱۰	۱۰	۱۱	۱۰	۱۰	۱۰	۱۱	۱۰	۱۱	۱۱	۱۱
۱۰۰	۰۱	۰۱	۱۱	..	۰۱	۰۱	۰۱	۰۱	۰۱	۰۱	۰۱	..	۰۱	۱۰	۱۰	۱۰
۱۰۱	..	۰۱	..	..	..	۰۱	۱۱	۰۱	..	۱۱	..	..	۰۱	۱۰	۱۱	۱۱
۱۱۰	..	..	..	..	..	۱۱	..	..	۱۱	..	..	..	۱۱	۰۱	۰۱	۰۱
۱۱۱	۱۱	۱۱	۱۱	۱۱	۱۱	۱۱	۱۱	۱۰	۱۱	۱۱	..	۱۱	۱۱	۱۱	۱۱	۱۱
ER	-----	۰/۲۵	۰/۲۵	۰/۲۵	۰/۱۲۵	۰/۱۲۵	۰/۱۲۵	۰/۵	۰/۲۵	۰/۲۵	۰/۲۵	۰/۲۷۵	۰/۳۷۵	۰/۵	۰/۵	۰/۵
NMED	-----	۰/۰۸۳۳	۰/۰۸۳۳	۰/۰۸۳۳	۰/۰۴۱۶	۰/۰۴۱۶	۰/۰۴۱۶	۰/۱۶۶۶	۰/۰۸۳۳	۰/۰۸۳۳	۰/۰۸۳۳	۰/۱۲۵	۰/۱۲۵	۰/۱۶۶۶	۰/۱۶۶۶	۰/۱۶۶۶
MRED	-----	۰/۱۸۷۵	۰/۳۷۵	۰/۱۸۷۵	۰/۳۷۵	۰/۳۷۵	۰/۳۷۵	۰/۲۷۰۸	۰/۲۵	۰/۲۵	۰/۲۵	۰/۳۱۲۵	۰/۳۳۳۳	۰/۴۳۷۵	۰/۴۳۷۵	۰/۴۳۷۵

* اعداد آبی بدترین نتایج هستند.

به‌عنوان مثال، SAPSC5 و SAPSC6 به ترتیب ۵ و ۴ خطا در خروجی‌های خود دارند که نمی‌توان آنها را گزینه‌های مناسبی برای استفاده در برنامه‌های کاربردی مقاوم به خطا اما حساس مانند پردازش تصویر بایو دیجیتال در نظر گرفت. توجه داشته باشید که SAPSC6 بدون استفاده از ورودی B_{in} طراحی شده است، بنابراین زمانی که در ساختارهای مختلف مبتنی بر ریپل کری مانند تقسیم‌کننده‌ها تعبیه می‌شود، مشکلات متفاوتی مشاهده می‌شود. همچنین SAPSC2 با وجود داشتن ۳ خطا در خروجی‌های خود و استفاده از ۲۶ ترانزیستور و تعداد اینورترهای تعبیه شده در ورودی و خروجی، در ارزیابی‌های اولیه عملکرد خوبی نداشته است. در نهایت، از میان ۶ مدار پیشنهادی در [۱۴]، SAPSC3 و SAPSC4 را می‌توان گزینه‌های مطلوبی برای مقایسه با مدارهای دیگر در نظر گرفت. صنعت نیمه‌هادی برای کاهش مقیاس مدارهای مجتمع با چالش‌های زیادی مواجه است. ترانزیستورهای مبتنی بر نانولوله‌های کربنی به دلیل ابعاد بسیار کوچک، سرعت بالا و مصرف انرژی کم و همچنین عملکرد مشابه با CMOS، توجه طراحان مدارهای منطقی و سیستم‌های دیجیتال را به خود جلب کرده‌اند. بنابراین در این مقاله از فناوری - 32 CNTFET نانومتری برای بررسی مدارها استفاده شده است. ارزیابی خطا در مدارهای تقریبی انجام می‌شود، پارامترهای اصلی مطابق با [۱۷]، ER^۱، NMED^۲ و MRED^۴ هستند که به ترتیب در روابط ۱ الی ۳ ارائه می‌شوند.

$$ER = \frac{\text{Total Number of Errors at Output}}{n} \quad (1)$$

$$NMED = \frac{\frac{1}{n} \left(\sum_{i=1}^n |Exact_{output_i} - Approximate_{output_i}| \right)}{Exact_{Max_{out}}} \quad (2)$$

$$MRED = \frac{1}{n} \frac{\left(\sum_{i=1}^n |Exact_{output_i} - Approximate_{output_i}| \right)}{Exact_{out_i}} \quad (3)$$

از طرح‌های علامت‌گذاری شده، مقادیر ER و NMED برنامه‌ها به ترتیب ۰/۵ و ۰/۱۶۶۶ هستند که از سایر طرح‌ها بالاتر هستند. ICS و AXSC2 دو فاصله خطا دارند |±۲| و بالاترین مقدار MRED با ۰/۳۷۵ و |۳-|، بنابراین AXSC2 و ICS بالاترین حساسیت را از نظر دقت خروجی دارند. محاسبات تقریبی به‌عنوان یک رویکرد جدید در طراحی کارآمد انرژی و همچنین افزایش

¹ Carbon Nanotube Field-Effect Transistor (CNTFETs)

² Error Rate (ER)

³ Normalized Average Error Interval (NMED)

⁴ Average Relative Error Interval (MRED)

عملکرد یک سیستم محاسباتی با کاهش محدودیت در دقت پدیدار شده است [۱۹]. در این مقاله، مدارهای محاسباتی تقریبی در مقیاس نانو برای کاربردهای تشخیص تغییر طراحی شده است. سازماندهی مقاله بدین شرح است: بخش ۲ جزئیات کاملی در مورد مدارهای پیشنهادی ارائه می‌دهد. نتایج شبیه‌سازی در بخش ۳ بیان شده است. و در نهایت، بخش ۴ نتیجه‌گیری مقاله می‌باشد.

۲-تفریق‌کننده‌های تقریبی پیشنهادی مبتنی بر GDI

دو تفریق‌کننده کامل تقریبی برای دستیابی به سادگی به‌عنوان یکی از اصول اصلی مدارهای مبتنی بر تقریب پیشنهاد شده است. بلوک دیاگرام این مدارها در شکل ۲-الف و ۲-ب نشان داده شده است و به ترتیب مدار پیشنهادی ۱ و مدار پیشنهادی ۲ نامگذاری شده‌اند. علاوه بر این، سطح ترانزیستور مدار پیشنهادی ۱ و مدار پیشنهادی ۲ به ترتیب در شکل ۲ (ج) و (د) نشان داده شده است. مدار پیشنهادی ۱ و مدار پیشنهادی ۲ به دلیل داشتن ۴ خطا در خروجی مشابه مدار APP به‌عنوان مدارهایی با تعداد خطاهای بالا طبقه‌بندی می‌شوند [۱۳]. شباهت هر مدار پیشنهادی استفاده از تکنیک GDI^۱ است و روابط آنها به ترتیب در (۴)-(۵) آورده شده است. تکنیک GDI به دلیل مزایای آن مانند کاهش سطح، کاهش پیچیدگی و تعداد کمی ترانزیستور استفاده می‌شود [۲۰، ۲۱].

$$\text{Proposed-1} = \begin{cases} D_{diff} = (\bar{X} + \bar{Y}) + B_{in} \\ B_{out} = \bar{X} + Y \end{cases} \quad (4)$$

$$\text{Proposed-2} = \begin{cases} D_{diff} = (\bar{X} + \bar{Y}) + B_{in} \\ B_{out} = (\bar{X} + Y) + B_{in} \end{cases} \quad (5)$$

با توجه به جدول ۲، مدار پیشنهادی ۱ و مدار پیشنهادی ۲ دارای ۴ خطا هستند، این خروجی‌ها زمانی نادرست هستند که $\bar{X}YB_{in} = 000$ ، $\bar{X}YB_{in} = 011$ ، $\bar{X}YB_{in} = 101$ ، و $\bar{X}YB_{in} = 110$. با استفاده از GDI، تعداد ترانزیستورها در مدارهای پیشنهادی کمتر از بقیه مراجع است، مدار پیشنهادی ۱ دارای ۱۰ ترانزیستور و مدار پیشنهادی ۲ دارای ۱۲ ترانزیستور است. این ویژگی به دستیابی به هدف اصلی محاسبات تقریبی یعنی کاهش مساحت اشغال شده و محاسبات ساده کمک می‌کند. دلیل استفاده از محاسبات تقریبی، ساده کردن روابط پیچیده، کاهش مصرف انرژی، افزایش سرعت انتقال داده، کاهش انرژی و استفاده از برنامه‌های کاربردی تحمل خطا است [۲۳، ۲۴]. ادغام روش طراحی و فناوری یک راه قابل اعتماد و کارآمد برای غلبه بر خروجی‌های غیر کامل سلول‌های GDI است. با توجه به [۲۶، ۲۷]، تکنیک آستانه دینامیکی که با اتصال بخش عمده به گیت ترانزیستور تعیین می‌شود، رابطه ولتاژ خروجی را با ولتاژ ورودی نشان می‌دهد. این تکنیک ولتاژ نوسان را بهبود می‌بخشد. علاوه بر این، استفاده از DT^۲ در کنار استفاده از فناوری CNTFET مفید است. CNTFETها توانایی بالایی در کنترل ولتاژ آستانه با تنظیم صحیح بردارهای کاپرالیته و قطرهای CNT دارند [۲۸]. بنابراین، استفاده از این تفریق‌کننده‌ها در برنامه‌ای که در برابر خطاها پایدار است، سودمند است. مدارهای مدار پیشنهادی ۱ و مدار پیشنهادی ۲ دارای ۴۳۷۵/۰ برای پارامتر MRED با ۴ خطا در خروجی خود هستند (جدول ۲). شکل موج ورودی-خروجی تفریق‌کننده‌های پیشنهادی در شکل ۳ آورده شده است که در آن خروجی‌های تمام نوسان به دلیل تکنیک DT هستند.

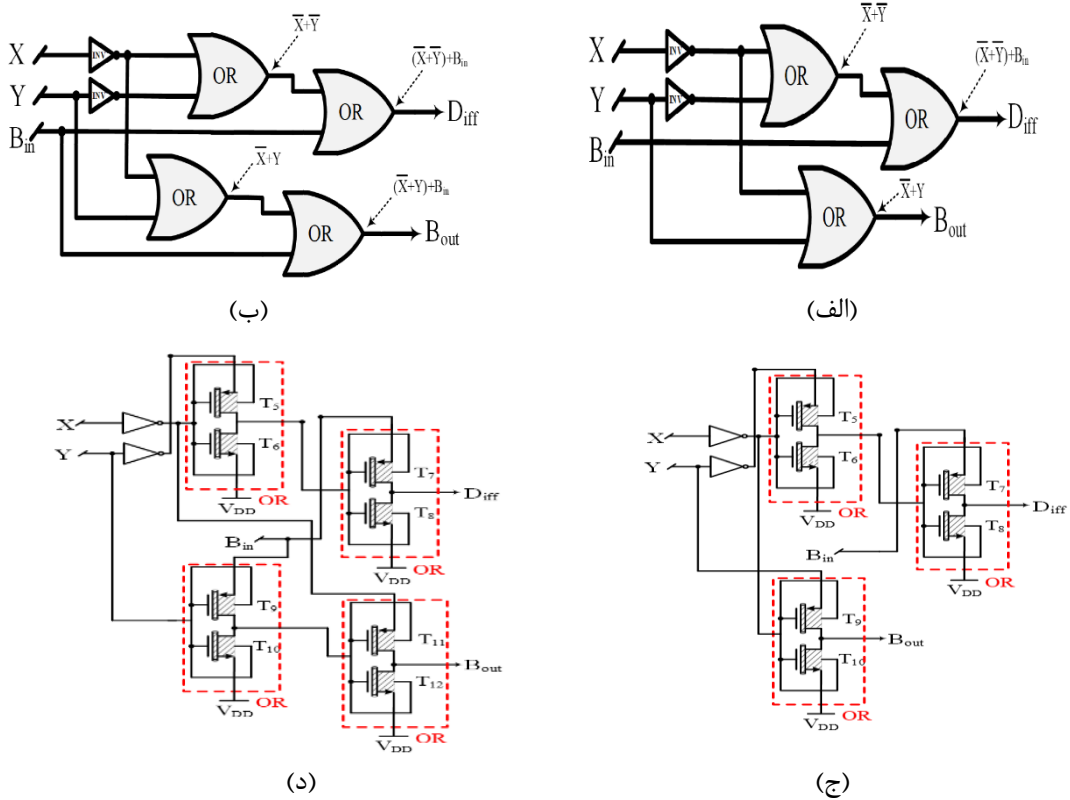
در جدول ۳ مشخصات طرح‌های ارائه شده و مراجع ارائه شده است. اکثر مدارها با تکنیک CMOS هستند، به جز AXSC1-AXSC3 که بر اساس تکنیک TG^۳ و CMOS پیاده‌سازی شده‌اند. ضمناً ساختار این مدارها در سطح گیت و ترانزیستور نیز در جدول ۳ ذکر شده است که تأثیر بسزایی در افزایش مساحت مدارها دارد. هم‌چنین می‌توان دید که ICS1-ICS3 دارای بیشترین تعداد ترانزیستور است که باعث افزایش مساحت می‌شود. با این حال، مدارهای پیشنهادی دارای مساحت مناسبی هستند. یکی دیگر از ویژگی‌های طرح‌های ارائه شده در این مقاله این است که از حداقل تعداد اینورتر در ساختار خود استفاده می‌کنند. اگرچه برخی از این طرح‌ها مانند SAPSC6 تنها دارای ۶ ترانزیستور هستند، اما این طرح بدون در نظر گرفتن ورودی Bin اجرا

¹ Gate Diffusion Input (GDI)

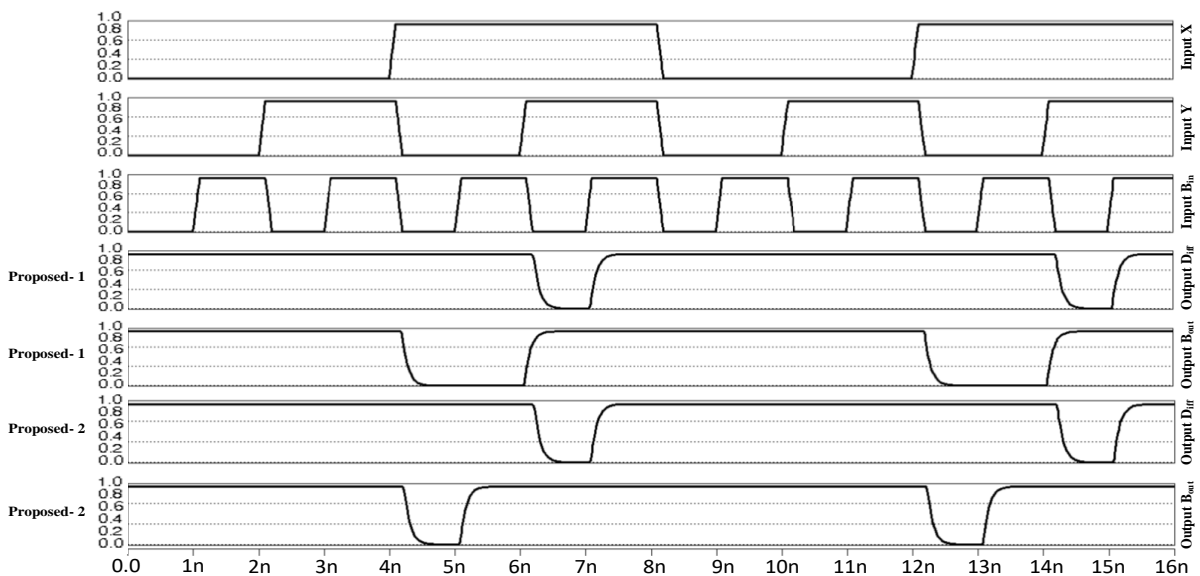
² Dynamic Threshold (DT)

³ Tap Gate (TG)

می‌شود و می‌تواند جاسازی آن را در تقسیم‌کننده‌هایی که در قسمت‌های بعدی مقاله ارائه می‌شود، چالش برانگیز کند. با این وجود مهمترین عیب این نوع مدارها به افزایش تعداد اینورترها در ورودی و خروجی آنها نسبت داده می‌شود که مهمترین عامل در افزایش مصرف برق اعم از استاتیکی و دینامیکی می‌باشد. با این حال، مدارهای پیشنهادی با مصرف مساحت مناسب از نظر تعداد ترانزیستور و استفاده از تکنیک GDI دارای ویژگی‌های قابل توجهی هستند. یکی از ویژگی‌های قابل توجه مدارهای پیشنهادی به حداقل رساندن تعداد اینورترها در ساختار آنها می‌باشد.



شکل ۲. الف) بلوک دیاگرام مدارهای پیشنهادی ۱- و پیشنهادی ۲- (ج و د) شماتیک‌های ترانزیستوری. Figure 2. (a) web) block diagram of suggested circuits-1 and suggested-2 (c and d) transistor schematics.



شکل ۳. شکل موج خروجی مدارهای پیشنهادی. Figure 3. The output waveform of the proposed circuits

جدول ۳: مقایسه مشخصات بین تفریق کننده های تقریبی

Table 3: Comparison of specifications between approximate subtractors

Name	Tran. Count	Nu. of Errors	Technique	Tran. Level	Gate Level (VHDL)	Using Inverter at In/Out	Total Number of Inverter at In/Out
AXSC1 [۶]	۸	۲	TG	YES	NO	Yes/No	۱
AXSC2 [۶]	۸	۲	TG	YES	NO	Yes/No	۲
AXSC3 [۶]	۱۲	۲	TG	YES	NO	Yes/No	۲
AXS1 [۹]	۱۴	۲	CMOS	YES	NO	Yes/Yes	۲
AXS2 [۹]	۱۴	۲	CMOS	YES	NO	Yes/Yes	۲
AXS3 [۹]	۱۲	۲	CMOS	YES	NO	Yes/Yes	۲
ICS1 [۳]	۲۸	۱	CMOS	YES	NO	Yes/Yes	۳
ICS2 [۳]	۲۸	۱	CMOS	YES	NO	Yes/Yes	۳
ICS3 [۳]	۲۸	۱	CMOS	YES	NO	Yes/Yes	۳
Apps [۱۰]	۲۲	۴	CMOS	NO	YES	Yes/Yes	۳
SAPSC1 [۱۱]	۴۴	۱	CMOS	NO	YES	Yes/Yes	۵
SAPSC2 [۱۱]	۲۶	۲	CMOS	NO	YES	Yes/Yes	۲
SAPSC3 [۱۱]	۱۴	۳	CMOS	NO	YES	Yes/Yes	۲
SAPSC4 [۱۱]	۱۸	۳	CMOS	NO	YES	Yes/Yes	۳
SAPSC5 [۱۱]	۱۴	۵	CMOS	NO	YES	Yes/Yes	۲
SAPSC6 [۱۱]	۶(No B _{in})	۴	CMOS	NO	YES	No/Yes	۱
Proposed-1	۱۰	۴	GDI	Yes	No	Yes/No	۲
Proposed-2	۱۲	۴	GDI	Yes	No	Yes/No	۲

۳- نتایج شبیه سازی

در این مقاله از مدل فشرده سازگار با SPICE ۳۲ نانومتری استفاده شده است [۱۵]. همچنین از ابزار Synopsys HSPICE-H- 64-BIT 2013.03-SP2 با CNFETs Verilog-A Model v. 2.1.1 دانشگاه استنفورد برای شبیه سازی استفاده شده است. پارامترهای شبیه سازی فناوری مطابق با [۱۵] می باشد. برای شرایط ثابت شبیه سازی، بردار کایرالیته و تیوب به ترتیب به صورت (۳۸، ۰) و ۱۰ برای هر ترانزیستور تنظیم می شوند. در این حالت، $DCNT=2.97$ نانومتر و V_{th} برابر 0.144 ولت می باشد. برای ارائه یک مقایسه منصفانه بین تمام مدارهای پیشنهادی و مرجع، پارامترهای شبیه سازی مطابق [۱۵] در نظر گرفته می شوند. میانگین مصرف برق از 0.1 نانوانیه تا دو دوره تحت فرکانس کاری 500 مگاهرتز برای هر دو شبیه سازی مونت کارلو و قابلیت بارگزاری محاسبه می شود. همچنین تمامی مسیرهای موجود از ورودی تا خروجی در نظر گرفته شده و بدترین نتایج مسیر تاخیر گزارش می شود. هنگامی که سیگنال های ورودی و خروجی به نصف V_{DD} نزدیک می شوند، تاخیر محاسبه می شود. همچنین PDP از رابطه ۶ و PDAP از رابطه ۷ معیارهای مهمی برای بررسی مدارهای تقریبی هستند.

$$PDP(fJ) = \text{Average Power (uw)} \times \text{Worst case Delay (ns)} \quad (6)$$

$$PDAP = PDP \times \text{Number of Transistor} \quad (7)$$

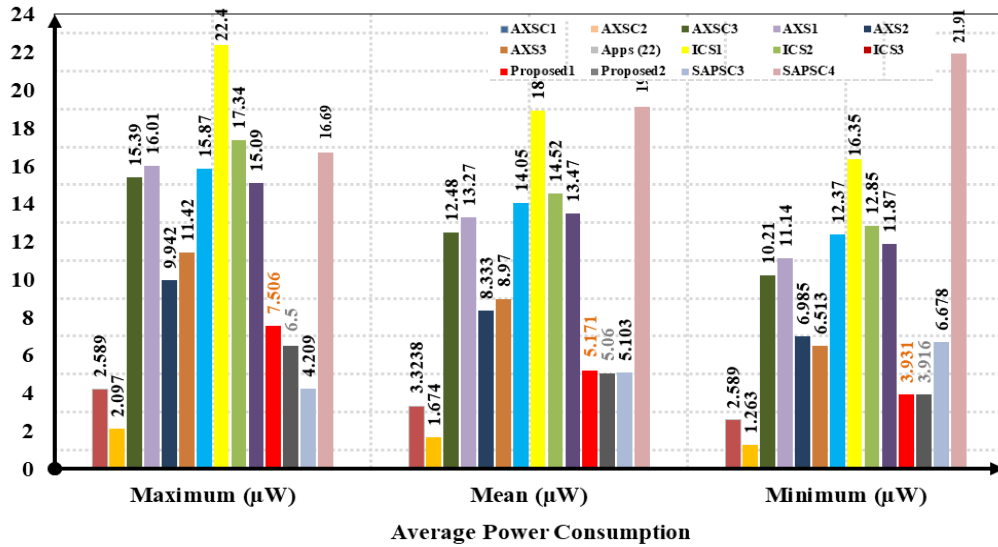
با استفاده از MCM^۴ با ۱۰۰ اجرا، که پارامترهای بسیار مهمی در ساختار فیزیکی CNFETها هستند، از آنها برای بررسی پایداری مدارها در برابر خرابی های احتمالی ساخت استفاده می شود و تغییرات تیوبها و مراحل ترانزیستورها را آشکار می کند [۱۵]. در این راستا تعداد تیوبها با تغییرات برابر $10 \pm$ برابر ۲۰ در نظر گرفته می شود در حالی که مراحل پیچها ۱۶ نانومتر با تغییرات $6 \pm$ نانومتر تعیین می شود. نتایج شبیه سازی بر حسب حداکثر، حداقل، میانگین و انحراف معیار می باشد.

¹ Chirality Vectors And CNT Diameters (D_{CNTS})

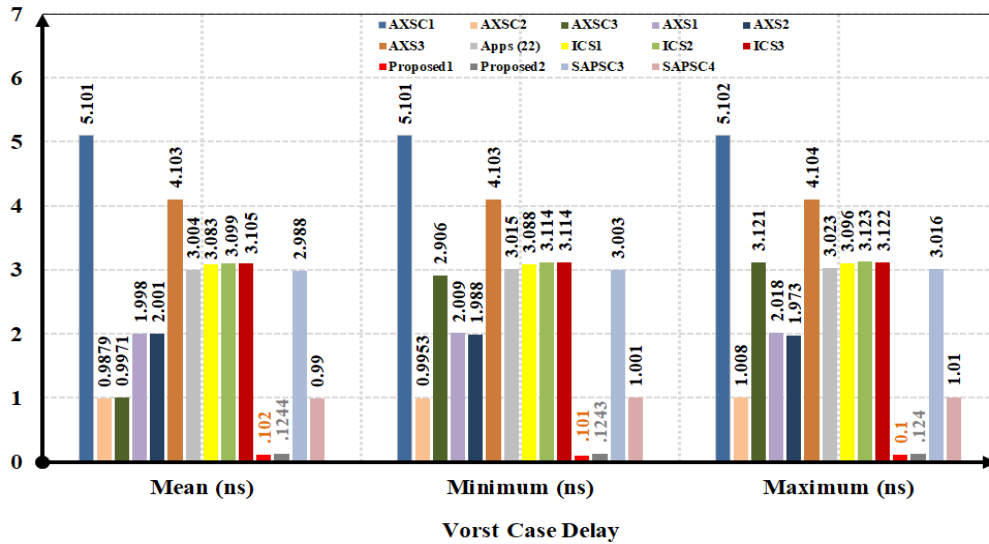
² Power-Delay-Product (PDP)

³ Power-Delay Product Area (PDAP)

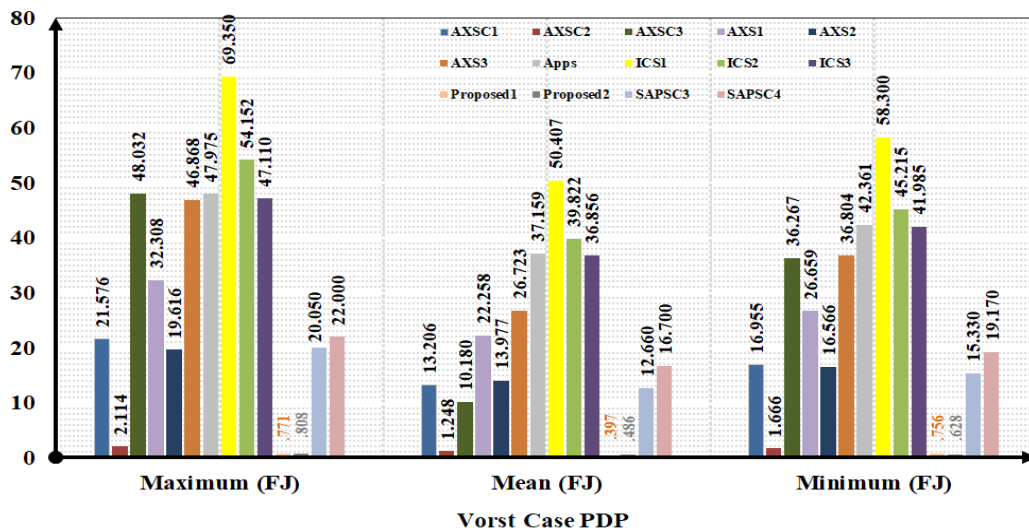
⁴ Monte Carlo method (MCM)



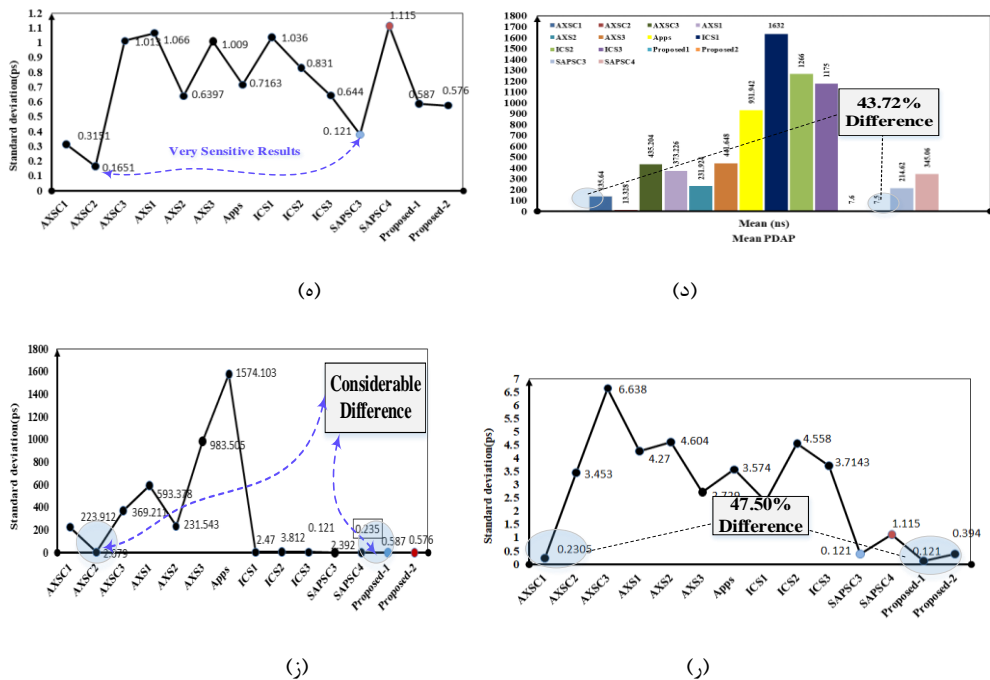
(الف)



(ب)



(ج)



نتایج

شکل ۴.

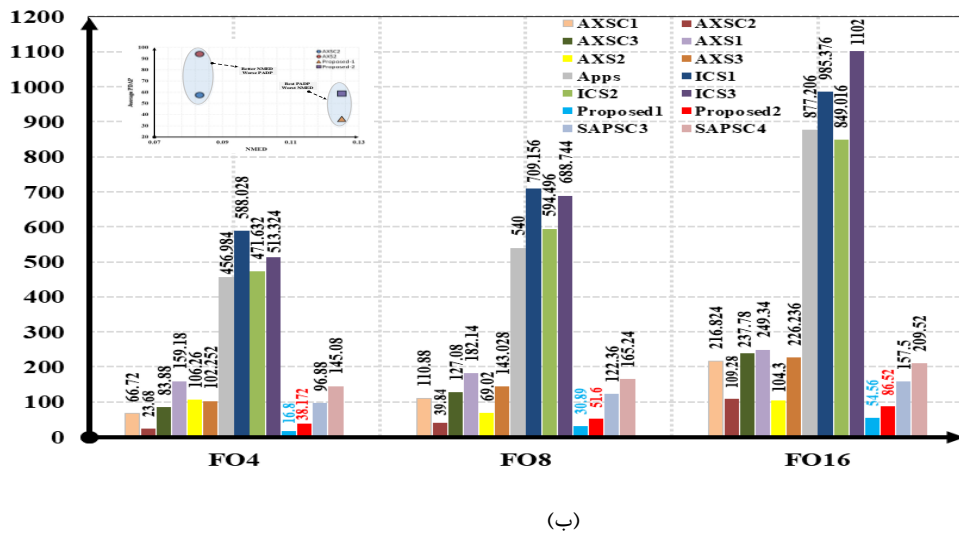
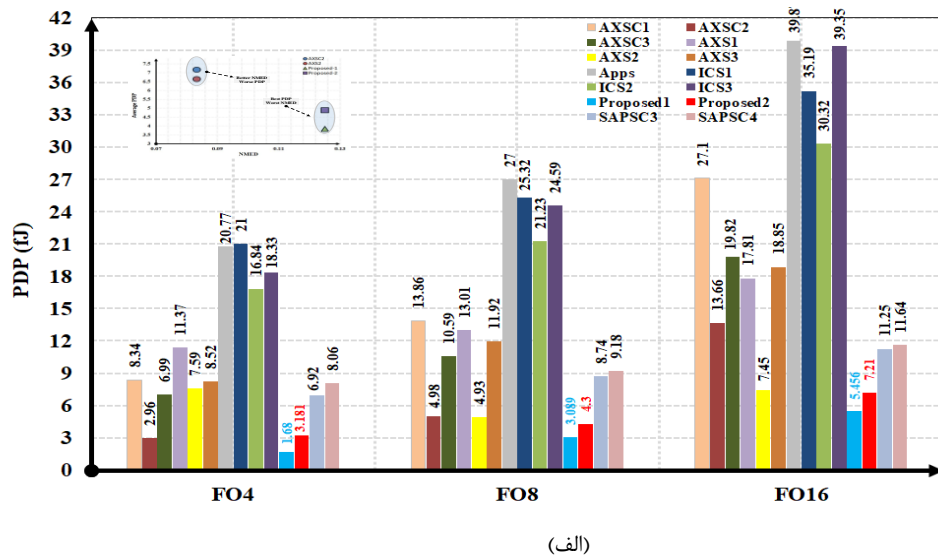
مونت کارلو برای تفریق کننده های تقریبی در مقابل حداکثر، حداقل و میانگین برای الف) توان متوسط، ب) تأخیر در بدترین حالت، ج) بدترین PDP، د) میانگین PDAP، و د ه ر ز) انحراف معیار توان، تأخیر و PDP.

Figure 4. Monte Carlo results for approximate subtractors versus maximum, minimum, and average for a) average power, b) worst-case delay, c) worst-case PDP, d) average PDAP, and (e) Standard deviation of power, delay and PDP.

باتوجه به اینکه نتایج شبیه سازی در شکل ۴ نشان داده شده است، مشاهده می شود که AXSC2 به دلیل ساختار ساده، نتایج بهتری نسبت به طرح های پیشنهادی دارد. مطابق شکل ۴ (ب) مربوط به بدترین حالت تأخیر، مدار پیشنهادی ۱ و مدار پیشنهادی ۲ کمترین میزان تأخیر را دارند. مدار پیشنهادی ۱ با مقادیر توان ۰/۱۰۲، ۰/۱۰۱ و ۰/۱ میکرووات به عنوان حداکثر، حداقل متوسط، و مدار پیشنهادی ۲ با مقادیر توان ۰/۱۲۴۴ میکرووات، ۰/۱۲۴۳ میکرووات و ۰/۱۲۴ میکرووات به عنوان حداکثر، حداقل و میانگین تفاوت معنی داری با AXSC2 دارند. ، به ترتیب. در مقابل، AXS1-AXS3 به دلیل استفاده از ترانزیستورهای متعدد، مصرف انرژی بالایی را نشان می دهد که منجر به تعداد زیادی گره داخلی در سلول های DGC می شود. با توجه به نتایج شبیه سازی مدار AXSC1 به دلیل ساختار خود بیشترین میزان تأخیر را دارد. زیرا دو گیت که خروجی ها را تولید می کنند به سیگنال های ضروری تولید شده توسط گیت XOR اعمال می شوند.

مطابق شکل ۴ (ج و د)، طرح های پیشنهادی از نظر PDP و PDAP در مقایسه با بقیه مدارها، به خصوص AXSC2 که نزدیک ترین رقیب آنها است، تفاوت های قابل توجهی دارند. تفاوت در مقدار PDAP مدار پیشنهادی ۱ در مقایسه با AXSC2 حدود ۴۳/۷۲ درصد است، حتی اگر دو ترانزیستور بیشتر از AXSC2 دارد. نتایج به دست آمده از نظر انحراف معیار توان، تأخیر و PDP کارایی طرح های پیشنهادی را تایید می کند. با توجه به اینکه تفریق کننده های تقریبی سلول های اصلی مدار تقسیم کننده را تشکیل می دهند، بهتر است این مدارها را در تقسیم کننده ها بررسی کنیم. در اینجا، خروجی های مختلف FO با اعمال بافرها به ورودی ها (۱ بافر) و اینورترها به خروجی سلول ها (۴، ۸ یا ۱۶) به صورت موازی بر اساس FO4، FO8، FO16 در نظر گرفته می شوند [۲۸]. پارامترهای مهم PDP و PDAP در شکل ۵-الف و ۵-ب نشان داده شده است.

¹ Fan Out (FO)



شکل ۵. نتایج Fan-out در مقابل سلول‌های تقریبی مختلف برای (الف و ب) PDP, PDAP
 Figure 5. Fan-out results against different approximate cells for (a and b) PDAP, PDP

از نتایج به دست آمده می‌توان دریافت که طرح‌های پیشنهادی برای سازه‌های پیچیده‌تر مانند جداکننده‌ها مناسب هستند. همانطور که در شکل ۵-الف نشان داده شده است، مقدار PDP مدار پیشنهادی اول $1/68$ است که عملکرد بهتر این مدار را در مقایسه با مدارهای دیگر نشان می‌دهد. AXSC2 که از نظر نتایج شبیه‌سازی نزدیک‌ترین نتایج را به طرح‌های پیشنهادی دارد، مصرف انرژی بالاتری در حدود $43/24$ درصد نسبت به مدار پیشنهادی ۱ دارد. برای PDAP نیز شرایط یکسانی در طول FO به دست آمده است زیرا طرح‌های مذکور دارای مساحت یکسانی هستند. نتایج PDP و PDAP برحسب NMED نشان داده شده در شکل ۵ برای بررسی بهتر مدارها در نظر گرفته شده است. NMED با توجه به نتایج ارائه شده در جدول ۲ و جدول ۳ بر اساس NMED در مقابل PDP در نظر گرفته می‌شود. همانطور که مشاهده می‌شود، NMED در مقابل PDP مدار پیشنهادی ۱ و مدار پیشنهادی ۲ پایین‌ترین مقادیر PDP و NMED هستند که برای کاربردهای با حساسیت بالا مناسب هستند. هم‌چنین مدارهای پیشنهادی دارای بالاترین NMED و بهترین PDAP هستند. یکی از دلایلی که طرح‌های پیشنهادی با مدارهای AXS2 و AXSC2 مقایسه شده‌اند این است که این مدارها نتایجی نزدیک به مدارهای پیشنهادی دارند همانطور که در شکل ۵ (الف) و (ب) نشان داده شده است. با این حال، بقیه مراجع تفاوت‌های قابل توجهی در مقایسه با سلول‌های پیشنهادی دارند. مقایسه جامع طرح‌ها و مراجع پیشنهادی در جدول ۵ آورده شده است.

جدول ۴. مقادیر توان، تاخیر، PDP و PDAP مدارهای مرجع پیشنهادی.

Name	Power	Delay	PDP	Tran. Count	PDAP
AXSC1 [۶]	۷۰/۳۷۱	۰/۶۲۳۲	۳۶/۴۳۸	۸	۲۹۱/۵
AXSC2 [۶]	۶۶/۷۸۷	۰/۳۱۶۲	۲۱/۱۱۸	۸	۱۶۸/۹
AXSC3 [۶]	۶۹/۴۱۲	۰/۳۱۵۴	۲۱/۸۹۲	۱۲	۲۶۲/۷
AXS1 [۹]	۱۱۵/۳۱	۰/۴۲۷۱	۴۹/۲۴۸	۱۴	۲۸۹/۴
AXS2 [۹]	۹۷/۹۱۲	۰/۵۱۴۷	۵۰/۳۹۵	۱۲	۶۰۴/۷
AXS [۹]	۶۲/۲۹۶	۰/۳۷۰۵	۲۳/۰۸۰	۲۸	۶۴۶/۲
ICS1 [۳]	۱۳۰/۲۱	۰/۳۵۸	۴۶/۶۱	۲۸	۱۳۰۴/۸
ICS2 [۳]	۶۸/۳۵۱	۰/۲۸۲	۱۹/۱۳	۲۸	۵۵۵/۶
ICS3 [۳]	۶۷/۶۹۲	۰/۲۵۲	۱۶/۹۲۳	۲۸	۴۷۲/۸
Apps [۱۰]	۹۳/۲۶	۰/۳۰۷۵	۲۸/۶۷۷	۲۲	۶۳۰/۷
SAPSC3 [۱۱]	۷۱/۰۵	۰/۳۳۵	۲۳/۸۰	۱۴	۳۳۳/۲
SAPSC4 [۱۱]	۷۵/۶۹	۰/۴۵	۳۴/۰۶	۱۸	۶۱۳
Proposed-1	۸۷/۶۵	۰/۱۲۲	۱۰/۵۱	۱۰	۱۰۵/۱
Proposed-2	۹۱/۰۲	۰/۱۴	۱۲/۷۴	۱۲	۱۵۲/۸

۴- نتیجه گیری

در این مقاله دو تفریق کننده تقریبی جدید ارائه و تحلیل شده است. طرح‌های پیشنهادی مبتنی بر تکنیک ورودی انتشار گیت (GDI) همراه با تکنیک آستانه دینامیکی (DT) با استفاده از فناوری ترانزیستورهای اثر میدانی نانولوله‌های کربنی (CNTFETs) ۳۲ نانومتر است. این تفریق کننده‌ها سلول‌های تقسیم کننده اصلی را تشکیل می‌دهند که در پردازش تصویر استفاده می‌شوند. طرح‌های پیشنهادی دارای ۴ خطا با پیچیدگی بسیار کم هستند. شبیه‌سازی تغییرات شامل تغییرات مونت کارلو و fanout انجام شده و نتایج صحت روابط ریاضی توان و تاخیر و PDP را تایید می‌کند. از نظر صرفه‌جویی در تولید متوسط توان تاخیر (PDP)، مدار پیشنهادی ۱ و مدار پیشنهادی ۲ عملکرد بهتری دارند. مطالعات مختلف با طرح‌های ارائه شده مقایسه شده و اثربخشی طرح‌های پیشنهادی در شرایط مختلف بدون کاهش ولتاژ خروجی تایید می‌شود که به دلیل استفاده از (DT) در اجرای آنها می‌باشد.

مراجع

- [1] W. Liu, F. Lombardi and M. Shulte, "A Retrospective and Prospective View of Approximate Computing [Point of View]," in *Proceedings of the IEEE*, vol. 108, no. 3, pp. 394-399, March 2020, doi: 10.1109/JPROC.2020.2975695.
- [2] H. Jiang, F. J. H. Santiago, H. Mo, L. Liu and J. Han, "Approximate Arithmetic Circuits: A Survey, Characterization, and Recent Applications," in *Proceedings of the IEEE*, vol. 108, no. 12, pp. 2108-2135, Dec. 2020, doi: 10.1109/JPROC.2020.3006451.
- [3] A. Sadeghi, R. Ghasemi, H. Ghasemian and N. Shiri, "High Efficient GDI-CNTFET-Based Approximate Full Adder for Next-Generation of Computer Architectures," in *IEEE Embedded Systems Letters*, vol. 15, no. 1, pp. 33-36, March 2023, doi: 10.1109/LES.2022.3192530.
- [4] M. Rafiee, Y. Sadeghi, N. Shiri and A. Sadeghi "An approximate CNTFET4:2 compressor based on gate diffusion input and dynamic threshold," *Electron. Lett.*, vol. 57, pp. 650-652, 2021, . doi: 10.1049/ell2.12221.
- [5] A. Gorantla and P. Deepa, "Design of Approximate Subtractors and Dividers for Error Tolerant Image Processing Applications," *J Electron Test*, vol. 35, pp. 901-907, 2019, doi: 10.1007/s10836-019-05837-5.
- [6] L. Chen, J. Han, W. Liu and F. Lombardi, "On the Design of Approximate Restoring Dividers for Error-Tolerant Applications," in *IEEE Transactions on Computers*, vol. 65, no. 8, pp. 2522-2533, Aug. 2016, doi: 10.1109/TC.2015.2494005.

- [7] F. Sabetzadeh, M. H. Moaiyeri and M. Ahmadinejad, "A Majority-Based Imprecise Multiplier for Ultra-Efficient Approximate Image Multiplication," in *IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers*, vol. 66, no. 11, pp. 4200-4208, 2019, doi: 10.1109/TCSI.2019.2918241.
- [8] H. Jiang, L. Liu, F. Lombardi and J. Han, "Adaptive approximation in arithmetic circuits: A low-power unsigned divider design," in *Design, Automation Test in Europe Conference Exhibition (DATE)*, March 2018, pp. 1411-1416, doi: 10.23919/DATE.2018.8342233.
- [9] F. Bahrami, N. Shiri and F. Pesaran, "An efficient Imprecise 4:2 Compressor Using Gate Diffusion Input Supplemented with Dynamic Threshold," *Journal of Southern Communication Engineering*, vol. 13, no. 50, pp. 1-10, 2023, doi: 10.30495/jce.2023.1987535.1203 [in Persian].
- [10] T. Rashedzadeh, S.M. Riyazi and N. Cheraghi Shirazi, "Analysis of the effect of changes of FINs Architectural on FINEFET Drain current and on Average Power Dissipation and Propagation Delay in the Hybrid-CMOS full adder," *Journal of Southern Communication Engineering*, vol. 10, no. 40, pp. 25-36, Jun. 2021 [in Persian].
- [11] M. Sayyaf, A. Ghasemi and R.Hamzehyan, "Design of Low Power Single-Bit Full-Adder Cell Based on Pass-Transistor Logic," *Journal of Southern Communication Engineering*, vol. 13, no. 49, pp. 105-112, 2022, doi: 10.30495/jce.2022.692834 [in Persian].
- [12] K. M. Reddy, M. H. Vasantha, Y. B. Nithin Kumar and D. Dwivedi, "Design of Approximate Dividers for Error Tolerant Applications," *IEEE International Midwest Symposium on Circuits and Systems (MWSCAS)*, 2018, pp. 496-499, doi: 10.1109/MWSCAS..8623909.
- [13] R. Ferreira, M. Leme, M. Corrêa, L. Agostini, C. Diniz and B. Zatt, "Approximate Subtractor Operator for Low-Power Video Coding Hardware Accelerators," *IEEE International Conference on Electronics, Circuits and Systems (ICECS)*, 2019, pp. 426-429, doi: 10.1109/ICECS46596.2019.8964783.
- [14] K. V. Krishnan, A. Satish and P. R. Krishnan, "Design of energy efficient approximate subtractors and restoring dividers for error tolerant applications," *Microelectronics Journal*, vol. 131, p. 105668, 2023, doi: 10.1016/j.mejo.2022.105668.
- [15] N. Shiri, A. Sadeghi, M. Rafiee and M. Bigonah, "SR-GDI CNTFET-based magnitude comparator for new generation of programmable integrated circuits," *International Journal of Circuit Theory and Application*, 2022, pp. 1- 26, doi: 10.1002/cta.3251.
- [16] M. Rafiee, N. Shiri and A. Sadeghi, "Low-Power and Fast-Swing-Restoration GDI-Based Magnitude Comparator for Digital Images Processing," *Circuits Syst Signal Process*, vol. 41, pp. 4848-4885, 2022, doi: 10.1007/s00034-022-01997-6.
- [17] M. Mirzaei and S. Mohammadi, "Process variation-aware approximate full adders for imprecision-tolerant applications," *Computers & Electrical Engineering*, vol. 87, 2020, p. 106761, doi: 10.1016/j.compeleceng.2020.106761.
- [18] A. Morgenshtein, A. Fish and I. A. Wagner, "Gate-diffusion input (GDI): a power-efficient method for digital combinatorial circuits," *IEEE Transactions on Very Large Scale Integration (VLSI) Systems*, vol. 10, no. 5, pp. 566- 581, 2002, doi: 10.1109/TVLSI.2002.801578.
- [19] A. Sadeghi, N. Shiri and M. Rafiee, "High-Efficient, Ultralow-Power and High-Speed 4:2 Compressor with a New Full Adder Cell for Bioelectronics Applications," *Circuits Syst Signal Process*, vol. 39, pp. 6247-6275, 2020, doi: 10.1007/s00034-020-01459-x.
- [20] M. Rafiee, F. Pesaran, A. Sadeghi and N. Shiri, "An efficient multiplier by pass transistor logic partial product and a modified hybrid full adder for image processing applications," *Microelectronics Journal*, vol. 118, 2021, p. 105287, doi: 10.1016/j.mejo.2021.105287.
- [21] G. Hills, C. Lau and A. Wright, "Modern microprocessor built from complementary carbon nanotube transistors," *Nature*, vol. 572, pp. 595-602, 2019, doi: 10.1038/s41586-019-1493-8.

- [22] H. Jiang, C. Liu, L. Liu, F. Lombardi and J. Han, "A review, classification, and comparative evaluation of approximate arithmetic circuits," *ACM J Emerg Technol Comput Syst. (JETC)*, vol. 13, no. 4, p. 60, 2017, doi:10.1145/3094124.
- [23] A. Darabi, M.R. Salehi and E. Abiri, "One-sided 10T static-random access memory cell for energy efficient and noise-immune internet of things applications," *International Journal of Circuit Theory and Applications*, 2022, doi: 10.1002/CTA.3408.
- [24] A. T. Mahani and P. Keshavarzian, "A novel energy-efficient and high speed full adder using CNTFET," *Microelectronics Journal*, vol. 61, pp. 79-88, 2017, doi: 10.1016/j.mejo.2017.01.009.
- [25] E. Adams, S. Venkatachalam and S. -B. Ko, "Approximate Restoring Dividers Using Inexact Cells and Estimation From Partial Remainders," in *IEEE Transactions on Computers*, vol. 69, no. 4, pp. 468-474, April 2020, doi: 10.1109/TC.2019.2953751.
- [26] F. Pooladi, F. Pesaran and N. Shiri. "Efficient GDI- based approximate subtractors for change detection in bio-image processing applications." *Microelectronics Journal* , vol. 135 , p. 105757, May 2023, doi: 10.1016/j.mejo.2023.105757.
- [27] F. Bahrami, N. Shiri and F. Pesaran, "A New Approximate Sum of Absolute Differences Unit for Bioimages Processing," *IEEE Embedded Systems Letters*. 2023, **doi:** 10.1109/LES.2023.3245020.
- [28] F. Bahrami, N. Shiri and F. Pesaran, "Imprecise Subtractor Using a New Efficient Approximate-Based Gate Diffusion Input Full Adder for Bioimages Processing," *Computers and Electrical Engineering*, vol. 108, p. 108729, 2023, doi: 10.1016/j.compeleceng.2023.108729.

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. 14/ No. 53/Autumn 2024

Research Article

A Distributed Denial-of-Service (DDoS) Attack Detection Approach in Fog Layer Based on Distributed Blockchain Database and Machine Learning

Mohsen Eghbali, PhD Student ¹  | Mohammad Reza Mollhoseini Ardakani, Assistant Professor^{2*} 

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

²Department of Computer Engineering, Maybod Branch, Islamic Azad University, Maybod, Iran, mr.mollahoseini@iau.ac.ir

Correspondence

Mohammadreza Mollahoseini Ardakani, Associate Professor, Department of Computer Engineering, Maybod Branch, Islamic Azad University, Maybod, Iran, mr.mollahoseini@iau.ac.ir

Received: 24 July 2023

Revised: 27 August 2023

Accepted: 13 September 2023

Abstract

DDoS attacks make network services unavailable to users by sending fake traffic by botnets. One of the methods to deal with DDoS attacks is to use machine learning, but these methods face challenges such as high volume of IoT traffic and data imbalance. This paper introduces a distributed intrusion detection system in the fog layer that detects network attack traffic in a decentralized manner. In this method, each fog node acts as an intrusion detection system, and by exchanging blacklists through the blockchain, they increase the secrecy of detecting attacks. Fog nodes identify the main features of network traffic using the Coati optimization algorithm and use these features to train a multilayer neural network in intrusion detection. The selection of features reduces traffic and increases the accuracy and speed of attack detection. Based on game theory, the GAN method is used to balance network traffic. Tests performed in the MATLAB and on the NSL-KDD show that the proposed system has accuracy, sensitivity, and precision of 98.67%, 98.52%, and 98.34%, respectively. This method is more accurate in identifying network attacks than feature selection methods such as WOA, GWO, and HHO and more accurate than LSTM and CNN.

Keywords: The intrusion detection system, Fog layer, Machine learning, GAN neural network, Feature selection, Coati Optimization Algorithm (COA).

Highlights

- Network traffic balancing in fog layer with game theory based on GAN network.
- Presenting a binary version of the Kuati optimization algorithm presented in 2023 for feature selection.
- Maintaining the confidentiality of the proposed intrusion detection system with blockchain and exchanging the blacklist with blockchain between fog nodes.
- Providing a distributed intrusion detection system in the fog layer to detect attacks on IoT.

Citation: M. Eghbali, and M.R. Mollhoseini Ardakani "A Distributed Denial-of-Service (DDoS) Attack Detection Approach in Fog Layer Based on Distributed Blockchain Database and Machine Learning," *Journal of Southern Communication Engineering*, vol. 14, no. 53, pp. 67–90, 2024, doi:10.30495/jce.2023.1992146.1215, [in Persian].

مقاله پژوهشی

یک رویکرد تشخیص حملات توزیع شده در لایه مه و بر اساس پایگاه داده توزیع شده بلاک چین و یادگیری ماشین

محسن اقبالی^۱ | محمد رضا ملاحسینی اردکانی^۲ * ID

چکیده:

حملات DDoS با ارسال حجم زیادی از ترافیک کاذب توسط بات‌نت‌ها، سرویس‌های شبکه را از دسترس کاربران خارج می‌کنند. یکی از روش‌های مقابله با حملات DDoS، استفاده از یادگیری ماشین است، اما این روش‌ها با چالش‌هایی مانند حجم بالای ترافیک IoT و عدم توازن در داده‌ها مواجه‌اند. این مقاله سیستم تشخیص نفوذ توزیع‌شده‌ای در لایه مه معرفی می‌کند که به صورت غیرمتمرکز ترافیک حملات شبکه را شناسایی می‌کند. در این روش، هر گره مه به عنوان سیستم تشخیص نفوذ عمل کرده و با تبادل لیست سیاه‌ها از طریق بلاکچین، محرمانگی شناسایی حملات را افزایش می‌دهند. گره‌های مه ویژگی‌های اصلی ترافیک شبکه را با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی کوآتی (Coati) شناسایی کرده و از این ویژگی‌ها برای آموزش شبکه عصبی چندلایه ۱ در تشخیص نفوذ استفاده می‌کنند. انتخاب ویژگی‌ها ترافیک را کاهش داده و دقت و سرعت شناسایی حملات را افزایش می‌دهد. برای تعادل ترافیک شبکه، از روش GAN بر اساس نظریه بازی‌ها استفاده می‌شود. آزمایش‌ها در محیط نرم‌افزاری متلب و روی NSL-KDD نشان می‌دهد که سیستم پیشنهادی دارای دقت، حساسیت و صحتی به ترتیب ۹۸.۶۷٪، ۹۸.۵۲٪ و ۹۸.۳۴٪ است. این روش در شناسایی حملات شبکه دقیق‌تر از روش‌های انتخاب ویژگی مانند WOA، GWO و HHO و نیز دقیق‌تر از LSTM و CNN است.

کلید واژه‌ها: سیستم تشخیص نفوذ، لایه مه، یادگیری ماشین، شبکه عصبی GAN، انتخاب ویژگی، الگوریتم بهینه‌سازی کوآتی.

^۱ دانشجوی دکتری مهندسی کامپیوتر، گروه مهندسی کامپیوتر، واحد میبد، دانشگاه آزاد اسلامی، میبد، ایران، m.eghbali@maybodiau.ac.ir

^۲ استادیار گروه مهندسی کامپیوتر، واحد میبد، دانشگاه آزاد اسلامی، میبد، ایران، mr.mollahoseini@iau.ac.ir

نویسنده مسئول

* محمد رضا ملاحسینی اردکانی، استادیار گروه کامپیوتر، واحد میبد، دانشگاه آزاد اسلامی، میبد، ایران، mr.mollahoseini@iau.ac.ir

تاریخ دریافت: ۲ مرداد ۱۴۰۲

تاریخ بازنگری: ۵ شهریور ۱۴۰۲

تاریخ پذیرش: ۲۲ شهریور ۱۴۰۲

<https://doi.org/10.30495/jce.2023.1992146.1215>

۱-مقدمه

با توسعه سریع فناوری اینترنت اشیا^۱ زمینه‌های بیشتری مانند خانه‌های هوشمند، شهرهای هوشمند، حمل و نقل هوشمند، مدیریت لجستیک هوشمند و غیره در این صنعت بیشتر و بیشتر شده است. پیش بینی می‌شود که در سال ۲۰۳۰ تعداد دستگاه‌های IoT مورد استفاده در سراسر جهان نزدیک به ۱۲۵ میلیارد دستگاه خواهد بود [۱]. با این حال، هنوز در برخی از زمینه‌های مرتبط با اینترنت اشیا از جمله امنیت، حریم خصوصی، مدیریت هویت و غیره مسائلی وجود دارد [۲]. در میان مسائل امنیتی، حملات انکار سرویس توزیع شده^۲ یک تهدید جدی است. از آنجایی که اکثر دستگاه‌های اینترنت اشیا با منابع محدود حافظه و محاسبات محدود هستند، حفاظت امنیتی در این دستگاه‌ها وجود ندارد. مهاجمان از آسیب‌پذیری‌های موجود

^۱ Internet of Things (IoT)

^۲ Distributed Denial of Service (DDoS)

در دستگاه‌های IoT سوءاستفاده می‌کنند و آنها را به عنوان بخشی از بات‌ها^۱ برای راه‌اندازی حملات DDoS کنترل می‌کنند [۳]. به عنوان مثال، در سال ۲۰۱۶، یک حمله DDoS معروف به DynDNS، ارائه‌دهنده یک سیستم نام دامنه پویا، بسیاری از سرویس‌های وب از جمله Github و Twitter را مجبور به توقف کرد. علاوه بر این، نه تنها قربانیان قادر به ارائه خدمات نبودند، بلکه صاحبان دستگاه‌های اینترنت اشیا نیز پول زیادی را برای پهنای باند و توان مصرفی خرج کردند [۴]. هدف حملات DDoS مصرف پهنای باند یا منابع و جلوگیری از دسترسی کاربران قانونی به خدمات است [۵]. محققان مختلف درباره حملات DDoS در سه لایه معماری اینترنت اشیا بحث کردند. برای لایه ادراک، حملات پارازیت^۲، کشتن دستورات و حملات همگام‌سازی^۳ برای جلوگیری از خواندن داده‌ها از RFID وجود دارد [۶]. در لایه شبکه، حملات لایه با هدف از بین بردن منابع قربانی با روش‌های مختلف، مانند حملات سیل، حملات سیل مبتنی بر بازتاب، حملات سیلابی بهره برداری از پروتکل و حملات سیل مبتنی بر تقویت انجام می‌شود [۷]. حملات DDoS در سطح برنامه پیچیده‌تر از حملات لایه شبکه و ادراک در نظر گرفته می‌شوند و شناسایی آنها توسط فیلترها دشوارتر است. برنامه‌های کاربردی با پتانسیل حمله شامل DNS، پروتکل انتقال ابرمتن (HTTP)، پروتکل صدا از طریق اینترنت (VoIP) و غیره می‌باشند [۸].

برای شناسایی و کاهش حملات DDoS در اینترنت اشیا، راه حل‌های مختلفی پیشنهاد شده است. یکی از روش‌های تشخیص حملات DDoS بکارگیری سیستم‌های تشخیص نفوذ^۴ به شبکه است. سیستم‌های تشخیص نفوذ با تجزیه و تحلیل ترافیک شبکه ترافیک حمله را از ترافیک عادی طبقه‌بندی و تفکیک می‌کنند و هشدار لازم را برای دیوار آتش ارسال می‌کنند تا ترافیک شبکه کنترل کنند. سیستم‌های تشخیص نفوذ بر پایه یادگیری ماشین و یادگیری بر خلاف روش‌های لیست سیاه و اکتشافی توانایی تشخیص حملات جدید را دارند و می‌توانند حملات روز صفر^۵ با حملات جدید را تشخیص دهند [۹]. از جمله سیستم‌های تشخیص نفوذ بر پایه یادگیری ماشین و یادگیری عمیق می‌توان به روش‌های مانند درخت تصمیم‌گیری [۱۰]، شبکه عصبی بازگشتی [۱۱]، ماشین بردار پشتیبان [۱۲] و شبکه عصبی کانولوشن [۱۳] اشاره نمود. سیستم تشخیص نفوذ برای اینترنت اشیا باید توانایی تجزیه و تحلیل حجم زیادی از ترافیک شبکه را داشته باشد و از طرفی به صورت توزیع شده پیاده‌سازی می‌شود تا بتواند حجم بالایی از ترافیک شبکه را مورد تجزیه و تحلیل قرار دهد و در زمان واقعی حملات را تشخیص دهد. برای بهبود عملکرد سیستم‌های تشخیص نفوذ به شبکه از روش‌های انتخاب ویژگی در کنار روش‌های یادگیری ماشین استفاده می‌شود تا ویژگی‌های مهم برای یادگیری ماشین و تشخیص نفوذ کشف شود [۱۴].

مجموعه داده‌های مورد استفاده برای آموزش مدل‌های یادگیری ماشین می‌توانند دارای تعداد زیادی ویژگی باشند. اگرچه برخی از این ویژگی‌ها تأثیر زیادی بر نتیجه طبقه‌بندی دارند، برخی از ویژگی‌ها ممکن است تأثیر کمی یا بدون تأثیر بر نتیجه طبقه‌بندی داشته باشند. استفاده از ویژگی‌هایی که تأثیر کمی بر طبقه‌بندی دارند می‌تواند زمان و هزینه‌های فرآیند را افزایش دهد. هدف کاهش ویژگی‌هایی است که تأثیر کمی در طبقه‌بندی دارند و استفاده از ویژگی‌های بسیار مؤثر را فراهم می‌کند. روش‌های فیلتر^۶ [۱۵]، تعبیه شده^۷ [۱۶] و بسته بندی^۸ [۱۷] به عنوان روش‌های انتخاب ویژگی استفاده شده است. روش فیلتر عمدتاً بر ویژگی‌های ذاتی ویژگی‌ها تمرکز دارد، در حالی که روش بسته‌بندی بر سودمندی ویژگی‌ها بر اساس عملکرد طبقه‌بندی کننده تمرکز دارد. روش تعبیه شده سعی می‌کند از ویژگی‌های هر دو روش فیلتر و پوشش برای بهینه‌سازی عملکرد یک الگوریتم یا مدل یادگیری استفاده کند [۱۸]. در بیشتر سیستم‌های تشخیص نفوذ از الگوریتم‌های انتخاب ویژگی بر پایه الگوریتم‌های فراابتکاری نظیر الگوریتم بهینه‌سازی وال [۱۹]، الگوریتم بهینه‌سازی گرگ خاکستری [۲۰] و الگوریتم بهینه‌سازی شاهین هریس [۲۱] استفاده می‌شود تا ترافیک شبکه دچار کاهش ابعاد شود و سیستم تشخیص نفوذ با سرعت و دقت بیشتری حملات را تشخیص دهد.

¹ Botnet

² Jamming

³ De-synchronising attacks

⁴ Intrusion detection systems

⁵ Zero day attacks

⁶ Filter mode

⁷ Embedded method

⁸ Wrapper method

در روش پیشنهادی برای تشخیص حملات به شبکه از یک سیستم تشخیص نفوذ توزیع شده در لایه مه اینترنت اشیاء استفاده می‌شود. در روش پیشنهادی از معماری توزیع شده گره‌های مه برای آرایه یک سیستم تشخیص نفوذ استفاده می‌شود. در روش پیشنهادی برای حل مشکل عدم تعادل در کلاس‌های اکثریت و اقلیت ترافیک و مجموعه داده شبکه از روش متعادل‌سازی شبکه عصبی متخاصم^۱ [۲۲] بر پایه تئوری بازی و یادگیری عمیق استفاده می‌شود. متعادل‌سازی مجموعه داده دقت مدل‌ها را برای تشخیص دقیق حملات افزایش می‌دهد. در مرحله دوم ترافیک شبکه در لایه مه با انتخاب ویژگی دچار کاهش ابعاد می‌شود. برای کاهش ابعاد ترافیک شبکه در لایه مه از الگوریتم بهینه‌سازی کوآتی^۲ [۲۳] که سال ۲۰۲۳ آرایه شده است استفاده می‌شود. در مرحله دوم ویژگی‌های مهم و انتخاب شده به عنوان شبکه عصبی چند لایه انتخاب شده تا ترافیک شبکه به دسته عادی و حمله طبقه‌بندی شود. روش پیشنهادی هر گره مه یک لیست سیاه از آدرس گره‌های حمله کننده دارد و این لیست را با بلاک‌چین^۳ [۲۴] با سایر گره‌های مه به اشتراک می‌گذارد. نقش بلاک چین، عدم دستکاری لیست‌های سیاه مبادله شده در لایه مه است تا امنیت تبادل پیام‌ها در لایه مه افزایش داده شود. هدف از روش پیشنهادی آرایه یک سیستم تشخیص نفوذ توزیع شده در لایه مه است که حجم زیاد ترافیک شبکه را با تقسیم کاری مورد تحلیل قرار داده و حملات DDoS را شناسایی نماید. هدف دیگر آرایه یک سیستم تشخیص نفوذ با تلفیق هوش گروهی و یادگیری ماشین است تا ترافیک شبکه را با دقت بیشتری تحلیل نماید. هدف دیگر روش پیشنهادی افزایش محرمانگی پیام‌های مبادله شده بین سیستم‌های تشخیص نفوذ با بلاک چین است. سهم نویسندگان در این مقاله شامل موارد ذیل است:

- متعادل‌سازی ترافیک شبکه در لایه مه با تئوری بازی مبتنی بر شبکه GAN
- آرایه یک نسخه باینری از الگوریتم بهینه‌سازی کوآتی که در سال ۲۰۲۳ آرایه شده برای انتخاب ویژگی
- حفظ محرمانگی سیستم تشخیص نفوذ پیشنهادی با بلاک چین و مبادله لیست سیاه با بلاک چین بین گره‌های مه
- آرایه یک سیستم تشخیص نفوذ توزیع شده در لایه مه برای تشخیص حملات به IoT

مزیت روش پیشنهادی نسبت به سایر سیستم‌های تشخیص نفوذ آن است که در لایه مه پیاده‌سازی می‌شود و دارای یک معماری توزیع شده است. معماری توزیع شده بر خلاف معماری متمرکز باعث می‌شود تا به جای یک سیستم تشخیص نفوذ همزمان چند سیستم تشخیص نفوذ وجود داشته باشد و حجم بالایی از ترافیک شبکه مورد تحلیل قرار گرفته شود. یک مزیت دیگر روش پیشنهادی آن است که دلیل معماری غیرمتمرکز آن اگر یک سیستم تشخیص نفوذ در لایه مه مورد حمله DDoS قرار گرفته شود آنگاه سایر گره‌های مه یا سایر سیستم‌های تشخیص نفوذ می‌توانند حملات را تشخیص دهند. مزیت مهم دیگر سیستم تشخیص نفوذ پیشنهادی آن است ترافیک آموزشی را با روش‌های جدید مانند تئوری بازی متعادل‌سازی می‌کند و این موضوع باعث افزایش دقت مدل پیشنهادی می‌شود. یک مزیت دیگر روش پیشنهادی آن است که ویژگی‌های مهم ترافیک شبکه را با هوش گروهی مبتنی بر رفتار کوآتی‌ها که در سال ۲۰۲۳ آرایه شده است، انتخاب نموده و ترافیک شبکه را بر اساس این ویژگی‌های مهم کاهش ابعاد می‌دهد. کاهش دادن ابعاد ترافیک در لایه مه باعث می‌شود تا سرعت یادگیری افزایش داده شود و سیستم تشخیص نفوذ با سرعت بیشتر حملات را تشخیص دهد. یک مزیت مهم روش پیشنهادی آن است که جلوی حملات در لایه مه گرفته می‌شود تا حملات به لایه ابر وارد نشوند. روش پیشنهادی دارای محدودیت‌هایی است از جمله آفلاین بودن ترافیک شبکه. یک چالش دیگر روش‌های انتخاب ویژگی با هوش گروهی و الگوریتم‌های فراابتکاری، عدم قطعیت بالای آنها در یافتن جواب بهینه در هر آزمایش است. این مقاله در پنج بخش تهیه و تدوین شده است. در بخش دو، ادبیات موضوعی و کارهای مرتبط در زمینه تشخیص حملات به شبکه آرایه شده است. در بخش سه، سیستم تشخیص نفوذ پیشنهادی بر پایه تئوری بازی و شبکه عصبی GAN و الگوریتم بهینه‌سازی کوآتی و بلاک چین آرایه می‌شود. در بخش چهار، روش پیشنهادی پیاده‌سازی و تحلیل می‌شود و در ادامه در بخش ۵ نتایج تحقیق و یافته‌های تحقیق آرایه می‌گردد.

¹ Adversarial neural network

² Coati Optimization Algorithm (COA)

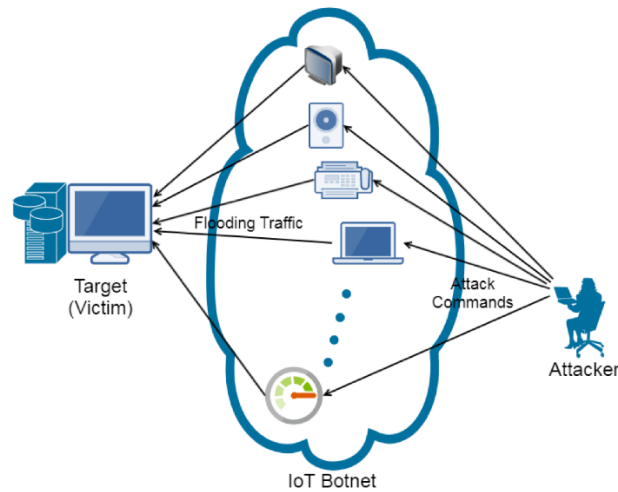
³ Blockchain

۲- کارهای مرتبط

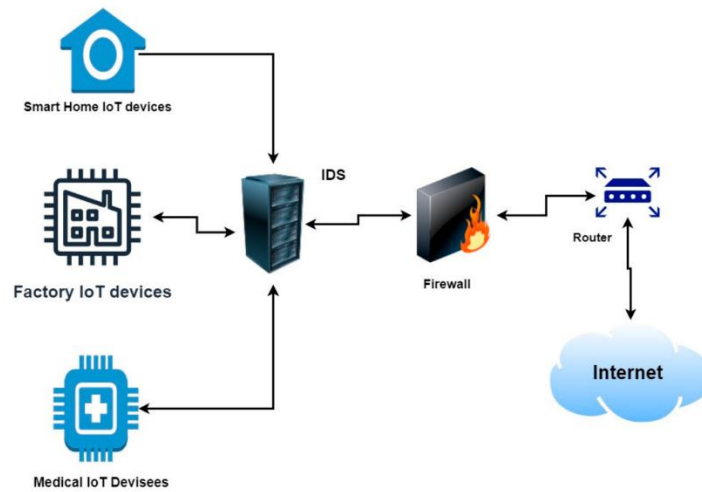
در دنیای پر سرعت امروز، که در آن تعداد دستگاه‌های متصل به اینترنت در حال افزایش است و برنامه‌های کاربردی آنلاین با سرعتی سریع در حال رشد هستند، امنیت اطلاعات در حال تبدیل شدن به یک ضرورت مطلق است. از زمان شروع شبکه جهانی وب، ۱.۲ میلیارد وب سایت توسعه یافته است و تعداد زیادی از برنامه‌های کاربردی آنلاین با خدمات وب مختلف مانند تجارت الکترونیک، بانکداری آنلاین، خرید آنلاین، آموزش آنلاین، مراقبت‌های بهداشتی الکترونیک و سیستم‌های کنترل صنعتی برای زیرساخت‌های حیاتی و غیره ادغام شده‌اند. امروزه مهاجمان سایبری برای انجام حملات موفقیت آمیز به کسب و کارها و دولت‌ها بسیار ماهر و مجهز هستند. جرایم سایبری امروزه تجارت بزرگی است و حجم اطلاعات دزدیده شده بسیار زیاد است. دسته‌های مختلفی از بدافزارها وجود دارد. این یک خطر بزرگ برای دولت‌ها، مشاغل و مصرف‌کنندگان در سراسر جهان است. لازم نیست برای یادآوری حمله گسترده به بانکی در بنگلادش که در آن ۸۱ میلیون دلار به سرقت رفت، به گذشته برگردیم. این یک یادآوری دائمی است از اینکه این حملات چقدر می‌توانند موثر باشند. از رایانه‌های خود بانک برای انتقال مبالغ هنگفتی استفاده می‌شد. آمارها نشان می‌دهد که ۲۰ درصد از کسب و کارهای آسیب دیده در دسته مشاغل کوچک، ۳۳ درصد در گروه متوسط و ۴۱ درصد در دسته مشاغل بزرگ قرار می‌گیرند. هر چه تهدید گسترده‌تر باشد، آگاهی از مسائل و حفاظت از اطلاعات مهم اهمیت بیشتری پیدا می‌کند. هشتاد و دو درصد از سازمان‌ها در معرض حداقل یک یا چند حمله قرار گرفته‌اند که در آن داده‌ها به سرقت رفته و برای فلج کردن خدمات قربانی استفاده می‌شود. سازمان‌هایی که تحت تأثیر حملات DDoS قرار گرفتند، کاهش ۲۶ درصدی در عملکرد سرویس‌های خود و ۴۱ درصد از قطع شدن سرویس‌های آسیب‌دیده را گزارش کردند [۲۵]. در یک حمله DDoS، دستگاه‌های متعددی به یک سرور یا شبکه حمله می‌کنند. هدف این حمله بارگذاری بیش از حد یک سرور یا شبکه هدفمند با درخواست‌های تقلبی متعدد است تا با ترافیک معمولی آن تداخل ایجاد کند. این امر منابع شبکه را تحت‌الشعاع قرار می‌دهد و در نتیجه ترافیک قانونی با اختلالات سرویس مواجه می‌شود. این حملات با شبکه‌های دستگاه‌های متصل به اینترنت از جمله رایانه‌های شخصی و سایر دستگاه‌ها که به نرم‌افزارهای مخرب آلوده شده‌اند که مستعد دستکاری از راه دور هستند، اجرا می‌شوند. این دستگاه‌ها به عنوان ربات شناخته می‌شوند. حملات DDoS به این دلیل مؤثر هستند که از بات‌نت‌ها یا گروه‌هایی از رایانه‌های در معرض خطر به‌عنوان منبع اصلی حمله خود استفاده می‌کنند. هنگامی که یک بات‌نت ایجاد شد، مهاجم می‌تواند با ارسال دستورات از راه دور به هر ربات، حمله را هدایت کند. هر یک از ربات‌های بات‌نت در حالی که توسط بات‌نت مورد هدف قرار می‌گیرد، درخواست‌هایی را به IP سرور قربانی ارسال می‌کند، که ممکن است شبکه را تحت تأثیر قرار دهد و ترافیک قانونی را مختل کند. هر ربات یک دستگاه اینترنتی واقعی است که تمایز بین حملات و ترافیک قانونی را به چالش می‌کشد. همان‌طور که قبلاً مشخص شد، مهاجمان DDoS حملات خود را از طریق یک بات‌نت آغاز می‌کنند. بنابراین، معماری یک حمله DDoS شامل یک مهاجم، یک بات‌نت و شبکه یا سرور هدف خواهد بود. در شکل ۱، مکانیزم حملات DDoS به شبکه نمایش داده شده است [۲۶].

در این شکل مشاهده می‌شود اشیاء هوشمند مانند دوربین هوشمند به بدافزار آلوده شده و نقش حمله‌کننده به شبکه را برعهده دارد. برای تشخیص حملات به شبکه و شناسایی حملات در سرویس‌های خدمات، سیستم تشخیص نفوذ و دیوار آتش نقش حیاتی دارند. مطابق شکل ۲، یک سیستم تشخیص نفوذ ترافیک شبکه را تحلیل نموده و حملات را برای دیوار آتش ارسال نموده تا آنها را مسدود نماید [۲۷].

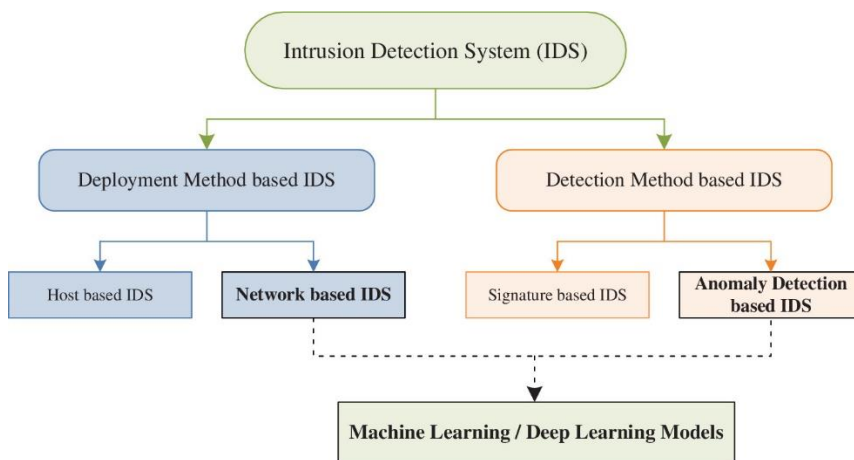
سیستم‌های تشخیص نفوذ به شبکه بر اساس عملکردی که دارند به چند گروه مطابق شکل ۳، طبقه‌بندی می‌شوند [۲۸].



شکل ۱: مکانیزم حملات DDoS در اینترنت اشیا [۲۶]
 Figure 1. Mechanism of DDoS attacks in Internet of Things [26]



شکل ۲: عملکرد سیستم تشخیص نفوذ و دیوار آتش [۲۷]
 Figure 2. Performance of intrusion detection system and firewall [27]



شکل ۳: دسته بندی سیستم های تشخیص نفوذ [۲۸]
 Figure 3. Classification of intrusion detection systems [28]

سیستم تشخیص نفوذ به چند رویکرد طبقه بندی می‌شود. روش اول یک رویکرد مبتنی بر امضا^۱ است که داده‌های سیستم فعلی را با امضای مستند حمله نفوذی که در پایگاه داده سیستم تشخیص نفوذ ذخیره شده است مقایسه می‌کند. وقتی سیستم تشخیص نفوذ یک تطابق را تشخیص می‌دهد، آن را به عنوان نفوذ طبقه بندی می‌کند. این روش امکان تشخیص سریع و دقیق را فراهم می‌کند. پایگاه داده امضا باید به طور منظم نگهداری شود که این یک اشکال است. همچنین، دستگاه ممکن است قبل از وصله حمله نفوذ بعدی هک شود. علاوه بر این، دارای معایب دیگری مانند بارگذاری بیش از حد شبکه، قیمت تطبیق امضای بالا و تعداد بالای هشدارهای اشتباه است. سیستم تشخیص نفوذ بر پایه امضاء، که حملاتی را که چندین بسته را در بر می‌گیرند، تجزیه و تحلیل می‌کند، با استفاده از بسته های شبکه و امضاهای تطبیق در مقابل یک پایگاه داده امضا، شناسایی دشوار است. با پیچیدگی بدافزارهای مدرن، استخراج امضا مورد نیاز خواهد بود. روش دوم مبتنی بر ناهنجاری یا مبتنی بر رفتار^۲ است که در آن سیستم تشخیص نفوذ هنگامی که دستگاه رفتار غیرعادی نشان می‌دهد، نفوذ را تشخیص می‌دهد. با استفاده از این ابزار می‌توان تهدیدات شناخته شده و ناشناخته را شناسایی کرد. با این حال، این تکنیک دارای دقت ضعیف و نرخ بالای هشدارهای کاذب به عنوان معایب است [۲۹]. از سوی دیگر، یک رویکرد ترکیبی، رویکردهای مبتنی بر امضا و ناهنجاری را با هم ترکیب می‌کند. این سیستم حملات شناسایی شده را با استفاده از رویکرد مبتنی بر امضا و حملات ناشناخته را با استفاده از رویکرد مبتنی بر ناهنجاری شناسایی می‌کند. کنار هم قرار دادن این دو روش می‌تواند منجر به تشخیص دقیق تر شود، اما آنها پتانسیل ناکارآمدی و افزایش هزینه های محاسباتی را دارند. این رویکرد به رفع محدودیت‌های یک فرآیند واحد کمک می‌کند، بنابراین قابلیت اطمینان کلی سیستم اینترنت اشیا را بهبود می‌بخشد. عیب آشکار این است که کل سیستم تشخیص نفوذ می‌تواند از نظر اندازه و پیچیدگی رشد کند. این امر عملکرد سیستم را پیچیده تر می‌کند و به منابع بیشتری نیاز دارد. روش تشخیص نفوذ می‌تواند منابع و زمان زیادی را مصرف کند، به خصوص اگر پروتکل های زیادی در چارچوب اینترنت اشیا وجود داشته باشد [۲۹ و ۳۰].

در ادامه تعدادی از کارهای مرتبط در تشخیص حملات و بخصوص حملات DDoS مرور و بررسی می‌شود و از طرفی سیستم‌های تشخیص نفوذ در این حوزه با روش‌های یادگیری ماشین مرور می‌شود.

در [۳۱]، سال ۲۰۲۳، یک سیستم تشخیص نفوذ شبکه برای حملات DDoS با استفاده از رمزگذارهای خودکار عمیق ارایه دادند. در این مقاله، ما یک معماری سیستم تشخیص نفوذ شبکه بر اساس یک رمزگذار خودکار عمیق آموزش دیده بر روی داده‌های جریان شبکه پیشنهاد شده است، که این مزیت را دارد که نیازی به دانش قبلی از توپولوژی شبکه یا معماری زیربنایی آن نیست. نتایج تجربی نشان می‌دهد که مدل پیشنهادی می‌تواند ناهنجاری‌های ناشی از حملات انکار سرویس توزیع شده، ارائه نرخ تشخیص بالا و آلام‌های کاذب کم شناسایی کند.

در [۳۲]، سال ۲۰۲۳، پیاده‌سازی مدل تشخیص نفوذ برای حملات DDoS در شبکه‌های اینترنت اشیا را ارایه دادند. این مقاله انواع مختلفی از طبقه‌بندی‌کننده‌ها را معرفی می‌کند که برای تشکیل سیستم‌های تشخیص نفوذ سبک وزن مناسب برای محافظت در برابر حملات انکار خدمات توزیع شده در شبکه‌های IoT استفاده می‌شوند. مجموعه داده های مورد استفاده برای آزمایش ها و تحقیقات BOT-IoT و مجموعه داده شبکه TON-IoT توسط دانشگاه New South Wales سیدنی استرالیا است. در [۳۳]، سال ۲۰۲۳، یک سیستم تشخیص نفوذ DDoS بر اساس روش ترکیبی CNN و LSTM ارایه دادند. در این مطالعه، یک روش طبقه‌بندی یادگیری عمیق جدید با ترکیب دو الگوریتم یادگیری عمیق رایج، شبکه‌های عصبی کانولوشن حافظه کوتاه مدت بلند مدت پیشنهاد شده است. برای آزمایش مدل از مجموعه داده NSL-KDD استفاده شده است. این معماری متشکل از هفت لایه برای دستیابی به عملکرد بالاتر در مقایسه با CNN و LSTM سنتی است. مدل پیشنهادی بالاترین دقت ۹۹/۲۰ درصد را در مقایسه با کار قبلی به دست آورد.

در [۳۴]، سال ۲۰۲۳، یک سیستم تشخیص نفوذ شبکه کارآمد برای شبکه های توزیع شده با استفاده از تکنیک یادگیری ماشین ارایه دادند. در این مطالعه، تکنیک طبقه‌بندی مبتنی بر الگوریتم جنگل تصادفی برای انتخاب ویژگی استفاده شده است. برای ذخیره تعداد زیادی از حملات محتاطانه، از سیستم فایل Hadoop و معماری Apache Spark برای افزایش سرعت پردازش

¹ Signature base

² Anomaly based or behavior based

داده‌ها، به عنوان راه حل پیشنهادی استفاده می‌شود. این روش با استفاده از مجموعه داده معیار NSL-KDD برای یافتن دقت و بسیاری از پارامترهای دیگر ارزیابی شده است. نتایج تجربی نشان داد روش آنها از تکنیک‌های یادگیری ماشین، درخت تصمیم، جنگل تصادفی و تحلیل مؤلفه اصلی، شبکه بیزین^۱، ماشین بردار پشتیبان و رگرسیون لجستیک^۲ دقت بیشتری در تشخیص حملات دارد.

در [۳۵]، سال ۲۰۲۳، یک مدل مبتنی بر هسته RBF-SVM^۳ برای تشخیص حملات DDoS ارائه دادند. راه‌حل پیشنهادی از تکنیک جستجوی پارامتر جامع اعتبارسنجی متقابل جستجوی شبکه و هسته تابع پایه شعاعی از الگوریتم ماشین بردار پشتیبان استفاده می‌کند. طرح پیشنهادی آنها در شبکه دارای میانگین خطای مطلق ۰/۰۰۶ است و نسبت به نسخه استاندارد ماشین بردار پشتیبان دقت بیشتری دارد.

در [۳۶]، سال ۲۰۲۳، یک سیستم تشخیص نفوذ شبکه تطبیقی جدید برای اینترنت اشیاء ارائه دادند. روش آنها ترکیبی از روشهای Fast R-CNN و گرادیان برای تشخیص حملات است. مدل پیشنهادی آنها در تشخیص "حملات سایبری" به دقت بالای دارد و از شبکه عصبی کانولوشن دقت بیشتری ارائه می‌دهد.

در [۳۷]، سال ۲۰۲۳، تشخیص حملات به شبکه با استفاده از سیستم تشخیص نفوذ بهبودیافته با هوش گروهی را ارائه دادند. این مطالعه یک سیستم تشخیص نفوذ موثر با بهینه‌سازی گرگ خاکستری و ماشین تقویت گرادیان LightGBM را پیشنهاد دادند. مجموعه داده InSDN برای آموزش و آزمایش سیستم پیشنهادی، که به عنوان یک مجموعه داده معیار جدید در نظر گرفته می‌شود، استفاده شده است. ارزیابی سیستم پیشنهادی نشان داد که روش پیشنهادی به دقتی بیش از ۹۸٪ دست یافته است. در [۳۸]، سال ۲۰۲۳، یک روش بهینه‌سازی پارامترهای شبکه BPN با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی ذرات برای تشخیص نفوذ در محیط ابری را ارائه دادند. آنها مجموعه داده KDD cup 99 را برای تشخیص حملات مورد استفاده قرار دادند. برای افزایش بهینه‌سازی شبکه عصبی، از بهینه‌سازی ازدحام ذرات استفاده کردند و در نتیجه تشخیص دقیق را افزایش دادند و دقت روش آنها به حدود ۹۶/۵٪ رسیده است.

در [۳۹]، سال ۲۰۲۳، چارچوبی جدید برای تشخیص حملات DDoS با استفاده از تکنیک‌های ترکیبی و مبتنی بر شبکه عصبی LSTM ارائه دادند. در این کار تحقیقاتی، روش‌های تشخیص حمله DDoS مبتنی بر استخراج ویژگی‌های شبکه باور عمیق و مدل حافظه کوتاه‌مدت ترکیبی بر پایه LSTM در مجموعه داده NSL-KDD پیشنهاد دادند. در روش هیبریدی LSTM، تکنیک بهینه‌سازی ازدحام ذرات که برای بهینه‌سازی وزن شبکه عصبی LSTM ترکیب شده است، خطای پیش‌بینی را کاهش می‌دهد. این روش شبکه باور عمیق برای استخراج ویژگی‌های بسته‌های IP استفاده می‌شود و حملات DDoS را بر اساس مدل PSO-LSTM شناسایی می‌کند. علاوه بر این، ترافیک عادی شبکه را به دقت پیش‌بینی می‌کند و ناهنجاری‌های ناشی از حملات DDoS را تشخیص می‌دهد. معماری PSO-LSTM پیشنهادی از تکنیک‌های طبقه‌بندی شامل ماشین بردار پشتیبانی استاندارد و LSTM از نظر عملکرد تشخیص حمله دقت بیشتری دارد.

در [۴۰]، سال ۲۰۲۳، یک روش تشخیص نفوذ برای شناسایی حملات انکار سرویس با استفاده از کدهای خروجی تصحیح خطا و استنتاج عصبی فازی تطبیقی ارائه دادند. روش پیشنهادی فرآیند تشخیص نفوذ را در سه مرحله به نام‌های پیش پردازش، استخراج ویژگی و طبقه‌بندی انجام می‌دهد. در ابتدا تجزیه و تحلیل اجزای اصلی برای استخراج ویژگی‌ها استفاده می‌شود، در ادامه سیستم استنتاج عصبی فازی تطبیقی برای طبقه‌بندی استفاده می‌شود. در این مدل طبقه‌بندی، از الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات برای بهینه‌سازی ساختار شبکه عصبی فازی استفاده شده است. عملکرد روش پیشنهادی با استفاده از پایگاه داده NSLKDD ارزیابی شده است. نتایج نشان می‌دهد که روش پیشنهادی می‌تواند انواع حملات DoS را با دقت بالا تشخیص دهد و عملکرد بهتری از شبکه‌های عصبی مشابه دارد.

در [۴۸]، سال ۲۰۲۳، یک روش انتخاب ویژگی ترکیبی برای تشخیص نفوذ شبکه مبتنی بر شبکه عصبی مصنوعی چند لایه در مجموعه داده UNSW-NB15 ارائه دادند. آنها از ترکیبی از دو روش فیلتر، به ترتیب به دست آوردن اطلاعات (IG) و جنگل

¹ Bayesian network

² Logistic regression

³ Radial Basis Function-Support Vector Machine

تصادفی (RF) برای کاهش فضای جستجوی زیرمجموعه ویژگی‌ها استفاده کردند. در مرحله دوم رویکرد آنها، از یک روش پوشش مبتنی بر یادگیری ماشین استفاده کردند که حذف ویژگی بازگشتی (RFE) را برای کاهش بیشتر ابعاد ویژگی و در عین حال در نظر گرفتن ارتباط ویژگی‌های مشابه فراهم می‌کند. نتایج نشان می‌دهد که روش آنها فضای ویژگی را از ۴۲ به ۲۳ کاهش می‌دهد و دقت شبکه عصبی با انتخاب ویژگی از $0.82/0.25$ به $0.84/0.24$ بهبود یافته است.

در [۴۹]، سال ۲۰۲۳، یک مدل کارآمد تشخیص نفوذ شبکه برای امنیت اینترنت اشیاء با استفاده از طبقه‌بندی کننده K-NN ارائه دادند. در این پژوهش از تجزیه و تحلیل مؤلفه اصلی، آزمون آماری تک متغیره، و الگوریتم ژنتیک برای انتخاب ویژگی به طور جداگانه برای بهبود کیفیت داده‌ها و انتخاب ویژگی استفاده می‌شود. ارزیابی روش آنها بر روی مجموعه داده Bot-IoT انجام می‌شود. آزمایشات نشان داد با اعمال انتخاب ویژگی، زمان آموزش از $51182/22$ ثانیه به زیر یک دقیقه کاهش داده می‌شود.

در [۵۰]، سال ۲۰۲۳، یک سیستم تشخیص نفوذ برای شناسایی حملات وب بر اساس مجموعه‌ای از تکنیک‌های انتخاب ویژگی فیلتر ارائه دادند. پژوهش آنها مجموعه‌ای از تکنیک‌های انتخاب ویژگی فیلتر را پیشنهاد می‌کند تا با انتخاب یک چهارم از ویژگی‌های رتبه‌بندی‌شده، یک زیرمجموعه ویژگی قابل توجه برای تشخیص حمله به دست آید. آزمایشات نشان داد روش آنها با ۲۴ ویژگی انتخاب شده و درخت تصمیم‌گیری دارای بهترین نتایج برای تشخیص نفوذ است.

در [۵۱]، سال ۲۰۲۳، یک روش انتخاب ویژگی جدید مبتنی بر بهبود الگوریتم بهینه‌سازی کرکس آفریقایی برای تشخیص حمله DDoS ارائه شده است. در این مطالعه، یک الگوریتم بهینه‌سازی کرکس آفریقایی بهبود یافته بر اساس معادلات سینوس و کسینوس برای انتخاب ویژگی‌های مؤثر حملات DDoS پیشنهاد شده است. برای انتخاب زیرمجموعه بهینه ویژگی‌ها، نزدیکترین همسایه به عنوان طبقه بندی کننده در روش استفاده می‌شود. عملکرد روش پیشنهادی در دو مجموعه داده CIC-DDOS2019 و NSL-KDD برای تشخیص حمله DDoS با برخی از پیشرفته‌ترین فناوری‌های اخیر مقایسه می‌شود. نتایج آزمایش نشان می‌دهد که روش پیشنهادی آنها نسبت به الگوریتم‌های فراابتکاری رایج در تشخیص و انتخاب ویژگی برای شناسایی حملات دقیق‌تر است.

در [۵۲]، سال ۲۰۲۳، یک تکنیک انتخاب ویژگی پویا برای تشخیص حمله DDoS ارائه شده است. در این پژوهش، به منظور انتخاب ویژگی‌های مؤثر، یک تکنیک انتخاب ویژگی ترکیبی مبتنی بر رأی‌گیری پیشنهاد شده است. روش ترکیبی نه تنها ابعاد ویژگی‌ها را کاهش می‌دهد و افزودن را از بین آنها حذف می‌کند، بلکه بهترین ویژگی‌های مرتبط را برای طبقه‌بندی ارائه می‌دهد. آزمایشات نشان داد پرسپترون^۱ چند لایه با الگوریتم ژنتیک (MLP-GA) به عنوان یک طبقه‌بندی کننده، با ارائه دقت $98/18$ ، نرخ مثبت کاذب $0/6$ و قابلیت تشخیص زودهنگام، از طبقه‌بندی کننده‌های معمولی بهتر عمل می‌کند.

در [۵۳]، سال ۲۰۲۲، یک روش تشخیص حمله DDoS در رایانش ابری بر اساس انتخاب ویژگی گروه و یادگیری عمیق را ارائه دادند. در این پژوهش، یک حالت یادگیری عمیق ترکیبی مبتنی بر ترکیب شبکه عصبی کانولوشن با حافظه بلند مدت به دلیل استحکام و کارایی آن در تشخیص ترافیک عادی و حمله استفاده شده است. آنها برای تشخیص حملات از مجموعه داده CICIDS 2017 استفاده نمودند. نتایج نشان داد روش آنها از شبکه عصبی CNN و LSTM دقت بیشتری در تشخیص حملات دارند.

در [۵۴]، سال ۲۰۲۲، یک روش جدید برای تشخیص نفوذ با شناسایی نقاط پرت چند متغیره و انتخاب ویژگی ReliefF ارائه دادند. در روش آنها ابتدا، رویکرد انتخاب ویژگی ReliefF برای شناسایی بهترین ویژگی‌هایی که عملکرد طبقه‌بندی را در سطح بالایی حفظ می‌کنند، به کار گرفته شده است و ۲۰ ویژگی تعیین شده است. سپس، برای یافتن نقاط پرت در مجموعه داده، از رویکردهای فاصله و کای اسکور Mahalanobis استفاده شده است. پس از آن، روش‌های مختلف یادگیری ماشین برای مجموعه داده اعمال شده و نتایج با هم مقایسه شده‌اند. دقت بالای این روش در مجموعه داده NSL-KDD مزیت آن است اما ایراد آن عدم معماری توزیع شده برای تشخیص حملات است که سیستم تشخیص نفوذ آنها را در مواجهه با حجم زیادی از ترافیک کند خواهد کرد.

¹ perceptron

در [۵۵]، سال ۲۰۲۱، ترکیب انتخاب ویژگی مبتنی بر PCA با طبقه‌بندی درخت تصادفی برای تشخیص نفوذ در شبکه اینترنت اشیاء را ارائه دادند. نتایج تجربی روی مجموعه داده‌های ترافیک شبکه‌های IoT نشان می‌دهد که سیستم تشخیص نفوذ پیشنهادی با استفاده از طبقه‌بندی درخت تصادفی بهترین عملکرد را از نظر دقت و مصرف انرژی به دست می‌آورد. در جدول ۱، روش، مزایا و معایب هر یک از سیستم‌های تشخیص نفوذ با هم مقایسه شده است.

جدول ۱: خلاصه مطالعات مرور شده در زمینه تشخیص حملات به شبکه

Table 1: Summary of reviewed studies in the field of network attack detection

پژوهش	روش	مزیت	عیب
در [۳۱]، سال ۲۰۲۳	تشخیص نفوذ شبکه برای حملات DDoS با استفاده از رمزگذارهای خودکار عمیق	نرخ تشخیص بالا و آزارهای کاذب کم	عدم بکارگیری انتخاب ویژگی و عدم متعادل‌سازی مجموعه داده
در [۳۲]، سال ۲۰۲۳	انواع مختلفی از طبقه‌بندی‌کننده‌ها برای تشخیص حملات	بکارگیری دو مجموعه داده	عدم معماری توزیع شده برای تشخیص حملات در زمان واقعی
در [۳۴]، سال ۲۰۲۳	الگوریتم جنگل تصادفی برای انتخاب ویژگی	دقت بیشتر از شبکه بیزین، ماشین بردار پشتیبان و رگرسیون لجستیک	عدم متعادل‌سازی مجموعه داده و معماری متمرکز سیستم تشخیص نفوذ
در [۳۵]، سال ۲۰۲۳	مدل مبتنی بر هسته RBF-SVM برای تشخیص حملات	دقت بیشتر از الگوریتم ماشین بردار	نیاز به داده‌های آموزشی زیادی دارد.
در [۳۶]، سال ۲۰۲۳	روشهای Fast R-CNN و گرادیان برای تشخیص حملات	دقت بیشتر از شبکه عصبی کانولوشن	پیچیدگی بالا
در [۳۷]، سال ۲۰۲۳	بهینه‌ساز گرگ خاکستری و ماشین تقویت گرادیان LightGBM	دقتی بیش از ۹۸٪	مقایسه‌های ضعیف و عدم متعادل‌سازی مجموعه داده
در [۳۸]، سال ۲۰۲۳	شبکه عصبی BPN با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی ذرات	دقت روش آنها ۹۶/۵٪ است.	بکارگیری مجموعه داده قدیمی
در [۲۹]، سال ۲۰۲۳	برای بهینه سازی وزن شبکه عصبی LSTM با الگوریتم PSO	دقت بیشتر از LSTM	فقط ویژگی‌های مرتبط با IP بررسی شده است.
در [۴۰]، سال ۲۰۲۳	استنتاج عصبی فازی تطبیقی در تشخیص حملات	عملکرد بهتری از شبکه‌های عصبی مشابه دارد.	قطعیت آنها بالا نیست.
در [۴۸]، سال ۲۰۲۳	تشخیص نفوذ شبکه مبتنی بر شبکه عصبی مصنوعی چند لایه و انتخاب ویژگی با جنگل تصادفی و روش IG	کاهش ابعاد ترافیک شبکه از ۴۱ و ویژگی به ۲۳ ویژگی	دقت متوسط
در [۴۹]، سال ۲۰۲۳	طبقه‌بندی کننده K-NN	کاهش زمان آموزش	روش نزدیکترین همسایه هوشمندی بالایی ندارد.
در [۵۰]، سال ۲۰۲۳	تکنیک‌های انتخاب ویژگی فیلتر	توانایی تشخیص حملات وب در شبکه	دقت متوسط و عدم متعادل‌سازی مجموعه داده
در [۵۱]، سال ۲۰۲۳	الگوریتم بهینه‌سازی کرکس آفریقای بی‌بهدیه یافته در تشخیص حملات	تحلیل روی دو مجموعه داده	پیچیدگی زیاد الگوریتم کرکس و عدم متعادل‌سازی مجموعه داده
در [۵۲]، سال ۲۰۲۳	تکنیک انتخاب ویژگی پویا برای تشخیص حمله	دقت ۹۸/۸٪	ترکیب الگوریتم ژنتیک و شبکه عصبی زمان آموزش را افزایش می‌دهد.
در [۵۳]، سال ۲۰۲۲	ترکیب شبکه عصبی LSTM و CNN در تشخیص حملات در لایه ابر	دقت بیشتر از شبکه عصبی LSTM و CNN	پیچیدگی محاسباتی زیاد
در [۵۴]، سال ۲۰۲۲	شناسایی نقاط پرت چند متغیره و انتخاب ویژگی ReliefF در تشخیص حملات	شناسایی حملات پیچیده	عدم معماری توزیع شده و عدم متعادل‌سازی مجموعه داده
در [۵۵]، سال ۲۰۲۱	انتخاب ویژگی مبتنی بر PCA و درخت تصادفی	دقت بیشتر از درخت تصادفی	عدم تشخیص ویژگی‌های مؤثر در حملات

۳- روش پیشنهادی

در روش پیشنهادی یک سیستم تشخیص نفوذ در لایه مه ارائه می‌شود که چارچوب آن در شکل ۴، نمایش داده شده است. با توجه به چارچوب ارائه شده، در ابتدا ترافیک شبکه به عنوان ورودی لایه مه در نظر گرفته می‌شود و سپس در ادامه ترافیک شبکه با روش یادگیری عمیق GAN متعادل‌سازی می‌شود. در مرحله بعدی از نسخه باینری الگوریتم کوآتی برای انتخاب ویژگی در لایه مه استفاده می‌شود و ویژگی‌های مهم به عنوان ورودی شبکه عصبی چند لایه در نظر گرفته می‌شود. شبکه عصبی مصنوعی نقش طبقه‌بندی ترافیک شبکه به دو دسته حمله و عادی را بر عهده دارد و سپس هر گره مه لیست سیاه خود را به روزرسانی می‌کند. در ادامه لیست سیاه بین گره‌های مه با بلاک چین مبادله می‌شود تا هکر نتواند لیستهای سیاه را دستکاری نماید. در نهایت مثل آموزش یافته با استفاده از داده‌های آزمون مورد ارزیابی قرار گرفته می‌شود و از نظر شاخص دقت و حساسیت با روشهای مشابه مورد مقایسه قرار گرفته می‌شود.



شکل ۴: چارچوب سیستم تشخیص نفوذ پیشنهادی
Figure 4. The framework of the proposed intrusion detection system

۳-۱- پیش پردازش ترافیک

ترافیک شبکه دارای مجموعه ای از ویژگی ها است که مقدار آن ها می تواند دارای دامنه متفاوتی باشد. برای آنکه دقت مدل های یادگیری ماشین افزایش داده شود بهتر است که دامنه و کران پایین و بالای همه ویژگی های مجموعه داده در بازه [a,b] نرمال شود و برای این منظور از رابطه ۱، استفاده می شود و اگر بازه نرمال سازی بین صفر و یک باشد از رابطه ۲، استفاده می شود:

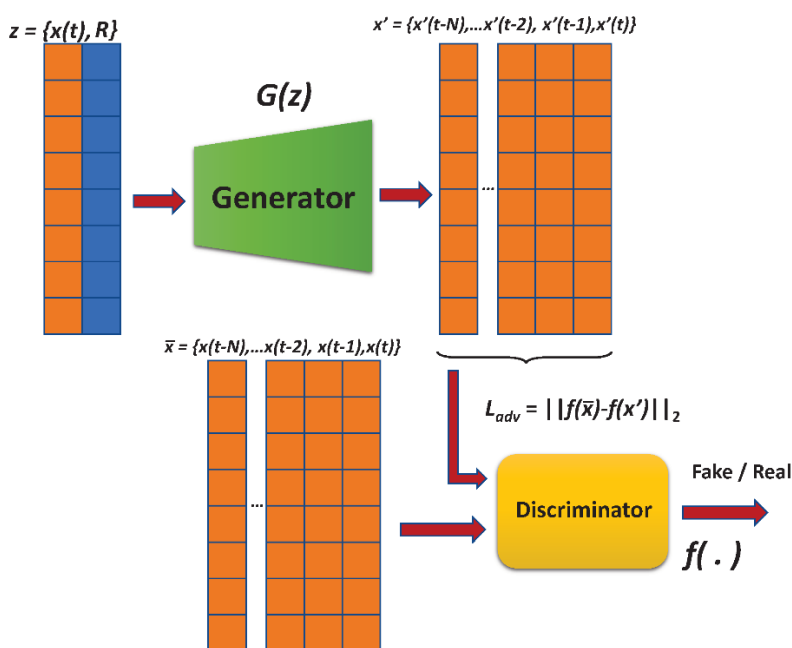
$$X_n = a + \frac{(Max(X) - X)(b - a)}{Max(X) - Min(X)} \quad (1)$$

$$X_n = \frac{(Max(X) - X)}{Max(X) - Min(X)} \quad (2)$$

در این رابطه ها، Max و Min به ترتیب بیشترین و کمترین مقدار ویژگی X است و X_n مقدار نرمال شده ویژگی X است.

۳-۲- متعادل سازی ترافیک با شبکه GAN

شبکه‌های متخاصم مولد (GAN) نشان‌دهنده یک پیشرفت اخیر در یادگیری ماشین هستند و یک کلاس قدرتمند از شبکه‌های عصبی هستند که در یادگیری بدون نظارت مورد استفاده قرار می‌گیرند. آنها مدل‌های مولد هستند به این معنا که نمونه‌های داده جدیدی ایجاد می‌کنند که شبیه داده‌های آموزشی اصلی است. داده‌های جدید بر اساس یادگیری الگوهای موجود در داده‌های اصلی ایجاد می‌شوند. کاربردهای متعددی از GAN ها در امنیت شبکه وجود دارد. شبکه GAN یک شبکه عصبی بر اساس تئوری بازی است که مانند شکل ۵، دارای دو بخش مولد و متمایزگر است. بخش مولد بر اساس اطلاعات و داده‌های نویز و تصادفی و تاثیر آنها روی داده‌های واقعی تلاش می‌کند تا داده‌های مصنوعی و جعلی را ایجاد کند و اگر متمایزگر فریب بخورد و داده‌های جعلی را به عنوان داده واقعی در نظر بگیرد آنگاه مولد برنده می‌شود. اگر متمایزگر فریب نخورد و داده مصنوعی و جعلی را تشخیص دهد آنگاه متمایزگر برنده شده است. به عبارتی بین متمایزگر و مولد یک بازی Min-Max برقرار است.



شکل ۵: ساختار شبکه عصبی GAN در تولید نمونه‌های مصنوعی و جعلی [۴۱]
Figure 5. The structure of GAN neural network in generating artificial and fake samples [41]

در این شکل، نمونه‌های واقعی با x و نمونه‌های جعلی با x' نمایش داده می‌شود و بردار نویز نیز با z در نظر گرفته می‌شود.

تابع هدف در شبکه عصبی GAN به صورت معادله ۳، تعریف می‌شود [۴۲]،

$$\min_G \max_D V(G, D) = \mathbb{E}_{s \sim p(s)} [\log D(s)] + \mathbb{E}_{z \sim p(z)} [\log(1 - D(G(z)))] \quad (3)$$

$p(s)$ پراکندگی داده‌های واقعی است و $g(z)$ تولید نمونه‌های نویز را بر عهده دارد و z مقادیر تصادفی برای ایجاد نمونه‌های جعلی است. در این معادله، $D(s)$ احتمال یک نمونه برای قرار گیری در کلاس نمونه‌های واقعی است.

۳-۳- انتخاب ویژگی با الگوریتم بهینه سازی کوآتی

مسئله انتخاب ویژگی یک مسئله باینری و گسسته است زیرا بردارهای ویژگی دارای مقادیر ۰ یا ۱ می‌باشند که به ترتیب عدم انتخاب و ویژگی را نشان می‌دهد. چون مجموعه داده بکار رفته NSL-KDD است و این مجموعه داده دارای ۴۱ ویژگی است لذا هر بردار ویژگی دارای ۴۱ عنصر است که مقادیر آنها باینری و گسسته است از این نظر باید برای انتخاب ویژگی یک الگوریتم بهینه‌سازی گسسته و باینری را استفاده نمود. در روش پیشنهادی برای باینری نمودن راه‌حلهای یا بردارهای ویژگی در الگوریتم بهینه‌سازی کوآتی از توابع تبدیل نظیر S و V استفاده می‌شود. نقش توابع تبدیل، تبدیل فضای پیوسته به گسسته و باینری است.

الگوریتم بهینه‌سازی کوآتی بر اساس رفتار نوعی راکون به نام کوآتی الگوبرداری شده است. در این الگوریتم رفتار شکار کردن ایگوانا توسط کوآتی و فرار از چنگال پلنگ برای مدل‌سازی آنها در نظر گرفته می‌شود. در این الگوریتم کوآتی‌ها به دو دسته تقسیم می‌شوند و دسته اول بالای درخت رفته و ایگوانا را می‌ترسانند و ایگوانا به زمین می‌افتد و دسته دوم از فرصت استفاده می‌کند و تلاش می‌کنند تا ایگوانا را شکار کنند. در ادامه کوآتی‌ها می‌توانند از موقعیت خطرناک که می‌تواند آنها را به عنوان طعمه یک پلنگ قرار دهد نیز فرار کنند. در این الگوریتم هر راه‌حل مسئله یک کوآتی است و بهینه‌ترین راه‌حلی که پیدا شده است نیز یک ایگوانا است. در ابتدا راه‌حلهای تصادفی و جمعیت اولیه بردارهای ویژگی یا کوآتی‌ها در ماتریس X قرار داده می‌شود و X_i یک راه‌حل نظیر راه‌حل i ام است. در رابطه ۴، جمعیت اولیه بردارهای ویژگی در ماتریس X قرار داده شده است و در اینجا N راه‌حل وجود دارد و هر بردار ویژگی m مولفه دارد [۲۳].

$$X = \begin{bmatrix} X_1 \\ \vdots \\ X_i \\ \vdots \\ X_N \end{bmatrix}_{N \times m} = \begin{bmatrix} x_{1,1} & \cdots & x_{1,j} & \cdots & x_{1,m} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{i,1} & \cdots & x_{i,j} & \cdots & x_{i,m} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{N,1} & \cdots & x_{N,j} & \cdots & x_{N,m} \end{bmatrix}_{N \times m} \quad (4)$$

هر بردار ویژگی یا یک کوآتی نیاز به ارزیابی دارد و برای ارزیابی از تابع هدف انتخاب ویژگی در رابطه ۵، استفاده می‌شود.

$$F(X_i) = \alpha.E + \beta \frac{\|X_i\|}{m} \quad (5)$$

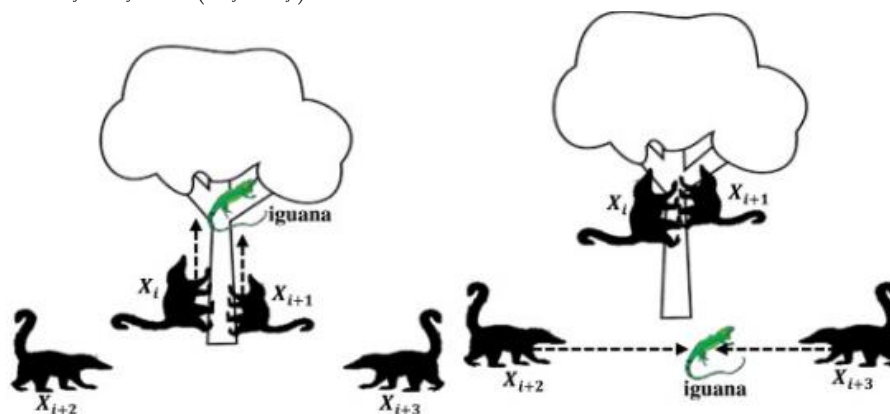
در تابع هدف پیشنهادی، E خطای تشخیص DDOS است و $\|X_i\|$ تعداد ویژگی‌های انتخاب شده توسط بردار ویژگی X_i است. α و β به ترتیب دو عدد تصادفی بین صفر و یک است که مجموع آنها یک است. بردارهای ویژگی با تابع هدف ارزیابی می‌شوند و مقدار ارزیابی آنها در رابطه ۶، نمایش داده شده است. هر بردار ویژگی که تابع هدف را کمینه‌تر نماید، شایستگی بیشتری برای انتخاب ویژگی دارد [۲۳].

$$F = \begin{bmatrix} F_1 \\ \vdots \\ F_i \\ \vdots \\ F_N \end{bmatrix}_{N \times 1} = \begin{bmatrix} F(X_1) \\ \vdots \\ F(X_i) \\ \vdots \\ F(X_N) \end{bmatrix}_{N \times 1} \quad (6)$$

در فاز بهره‌برداری الگوریتم کوآتی، نصف جمعیت بردارهای ویژگی یا کوآتی‌ها از درخت بالا می‌روند تا ایگوانا از بالای درخت سقوط کند و در ادامه نصف دیگر جمعیت آن را تعقیب می‌کند تا آن را شکار نماید که در شکل ۶، نمایش داده شده است. در معادلات ۷، ۸، ۹ و ۱۰ رفتار تعقیب روی درخت و زمین ایگوانا توسط کوآتی را نمایش می‌دهد [۲۳].

$$X_i^{P1} : x_{i,j}^{P1} = x_{i,j} + r \cdot (Iguana_j - l.x_{i,j}), i = 1, 2, \dots, \left\lfloor \frac{N}{2} \right\rfloor \text{ and } j = 1, 2, \dots, m \quad (7)$$

$$Iguana^G : Iguana_j^G = lb_j + r \cdot (ub_j - lb_j), j = 1, 2, \dots, m \quad (8)$$



شکل ۶: سقوط و تعقیب ایگوانا توسط جمعیت الگوریتم بهینه‌سازی کوآتی [۲۳]

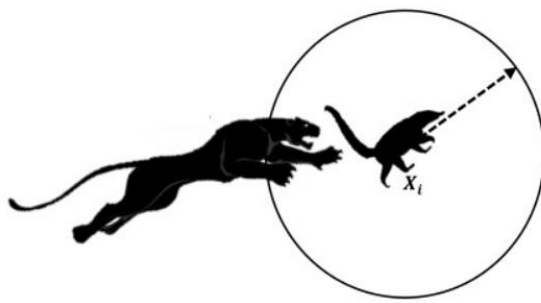
Figure 6. Falling and chasing iguana by the population of the Koati optimization algorithm [23]

$$X_i^{P1} : x_{i,j}^{P1} = \begin{cases} x_{i,j} + r \cdot (Iguana_j^G - I \cdot x_{i,j}), & F_{Iguana^G} < F_i \\ x_{i,j} + r \cdot (x_{i,j} - Iguana_j^G), & else \end{cases} \quad (9)$$

for $i = \left\lfloor \frac{N}{2} \right\rfloor + 1, \left\lfloor \frac{N}{2} \right\rfloor + 2, \dots, N$ and $j = 1, 2, \dots, m$

$$X_i = \begin{cases} X_i^{P1}, & F_i^{P1} < F_i \\ X_i, & else. \end{cases} \quad (10)$$

X_i^{P1} موقعیت جدید یک بردار ویژگی تحت تاثیر تعقیب است و F_i^{P1} مقدار تابع هدف به ازای راه حل X_i^{P1} است و r یک عدد تصادفی در بازه ۰ تا ۱۰ است. $Iguana_j^G$ نشان دهنده بعد j موقعیت جواب بهینه یا موقعیت ایگوانا است. مقدار ارزیابی یک ایگوانا با F_{Iguana^G} در نظر گرفته می شود. I یک عدد تصادفی و برابر ۱ یا ۲ است که ضریب تاثیر تعقیب و فرار است. فرآیند فرار کوآتی ها از شکارچیان مرحله بهره برداری یا جستجوی محلی است و در شکل ۷، نمایش داده شده است. در این حالت کوآتی از شکارچی فرار کرده و به یک موقعیت جدید رفته و برای مدلسازی این رفتار از معادلات ۱۱، ۱۲ و ۱۳ استفاده می شود [۲۳]،



شکل ۷: فرار کوآتی ها از موقعیت خطر [۲۳]
Figure 7. The escape of Kuwaitis from a dangerous situation [23]

$$lb_j^{local} = \frac{lb_j}{t}, ub_j^{local} = \frac{ub_j}{t}, \text{ where } t = 1, 2, \dots, T. \quad (11)$$

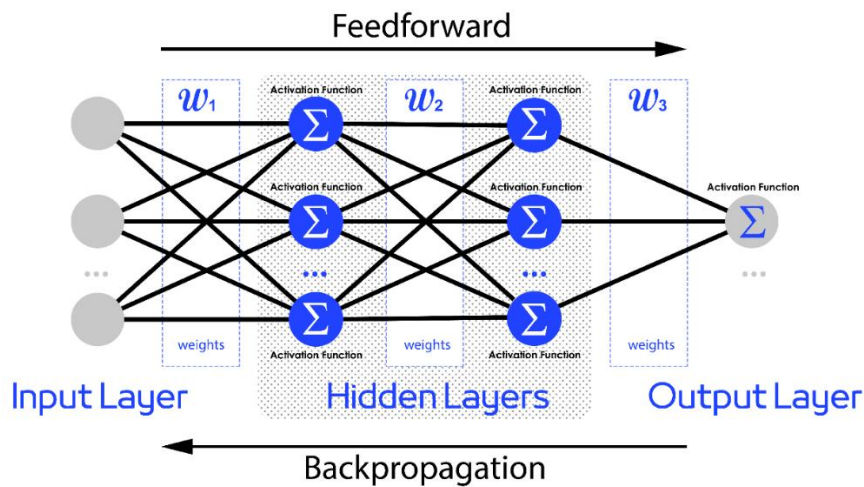
$$X_i^{P2} : x_{i,j}^{P2} = x_{i,j} + (1-2r) \cdot (lb_j^{local} + r \cdot (ub_j^{local} - lb_j^{local})) \quad i = 1, \dots, N, j = 1, \dots, m. \quad (12)$$

$$X_i = \begin{cases} X_i^{P2}, & F_i^{P2} < F_i \\ X_i, & else \end{cases} \quad (13)$$

X_i^{P2} موقعیت جدید یک بردار ویژگی در جستجوی محلی است. lb_j^{local} و ub_j^{local} به ترتیب محدوده بالا و پایین ابعاد بردارهای ویژگی است که به ترتیب یک و صفر است. t شمارنده تکرار الگوریتم و T حداکثر تعداد تکرار الگوریتم بهینه سازی کوآتی است. انتخاب ویژگی توسط روشهای فراابتکاری فقط در فاز انتخاب ویژگی دارای مقداری سربار زمانی است اما این سربار در مقابل کاهش ابعاد ترافیک بسیار ناچیز است. زمان اجرای الگوریتم های فراابتکاری برای انتخاب ویژگی در حد چند ثانیه است و انتخاب ویژگی فقط یک بار زمان آموزش شبکه عصبی اجراء می شود و با کشف بردار ویژگی بهینه دیگر فاز انتخاب ویژگی متوقف شده است. به عبارت ساده تر با انتخاب ویژگی بردار ویژگی در اوایل فرآیند اجرای سیستم تشخیص نفوذ، ویژگی های مهم کشف می شوند و در ادامه کار سیستم تشخیص نفوذ این بردار ویژگی بهینه باعث می شود تا یادگیری و طبقه بندی روی همه ویژگی ها انجام نشود و فقط روی ویژگی های انتخاب شده انجام شود و در این مرحله و داده های آزمون زمان طبقه بندی و تشخیص نفوذ به دلیل کاهش ابعاد ترافیک شبکه کاهش خواهد یافت. به عبارت دیگر انتخاب ویژگی مقداری سربار زمانی برای آموزش روی داده های آموزشی تحمیل می کند اما در زمان طبقه بندی داده ها و ترافیک آزمون این زمان جبران شده و باعث افزایش سرعت طبقه بندی ترافیک می شود.

۳-۴- طبقه بندی با شبکه عصبی چند لایه

در یک شبکه عصبی زمانی که وزن لایه‌های پنهان کاملاً به هم متصل می‌شوند، شبکه عصبی چند لایه نامیده می‌شود. در شبکه عصبی چند لایه هر نورون شبکه یک تابع فعال سازی دارد. تحت الگوریتم‌های پیشخور دسته‌بندی می‌شوند که در آن داده‌ها از ورودی، از طریق لایه‌های پنهان به خروجی در یک جهت جریان می‌یابند. اگر الگوریتم فقط مجموع وزنی هر نورون را محاسبه کند و به لایه بعدی منتقل شود، نمی‌تواند وزن‌های مورد استفاده برای به حداقل رساندن تابع هزینه را یاد بگیرد. تا زمانی که الگوریتم تکرار نشود، هیچ یادگیری موثری وجود ندارد. برای انجام این کار، ما باید از BP به عنوان یک الگوریتم یادگیری استفاده کنیم، که به شبکه عصبی چند لایه اجازه می‌دهد تا وزن شبکه را به طور مکرر با استفاده از گرادینان نزول تنظیم کند تا عملکرد هزینه را تا حد امکان پایین بیاورد. به طور خلاصه، شبکه عصبی چند لایه دارای چندین لایه پنهان است و پیشخور به جریان داده شبکه عصبی چند لایه در یک جهت از ورودی به خروجی اشاره دارد. شبکه عصبی چند لایه به یک شبکه عصبی با نورون‌های کاملاً متصل و استفاده از نوعی تابع فعال سازی اشاره دارد. در شکل ۸، ساختار یک شبکه عصب چند لایه که در لایه مه و گره‌های مه نقش طبقه‌بندی کردن ترافیک شبکه را بر عهده دارد نمایش داده شده است.

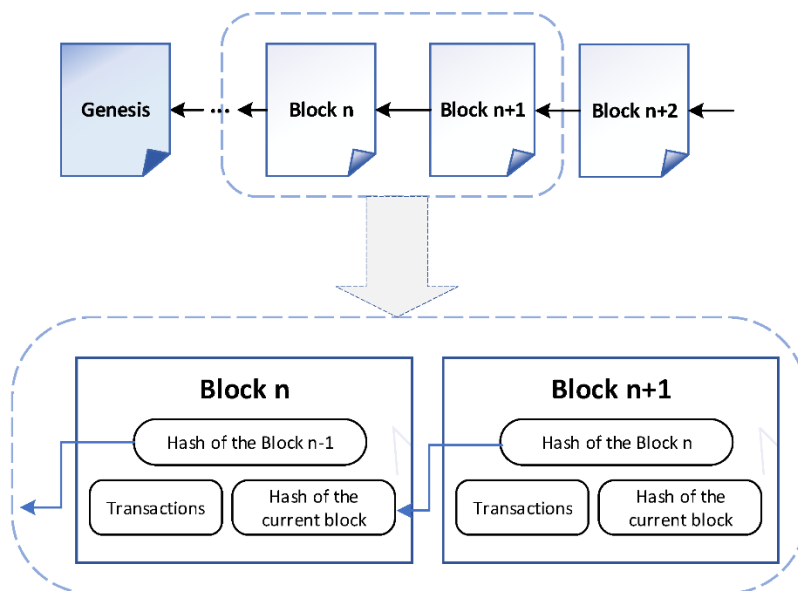


شکل ۸: ساختار شبکه عصبی چند لایه [۴۳]
Figure 8. Multilayer neural network structure [43]

۳-۵- تبادل لیست سیاه با بلاک چین

در روش پیشنهادی هر گره مه با یادگیری ماشین و هوش گروهی، ترافیک حمله را تشخیص داده و آدرس این ترافیک‌ها را در یک لیست سیاه قرار داده و با سایر گره‌های مه به اشتراک می‌گذارد. بلاک چین را می‌توان به عنوان یک شبکه هم‌تا به هم‌تای توزیع شده از بلوک‌ها تعریف کرد. هر بلوک با استفاده از هش رمزنگاری به بلوک قبلی پیوند داده می‌شود. فناوری بلاک چین در زمینه‌های مختلفی مانند مراقبت‌های بهداشتی، آموزشی، انرژی و غیره به کار گرفته شده است. سه نوع دفتر کل بلاک چین وجود دارد که در حال حاضر مورد استفاده قرار می‌گیرند و عبارتند از عمومی، کنسرسیوم و خصوصی است. بلاک چین‌های عمومی (مانند اتریوم) برای هر کسی که به اینترنت دسترسی دارد در دسترس است و هر کسی می‌تواند بلاک چین را بخواند و دفتر کل بلاک چین را حفظ کند، یعنی مکانیزم عضویت در آن وجود ندارد. بلاک چین‌های کنسرسیوم (مانند Hyperledger Fabric) توسط یک نهاد تاسیس شده نگهداری می‌شود که به دیگران دسترسی می‌دهد و یک کنسرسیوم از پیش تعریف شده از هم‌تایان دارد که زنجیره را حفظ می‌کنند. بلاک چین‌های خصوصی توسط یک نهاد نگهداری می‌شوند که دسترسی به دیگران را فراهم می‌کند و هیچ فرآیند توافقی وجود ندارد. ابتدایی‌ترین تعریف بلاک چین این است که زنجیره‌ای از بلوک است که هر بلوک به کمک یک رابطه ریاضی به بلوک قبل از خود متصل می‌شود [۴۴]. بلوک به خودی خود محفظه‌ای از داده است. شکل ۹، ساختار تولید زنجیره بلوک را نشان می‌دهد. فرض اصلی زیربنای بلاک چین این است که هر بلوک حاوی یک هش

خودشناس منحصر به فرد است که یکپارچگی زنجیره را تضمین می کند. هش^۱ نمایه بلوک، داده‌ها (در اینجا لیست سیاه شامل IP گره‌های حمله کننده)، مهر زمانی و البته هش هش بلوک قبلی، این هش خودشناس را تشکیل می‌دهد. همچنین حاوی رکوردی از تراکنش‌ها به نام دفتر کل است که در زمان تولید بلاک چین انجام شده است. همانطور که هر بلوک به بلوک قبل از خود ارجاع می‌دهد، سابقه ای از تمام تراکنش‌هایی که قبل از تولید بلوک فعلی انجام شده است وجود دارد [۴۵]. در روش پیشنهادی هر گره مه یک عضو قرارداد بلاک چین است و لیست سیاه خود را به عنوان داده‌ها در یک بلاک قرار داده و آن را برای همه گره‌های مه ارسال می‌کند. گره‌های مه اگر هویت ارسال کننده را تایید کنند آنگاه اطلاعات لیست سیاه گره مه را با اطلاعات لیست سیاه خود ترکیب و تلفیق می‌کند.



شکل ۹: ساختار بلاک چین [۴۵]

Figure 9. Blockchain structure [45]

گره‌های که در بازه‌های زمانی مشخص می‌توانند لیست سیاه خود را با هم مبادله کنند یا می‌توان یک رویکرد مبتنی بر آستانه در نظر گرفت و به عنوان مثال اگر هر لیست سیاه ۵٪ دچار تغییر شود آنگاه گره مه می‌تواند درخواست اشتراک گذاری لیست سیاه را با بلاک چین نماید. در روش پیشنهادی از رویکرد اول استفاده شده است و گره‌ها بعد ۱۰ دقیقه لیست سیاه خود را مبادله می‌کنند. کاهش زمان مورد نظر باعث افزایش سربار ارسال و دریافت پیامها در لایه مه می‌شود. گره‌های مه برای انتقال و اشتراک گذاری لیست سیاه خود در بلاک چین از فرآیند و مراحل ذیل استفاده می‌کنند:

- در ابتدا گره مه لیست سیاه خود را در قسمت داده یک بلاک قرار می‌دهد.
- گره مورد نظر بلاک را برای سایر گره‌های مه ارسال می‌کند.
- گره‌های مه، اعتبار گره ارسال کننده را بررسی می‌کنند و اگر همه روی اعتبار گره مه اجماع داشتند آنگاه لیست سیاه را به زنجیره بلاک چین اضافه می‌کنند.
- یک نسخه از زنجیره بلاک چین برای همه گره‌ها ارسال می‌شود که شامل لیست سیاه اشتراکی است.

۴- نتایج تجربی

در این بخش سیستم تشخیص نفوذ پیشنهادی برای تشخیص حملات DDoS پیاده‌سازی و مورد تحلیل قرار گرفته می‌شود. در اینجا، از نرم‌افزار متلب برای پیاده‌سازی هوش گروهبی و شبکه عصبی مصنوعی استفاده می‌شود.

¹ Hash

۴-۱- پارامترهای پیاده سازی

اندازه جمعیت بردارهای ویژگی یا جمعیت الگوریتم کوآتی برابر ۲۰ و تعداد تکرار آن برابر ۵۰ است و هر آزمایش ۳۰ مرتبه تکرار و میانگین خروجی آنها محاسبه می‌شود. محدوده نرمالسازی در این مقاله بازه ۰ و ۱ است و از طرفی هم مقدار ضرایب Alpha و Beta در تابع هدف تصادفی و بین صفر و یک انتخاب می‌شود. سایر پارامترهای الگوریتم بهینه‌سازی کوآتی مانند مقادیر [۲۳]، تعیین می‌شود. شبکه عصبی مصنوعی نیز دارای دو لایه و در هر لایه به تعداد ویژگی‌های اولیه مجموعه داده NSL-KDD نورون مصنوعی در نظر گرفته می‌شود.

۴-۲- مجموعه داده

مجموعه داده NSL-KDD در این پژوهش برای پیاده‌سازی و ارزیابی روش پیشنهادی استفاده می‌شود. این مجموعه داده تعدادی زیادی حمله و از جمله حمله DDoS را پوشش می‌دهد. مجموعه داده NSL-KDD یک نسخه تصفیه شده از KDD'99 قبلی خود است، یک معیار شناخته شده در تحقیق در مورد تکنیک‌های تشخیص نفوذ است. این مجموعه داده برچسب‌گذاری شده به فایل‌های آموزشی و آزمایشی تقسیم می‌شود و می‌توان آن را از پایگاه داده آنلاین [۴۵] دانلود کرد. علاوه بر ترافیک عادی، ۲۳ نوع حمله مستند شده (به عنوان مثال، نپتون، ipsweep، portsweep) وجود دارد که به چهار دسته اصلی انکار سرویس، کاوشگر، کاربر به ریشه و از راه دور به کاربر طبقه‌بندی می‌شوند. مقوله DDoS به حملاتی اشاره دارد که منابع موجود سرور را مصرف می‌کنند و سیستم مورد حمله را برای انجام درخواست‌های کاربر قانونی مشکل می‌سازد. یک حمله کاوشگر معمولاً قبل از حمله دسترسی انجام می‌شود و شامل جمع‌آوری اطلاعات در مورد قربانی، معمولاً با اسکن آدرس‌های IP و پورت‌ها است. حمله کاربر به ریشه تلاش می‌کند تا در سیستمی که مهاجم قبلاً دسترسی کاربر را دارد، دسترسی ریشه غیرمجاز به دست آورد. در یک مورد از راه دور به کاربر، یک اتصال غیرمجاز از یک سیستم راه دور تحت کنترل مهاجم برای به دست آوردن دسترسی محلی انجام می‌شود. برای هر رکورد ترافیک شبکه، ۴۱ نوع ویژگی وجود دارد که به عنوان انواع حمله یا عادی طبقه‌بندی می‌شوند. ۹ عدد از آنها مقادیر گسسته و ۳۲ مقدار باقی مانده پیوسته هستند. داده‌های گسسته از مقادیری استفاده می‌کنند که فقط می‌توانند مقادیر خاصی داشته باشند و قابل تقسیم نیستند. داده‌های پیوسته از مقادیری استفاده می‌کنند که می‌توانند هر مقدار عددی را به خود بگیرند و می‌توانند به بخش‌های کوچکتر تقسیم شوند. این ویژگی‌ها را می‌توان به چهار دسته پایه، محتوا، ترافیک مرتبط با زمان و ترافیک مبتنی بر میزبان طبقه‌بندی کرد [۴۵].

۴-۳- متریک‌های ارزیابی

برای ارزیابی سیستم تشخیص نفوذ پیشنهادی از شاخص‌های ارزیابی مانند دقت ۱، حساسیت ۲ و صحت ۳ مطابق معادله ۱۴، ۱۵، ۱۶ فرموله شده است.

$$Accuracy = ACC = \frac{TP + TN}{TP + TN + FP + FN} \times 100\% \quad (14)$$

$$Sensitivity = Recall = DR = \frac{TP}{TP + FN} \times 100\% \quad (15)$$

$$Precision = P = \frac{TP}{TP + FP} \times 100\% \quad (16)$$

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

- نمونه‌های صحیح مثبت (TP): ترافیک وارد شده به لایه مه از نوع DDoS است و سیستم تشخیص نفوذ پیشنهادی آن را در دسته حملات DDoS قرار داده است.
- نمونه‌های غلط مثبت (FP): ترافیک وارد شده به لایه مه از نوع DDoS نبوده و سیستم تشخیص نفوذ پیشنهادی آن را در دسته حملات DDoS قرار داده است.

¹ Accuracy
² Sensitivity
³ Precision

- نمونه‌های صحیح منفی (TN): ترافیک وارد شده به لایه مه از نوع DDoS نبوده و سیستم تشخیص نفوذ پیشنهادی آن را در دسته حملات DDoS قرار نداده است.
- نمونه‌های غلط منفی (FN): ترافیک وارد شده به لایه مه از نوع DDoS است و سیستم تشخیص نفوذ پیشنهادی آن را در دسته حملات DDoS قرار نداده است.

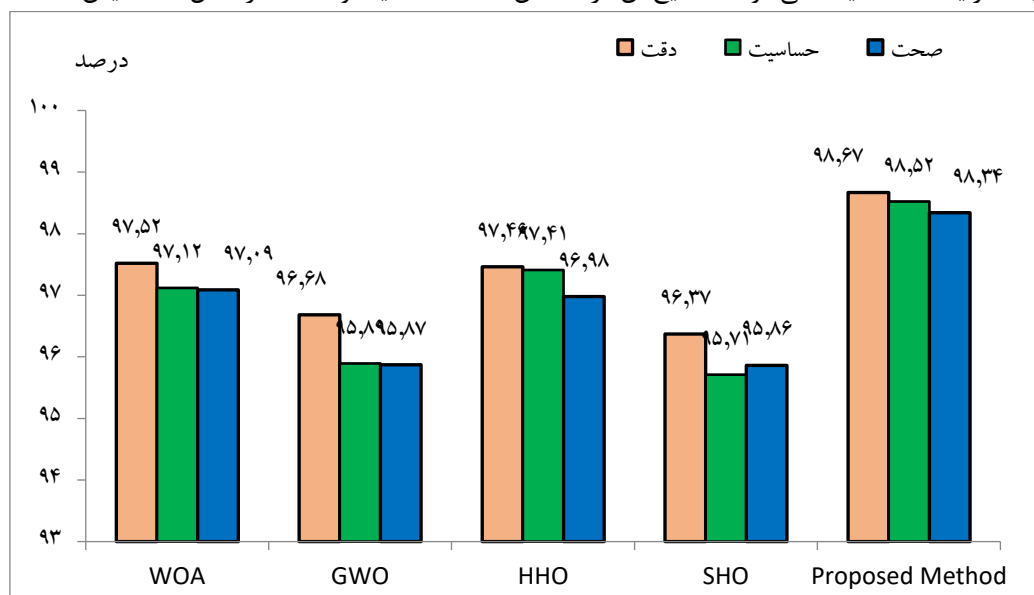
۴-۳-ارزیابی روش پیشنهادی

برای ارزیابی سیستم تشخیص نفوذ پیشنهادی سه حالت در نظر گرفته شده است. در حالت اول فقط از شبکه عصبی MLP در لایه مه استفاده می‌شود و در حالت دوم از شبکه عصبی MLP و الگوریتم انتخاب ویژگی COA استفاده می‌شود. در حالت سوم از الگوریتم یادگیری عمیق GAN در ترکیب با شبکه عصبی، هوش گروهی COA استفاده شده است. شاخص دقت، حساسیت و صحت روش پیشنهادی با روشهای مورد نظر در جدول ۲، ارایه شده است.

جدول ۲: شاخص دقت، حساسیت و صحت در تشخیص حملات به شبکه
Table 2. Index of accuracy, sensitivity and accuracy in detecting network attacks

حالت	دقت	حساسیت	صحت
MLP	۸۹/۶۵	۸۸/۳۴	۸۷/۶۴
COA+MLP	۹۲/۶۳	۹۱/۵۸	۹۱/۸۲
GAN+COA+MLP(GCM) or Proposed Method	۹۸/۶۷	۹۸/۵۲	۹۸/۳۴

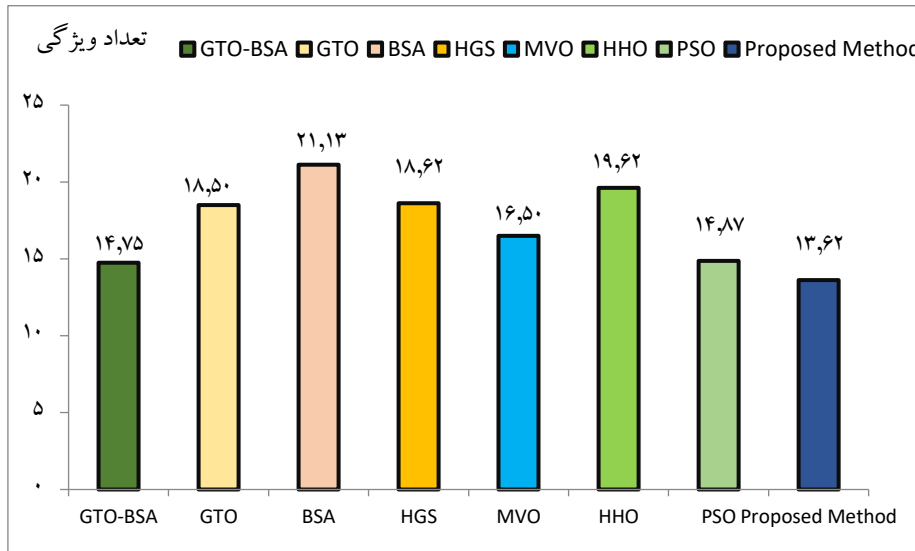
آزمایشات انجام شده نشان می‌دهد بدون متعادلسازی مجموعه داده و بدون انتخاب ویژگی، دقت، حساسیت و صحت روش پیشنهادی برای تشخیص نفوذ به ترتیب برابر ۸۹/۶۵٪، ۸۸/۳۴٪ و ۸۷/۶۴٪ است. اگر از ترکیب الگوریتم بهینه‌سازی کوآتی و شبکه عصبی مصنوعی بدون متعادلسازی مجموعه داده استفاده شود آنگاه دقت، حساسیت و صحت روش پیشنهادی برای تشخیص نفوذ به ترتیب برابر ۹۲/۶۳٪، ۹۱/۵۸٪ و ۹۱/۸۲٪ می‌شود. در صورتی که از متعادلسازی مجموعه داده با یادگیری عمیق شبکه GAN استفاده شود و انتخاب ویژگی نیز با الگوریتم بهینه‌سازی کوآتی در کنار شبکه عصبی مصنوعی چند لایه در لایه مه انجام شود آنگاه دقت، حساسیت و صحت روش پیشنهادی به ترتیب برابر ۹۸/۶۷٪، ۹۸/۵۲٪ و ۹۸/۳۴٪ است. یک فاز مهم روش پیشنهادی انتخاب ویژگی با روشهای هوش گروهی است و در اینجا روش پیشنهادی در تشخیص نفوذ با الگوریتم بهینه‌سازی وال یا WOA، الگوریتم گرگ بهینه‌سازی خاکستری یا GWO، الگوریتم بهینه‌سازی شاهین یا HHO و الگوریتم بهینه‌سازی کفتار یا SHO مقایسه می‌شود که نتایج آن در شاخص دقت، حساسیت و صحت در شکل ۱۰، نمایش داده شده است.



شکل ۱۰: مقایسه دقت، حساسیت و صحت تشخیص حملات با روشهای هوش گروهی

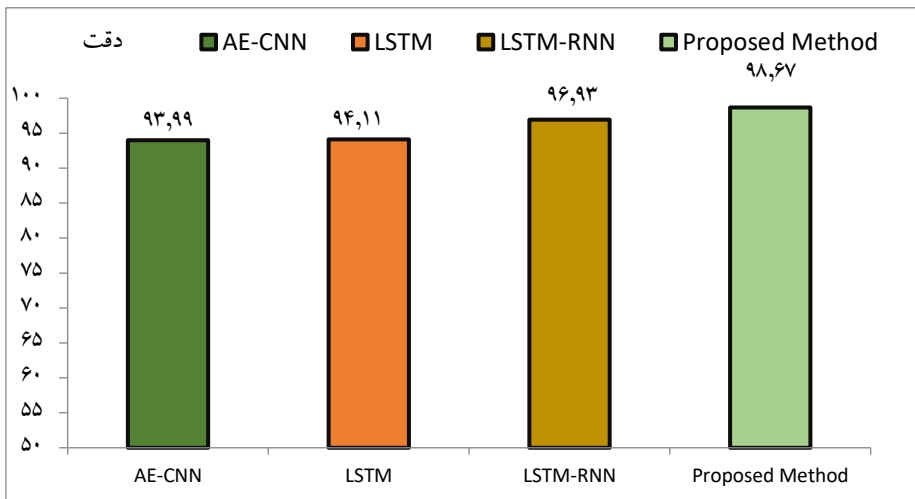
Figure 10. Comparing the accuracy, sensitivity and accuracy of attack detection with group intelligence methods

آزمایشات و مقایسه‌های انجام شده در متلب نشان می‌دهد روش پیشنهادی حداقل از الگوریتم بهینه‌سازی وال یا WOA، الگوریتم گرگ بهینه‌سازی خاکستری یا GWO، الگوریتم بهینه‌سازی شاهین یا HHO و الگوریتم بهینه‌سازی کفتار یا SHO دارای دقت، حساسیت و صحت بیشتری در تشخیص نفوذ است. دلیل دقت بیشتر روش پیشنهادی نسبت به الگوریتم‌های فراابتکاری مشابه آن است که روش پیشنهادی بین جستجوی بهره‌برداری و بهره‌وری نوعی تعادل برقرار کرده و فضای ویژگی را بهتر برای یافتن ویژگی‌های بهینه مورد جستجو قرار می‌دهد. روش پیشنهادی را می‌توان در تعداد ویژگی انتخاب شده با الگوریتم‌های مشابه نیز مقایسه نمود و در اینجا نتایج آزمایشات با مطالعه [۴۶] مقایسه و در شکل ۱۱، نمایش داده می‌شود.



شکل ۱۱: مقایسه و متوسط تعداد ویژگی انتخاب شده از ترافیک شبکه
Figure 11. Comparison and average number of features selected from network traffic

تعداد ویژگی‌های انتخاب شده برای تشخیص حملات در روشهای GTO-BSA، GTO، BSA، HGS، MVO، HHO، PSO به ترتیب برابر ۱۴/۷۵، ۱۸/۵۰، ۲۱/۱۳، ۱۸/۶۲، ۱۶/۵۰، ۱۹/۶۲، ۱۴/۸۷ است و این در حالی است که تعداد متوسط تعداد ویژگی در آزمایشات در روش پیشنهادی برابر ۱۳/۶۲ است که نسبت به ۴۱ ویژگی در حدود ۶۶/۷۸٪ فضای ویژگی را کاهش ابعاد داده است. روش پیشنهادی در شاخص دقت برای تشخیص حملات با مطالعه [۴۷]، مطابق شکل ۱۲، مقایسه شده است.



شکل ۱۲: مقایسه شاخص دقت روش پیشنهادی با چند روش یادگیری عمیق
Figure 12. Comparing the accuracy index of the proposed method with several deep learning methods

ارزیابی‌ها نشان می‌دهد دقت روش پیشنهادی از روشهای AE-CNN، LSTM، LSTM-RNN بیشتر است. دقت، روشهای یادگیری عمیق AE-CNN، LSTM، LSTM-RNN برای تشخیص حملات به ترتیب برابر ۹۳/۹۳٪، ۹۴/۱۱٪، ۹۶/۹۳٪ است و از دقت روش پیشنهادی مقادیر کمتری نشان می‌دهد. دقت روش پیشنهادی در تشخیص حملات از روشهای یادگیری عمیق بیشتر است که دلیل آن متعادلسازی مجموعه داده و انتخاب ویژگی هوشمندانه است. روش پیشنهادی به دلیل استفاده از بلاک چین، توانایی بالایی در احراز هویت دارد و پیامهای رد و بدل شده لیست سیاه آن نیز دارای امنیت بالایی است.

۵- نتیجه گیری

در سال‌های اخیر، اینترنت اشیا به عنوان یکی از خلاقانه‌ترین فناوری‌ها در محاسبات ارزیابی شده است، زیرا پتانسیل تغییر هر حوزه از زندگی انسان را دارد. با توجه به گزارشات تا سال ۲۰۲۰ تا ۲۰۲۵، پیش بینی می‌شود که تعداد دستگاه‌های هوشمند متصل به اینترنت به ۵۰ میلیارد و ۷۵ میلیارد برسد و آن را به یکی از سریع‌ترین‌ها تبدیل کند. زمینه‌هایی در تاریخ محاسبات هدف اینترنت اشیا اتصال دستگاه‌ها و برقراری ارتباط ماشین به ماشین است، در نتیجه به دستگاه‌ها اجازه می‌دهد تا اطلاعات را بدون دخالت انسان مبادله کنند. اینترنت اشیا طیف وسیعی از کاربردها مانند خانه‌های هوشمند، شهرهای هوشمند، اندازه‌گیری هوشمند، کشاورزی، شبکه‌های هوشمند، مراقبت‌های بهداشتی هوشمند و غیره را پوشش می‌دهد. با توجه به پیشرفت‌های روزافزون در فناوری اطلاعات و ارتباطات و مسائل مربوط به امنیت سایبری جهانی، نگرانی‌های امنیتی و حفظ حریم خصوصی به طور کلی به عنوان یک چالش اصلی استقرار اینترنت اشیا شناخته شده است. استقرار گسترده دستگاه‌های اینترنت اشیا در یک محیط باز، شبکه‌ها را در معرض حملات سایبری و تهدیدات امنیتی مختلف قرار داده است. حملات سایبری متعددی مانند پخش مجدد، کرم چاله، انکار سرویس، کانال جانبی و غیره، همچنان یک تهدید برای اینترنت اشیا هستند. از این رو، توسعه یک معیار امنیتی موثر که بتواند به طور مداوم و فوری حملاتی مانند حملات DoS در شبکه‌های IoT را یاد بگیرد و شناسایی کند، مهم است. سیستم‌های تشخیص نفوذ مبتنی بر امضا و مبتنی بر ناهنجاری به عنوان راه‌حل‌های امنیتی برای کاهش حملات و نفوذ به شبکه اینترنت اشیا عمل می‌کنند. در این پژوهش یک سیستم تشخیص نفوذ کارآمد در لایه مه ارایه شده است و سیستم تشخیص نفوذ به صورت توزیع شده مستقر است و از این جهت حجم زیادی از ترافیک شبکه در زمان کم ارزیابی و تحلیل می‌شود. در روش پیشنهادی هر گره مه نقش یک سیستم تشخیص نفوذ را بر عهده دارد و از طرفی در لایه مه با یادگیری عمیق GAN ترافیک شبکه متعادل و با الگوریتم فراابتکاری COA که سال ۲۰۲۳ ارایه شده است ویژگی‌های مهم ترافیک شبکه در گره‌های مه تشخیص داده می‌شود. در روش پیشنهادی گره‌های مه با استفاده از بلاک چین لیست سیاه خود را با هم به اشتراک می‌گذارند تا محرمانگی سیستم تشخیص نفوذ توزیع شده افزایش یابد. آزمایشات در مجموعه داده NSL-KDD نشان داد روش پیشنهادی در تشخیص حملات از روشهای انتخاب ویژگی نظیر WOA، GWO، SHO و HHO دقت بیشتری دارد و از طرفی نسبت به روشهای یادگیری نظیر LSTM و CNN توانایی و دقت بیشتری در تشخیص حملات دارد. مزیت روش پیشنهادی در انتخاب ویژگی‌های دقیق و کاهش ابعاد بیشتر ترافیک شبکه نسبت به روشهای فراابتکاری مشابه است از طرفی دقت بیشتر نسبت به چند روش یادگیری عمیق مزیت اصلی روش پیشنهادی است. حفظ محرمانگی و ارسال ایمن پیامها و لیست سیاه بین گره‌های مه با بلاک چین از مزایای دیگر روش پیشنهادی است. در پژوهش آتی از شبکه عصبی ترکیبی CNN و LSTM به ترتیب برای استخراج ویژگی و طبقه‌بندی ترافیک شبکه استفاده می‌شود و از طرفی یک سیستم تشخیص نفوذ دو سطحی در لایه مه و ابر ارایه می‌شود. در این مطالعه پارامترهای شبکه عصبی مصنوعی با آزمون و خطا تعیین شد اما با بهینه‌سازی آنها می‌توان عملکرد این شبکه را بهبود داد. یکی دیگر از پژوهش‌های آتی ما بهینه‌سازی پارامترهای شبکه LSTM با روشهای فراابتکاری جدید است تا پارامترهای انتخاب شود که شبکه LSTM دارای خطای کمتری در تشخیص حملات شود. در پژوهش آتی همچنین زمانبندی وظایف در لایه مه و ابر برای تشخیص حملات نیز پیشنهادی می‌شود. یک رویکرد زمان‌بندی گردش کار موثر ابری در زمان تشخیص نفوذ با روشهای نظیر الگوریتم ذرات و زمان‌بندی کار برای محاسبات چند ابری با توجه به محدودیت‌های امنیتی و قابلیت اطمینان برای کاربردهای تشخیص نفوذ می‌تواند از پیشنهادات آتی ما باشد.

مراجع

- [1] Z. Shah, I. Ullah, H. Li, A. Levula and K. Khurshid, "Blockchain based solutions to mitigate distributed denial of service (DDoS) attacks in the Internet of Things (IoT): A survey," *Sensors*, vol. 22, no. 3, 2022, doi: 10.3390/s22031094.
- [2] B. Kaur, S. Dadkhah, F. Shoeleh, E. C. P. Neto, P. Xiong, S. Iqbal and A. A. Ghorbani, "Internet of things (IoT) security dataset evolution: Challenges and future directions," *Internet of Things*, vol. 22, p. 100780, 2023, doi: 10.1016/j.iot.2023.100780.
- [3] N. Elsayed, Z. ElSayed and M. Bayoumi, "IoT Botnet Detection Using an Economic Deep Learning Model," *arXiv preprint arXiv:2302.02013*, *IEEE World AI IoT Congress (AIoT)*, 2023, doi: 10.48550/arXiv.2302.02013.
- [4] P. Pan, X. Ma, Y. Fu and F. Chen, "Automating Group Management of Large-Scale IoT Botnets for Antitracking. Security and Communication Networks," *Security and Communication Networks*, vol. 2022, Article ID: 4196945, doi: 10.1155/2022/4196945.
- [5] P. Kumari and A. K. Jain, "A comprehensive study of DDoS attacks over IoT network and their countermeasures," *Computers & Security*, vol. 127, p. 103096, 2023, doi: 10.1016/j.cose.2023.103096.
- [6] S. A. Khanday, H. Fatima and N. Rakesh, "Implementation of intrusion detection model for DDoS attacks in Lightweight IoT Networks," *Expert Systems with Applications*, vol. 215, p. 119330, 2023, doi: 10.3390/app13179937.
- [7] F. T. Zahra, Y. S. Bostanci and M. Soy Turk, "Real-Time Jamming Detection in Wireless IoT Networks," in *IEEE Access*, vol. 11, pp. 70425-70442, 2023, doi: 10.1109/ACCESS.2023.3293404.
- [8] S. Kumar, A. Guerrero and C. Navarro, "Cyber Security Flood Attacks and Risk Assessment for Internet of Things (IoT) Distributed Systems," *IEEE World AI IoT Congress (AIoT)*, Seattle, WA, USA, 2023, pp. 0392-0397, doi: 10.1109/AIIoT58121.2023.10174553.
- [9] M. Mahmood and Q. Shafi, "A Smart IDS in IoT System to Detect Zero-Day Intrusions Using Automated Signature Update," *Research Square*, 2023, doi: 10.21203/rs.3.rs-3014508/v1.
- [10] M. Douiba, S. Benkirane, A. Guezzaz and M. Azrou, "An improved anomaly detection model for IoT security using decision tree and gradient boosting," *The Journal of Supercomputing*, vol. 79, no. 3, pp. 3392-3411, 2023, doi: 10.1007/s11227-022-04783-y.
- [11] A. Belhadi, Y. Djenouri, D. Djenouri, G. Srivastava and J. C. W. Lin, "Group intrusion detection in the Internet of Things using a hybrid recurrent neural network," *Cluster Computing*, vol. 26, no. 2, pp. 1147-1158, 2023, doi: 10.1007/s10586-022-03779-w.
- [12] G. O. Anyanwu, C. I. Nwakanma, J. M. Lee and D. S. Kim, "RBF-SVM kernel-based model for detecting DDoS attacks in SDN integrated vehicular network," *Ad Hoc Networks*, vol. 140, p. 103026, 2023, doi: 10.1016/j.adhoc.2022.103026.
- [13] I. Priyadarshini, P. Mohanty, A. Alkhayyat, R. Sharma and S. Kumar, "SDN and application layer DDoS attacks detection in IoT devices by attention-based Bi-LSTM-CNN," *Transactions on Emerging Telecommunications Technologies*, p. e4758, 2023, doi: 10.1002/ett.4758.
- [14] S. S. S. Othman, C. F. M. Foozy and S. N. B. Mustafa, "Feature Selection of Distributed Denial of Service (DDoS) IoT Bot Attack Detection Using Machine Learning Techniques," *Journal of Soft Computing and Data Mining*, vol. 4, no. 1, pp. 63-71, 2023, doi: 10.30880/jscdm.2023.04.01.006.
- [15] R. Alkanhel, E. S. M. El-kenawy, A. A. Abdelhamid, A. Ibrahim, M. A. Alohali, M. Abotaleb and D. S. Khafaga, "Network Intrusion Detection Based on Feature Selection and Hybrid Metaheuristic Optimization," *Computers, Materials & Continua*, vol. 74, no. 2, pp. 2677-2693, 2023, doi: 10.32604/cmc.2023.033273.

- [16] B. Bencsik, I. Reményi, M. Szemenyei and J. Botzheim, "Designing an embedded feature selection algorithm for a drowsiness detector model based on electroencephalogram data," *Sensors*, vol. 23, no. 4, 2023, doi: 10.3390/s23041874.
- [17] M. Shafiq, Z. Tian, A. K. Bashir, X. Du and M. Guizani, "IoT malicious traffic identification using wrapper-based feature selection mechanisms," *Computers & Security*, vol. 94, p. 101863, 2020, doi: 10.1016/j.cose.2020.101863.
- [18] R. Yadav, I. Sreedevi and D. Gupta, "Augmentation in performance and security of WSNs for IoT applications using feature selection and classification techniques," *Alexandria Engineering Journal*, vol. 65, pp. 461-473, 2023, doi: 10.1016/j.aej.2022.10.033.
- [19] M. S. Aliabadi, and A. Jalalian, "Detection of attacks in the Internet of Things with the feature selection approach based on the whale optimization algorithm and learning by majority voting," *Research Square*, 2023, doi: 10.21203/rs.3.rs-2424464/v2.
- [20] R. Alkanhel, E. S. M. El-kenawy, A. A. Abdelhamid, A. Ibrahim, M. A. Alohali, M. Abotaleb and D. S. Khafaga, "Network Intrusion Detection Based on Feature Selection and Hybrid Metaheuristic Optimization," *Computers, Materials & Continua*, vol. 74, no. 2, pp. 2677-2693, 2023, doi: 10.32604/cmc.2023.033273.
- [21] I. Katib, and M. Ragab, "Blockchain-Assisted Hybrid Harris Hawks Optimization Based Deep DDoS Attack Detection in the IoT Environment," *Mathematics*, vol. 11, no. 8, pp. 1-16, 2023, doi: 10.3390/math11081887.
- [22] T. K. Boppana and P. Bagade, "GAN-AE: An unsupervised intrusion detection system for MQTT networks," *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, vol. 119, 2023, doi: 10.1016/j.engappai.2022.105805.
- [23] M. Dehghani, Z. Montazeri, E. Trojovská and P. Trojovský, "Coati Optimization Algorithm: A new bio-inspired metaheuristic algorithm for solving optimization problems," *Knowledge-Based Systems*, vol. 259, p. 110011, 2023, doi: 10.1016/j.knosys.2022.110011.
- [24] M. R. Alam, S. I. Khan, S. B. Z. Chowa, A. H. Chowdhury, S. R. Kabir and M. J. Sadeq, "Use of Blockchain to Prevent Distributed Denial-of-Service (DDoS) Attack: A Systematic Literature Review," *Advances in Distributed Computing and Machine Learning*, vol. 660, pp. 39-47, 2023, doi: 10.1007/978-981-99-1203-2_4.
- [25] Y. Zhang, Y. Liu, X. Guo, Z. Liu, X. Zhang and K. Liang, "A BiLSTM-Based DDoS Attack Detection Method for Edge Computing," *Energies*, vol. 15, no. 21, 2022, doi: 10.3390/en15217882.
- [26] S. H. Lee, Y. L. Shiue, C. H. Cheng, Y. H. Li and Y. F. Huang, "Detection and Prevention of DDoS Attacks on the IoT," *Applied Sciences*, vol. 12, no. 23, 2022, doi: 10.3390/app122312407.
- [27] S. Alosaimi and S. M. Almutairi, "An Intrusion Detection System Using BoT-IoT," *Applied Sciences*, vol. 13, no. 9, 2023, doi: 10.3390/app13095427.
- [28] Z. Ahmad, A. Shahid Khan, C. Wai Shiang, J. Abdullah and F. Ahmad, "Network intrusion detection system: A systematic study of machine learning and deep learning approaches," *Transactions on Emerging Telecommunications Technologies*, vol. 32, no. 1, p. e4150, 2021, doi: 10.1002/ett.4150.
- [29] H. A. Hassan, E. E. Hemdan, W. El-Shafai, M. Shokair and F. E. A. El-Samie, "Intrusion Detection Systems for the Internet of Thing: A Survey Study," *Wireless Personal Communications*, vol. 128, no. 4, pp. 2753-2778, doi: 10.1007/s11277-022-10069-6.
- [30] R. Malik, Y. Singh, Z. A. Sheikh, P. Anand, P. K. Singh and T. C. Workneh, "An improved deep belief network ids on iot-based network for traffic systems," *Journal of Advanced Transportation*, vol. 2022, Article ID: 7892130, 2022, doi: 10.1155/2022/7892130.
- [31] I. Ortega-Fernandez, M. Sestelo, J. C. Burguillo and C. Pinon-Blanco, "Network intrusion detection system

- for DDoS attacks in ICS using deep autoencoders," *Wireless Networks*, pp. 1-17, 2023, doi: 10.1007/s11276-022-03214-3.
- [32] S. A. Khanday, H. Fatima and N. Rakesh, "Implementation of intrusion detection model for DDoS attacks in Lightweight IoT Networks," *Expert Systems with Applications*, vol. 215, Article ID: 119330, 2023, doi: 10.3390/app13179937.
- [33] A. S. A. Issa and Z. Albayrak, "Ddos attack intrusion detection system based on hybridization of cnn and lstm. Acta Polytechnica Hungarica," *Acta Polytechnica Hungarica*, vol. 20, no. 3, pp. 1-19, 2023, doi: 10.12700/APH.20.3.2023.3.6.
- [34] A. Maryposonia, "An Efficient Network Intrusion Detection System for Distributed Networks using Machine Learning Technique," in *IEEE International Conference on Trends in Electronics and Informatics (ICOEI)*, 2023, pp. 1258-1263, doi: 10.1109/ICOEI56765.2023.10126055.
- [35] G. O. Anyanwu, C. I. Nwakanma, J. M. Lee and D. S. Kim, "RBF-SVM kernel-based model for detecting DDoS attacks in SDN integrated vehicular network," *Ad Hoc Networks*, vol. 140, p. 103026, 2023, doi: 10.1016/j.adhoc.2022.103026.
- [36] P. Aravamudhan, "A novel adaptive network intrusion detection system for internet of things," *Plos one*, vol. 18, no. 4, p. e0283725, 2023, doi: 10.1371/journal.pone.0283725.
- [37] A. Almazyad, L. Halman and A. Alsaeed, "Probe Attack Detection Using an Improved Intrusion Detection System," *Computers, Materials & Continua*, vol. 74, no. 3, pp. 4769-4784, 2023, doi: 10.32604/cmc.2023.033382.
- [38] G. Nagarajan and P. J. Sajith, "Optimization of BPN parameters using PSO for intrusion detection in cloud environment," *Soft Computing*, pp. 1-12, doi: 10.1007/s00500-023-08737-1.
- [39] A. Thangasamy, B. Sundan and L. Govindaraj, "A Novel Framework for DDoS Attacks Detection Using Hybrid LSTM Techniques," *Computer Systems Science & Engineering*, vol. 45, no. 3, pp. 1-15, doi: 10.32604/csse.2023.032078.
- [40] Z. Majidian, S. TaghipourEivazi, B. Arasteh and S. Babai, "An intrusion detection method to detect denial of service attacks using error-correcting output codes and adaptive neuro-fuzzy inference," *Computers and Electrical Engineering*, vol. 106, p. 108600, 2023, doi: 10.1016/j.compeleceng.2023.108600.
- [41] P. Radoglou Grammatikis, P. Sarigiannidis, G. Efstathopoulos and E. Panaousis, "ARIES: A novel multivariate intrusion detection system for smart grid," *Sensors*, vol. 20, no. 18, pp. 1-20, 2020, doi: 10.3390/s20185305.
- [42] W. Xu, J. Jang-Jaccard, T. Liu, F. Sabrina and J. Kwak, "Improved Bidirectional GAN-Based Approach for Network Intrusion Detection Using One-Class Classifier," *Computers*, vol. 11, no. 6, May 2022, doi: 10.3390/computers11060085.
- [43] S. Alzughairi and S. El Khediri, "A Cloud Intrusion Detection Systems Based on DNN Using Backpropagation and PSO on the CSE-CIC-IDS2018 Dataset," *Applied Sciences*, vol. 13, no. 4, Feb. 2023, doi: 10.3390/app13042276.
- [44] R. K. Gupta, V. Chawla, R. K. Pateriya, P. K. Shukla, S. Mahfoudh, and S. B. H. Shah, "Improving collaborative intrusion detection system using blockchain and pluggable authentication modules for sustainable Smart City," *Sustainability*, vol. 15, no. 3, 2023, doi: 10.3390/su15032133.
- [45] "NSL-KDD Dataset", Available online: <https://www.unb.ca/cic/datasets/nsl.html>, accessed on 27 December 2022.
- [46] S. S. Kareem, R. R. Mostafa, F. A. Hashim and H. M. El-Bakry, "An effective feature selection model using hybrid metaheuristic algorithms for iot intrusion detection," *Sensors*, vol. 22, no. 4, pp. 1-22, Feb. 2022, 1396, doi: 10.3390/s22041396.

- [47] R. Yao, N. Wang, Z. Liu, , P. Chen, and X. Sheng, "Intrusion detection system in the advanced metering infrastructure: a cross-layer feature-fusion CNN-LSTM-based approach," *Sensors*, vol. 21, no. 2, 2021, doi: 10.3390/s21020626.
- [48] Y. Yin, J. Jang-Jaccard, W. Xu, A. Singh, J. Zhu, F. Sabrina and J. Kwak, "IGRF-RFE: a hybrid feature selection method for MLP-based network intrusion detection on UNSW-NB15 dataset," *Journal of Big Data*, vol. 10, no. 1, pp. 1-26, 2023, doi: 10.48550/arXiv.2203.16365.
- [49] M. Mohy-eddine, A. Guezzaz, S. Benkirane and M. Azrou, "An efficient network intrusion detection model for IoT security using K-NN classifier and feature selection," *Multimedia Tools and Applications*, vol. 82, no. 15, pp. 23615–23633 , 2023, doi: 10.1007/s11042-023-14795-2.
- [50] D. Kshirsagar and S. Kumar, "Towards an intrusion detection system for detecting web attacks based on an ensemble of filter feature selection techniques," *Cyber-Physical Systems*, vol. 9, no. 3, pp. 244-259, Jan. 2022, doi: 10.1080/23335777.2021.2023651.
- [51] Z. Sharifian, B. Barekatin, A. A. Quintana, Z. Beheshti and F. Safi-Esfahani, "Sin-Cos-bIAVOA: A new feature selection method based on improved African vulture optimization algorithm and a novel transfer function to DDoS attack detection," *Expert Systems with Applications*, vol. 228, p. 120404, October 2023, doi: 10.1016/j.eswa.2023.120404.
- [52] U. S. Chanu, K. J. Singh and Y. J. Chanu, "A dynamic feature selection technique to detect DDoS attack," *Journal of Information Security and Applications*, vol. 74, p. 103445, May 2023, doi: 10.1016/j.jisa.2023.103445.
- [53] Y. Sanjalawe, and T. Althobaiti, "DDoS Attack Detection in Cloud Computing Based on Ensemble Feature Selection and Deep Learning", *Computers, Materials & Continua*, vol. 75, no. 2, pp. 3571-3588, 31 March 2023, doi: 10.32604/cmc.2023.037386.
- [54] B. Uzun and S. Ballı, "A novel method for intrusion detection in computer networks by identifying multivariate outliers and ReliefF feature selection," *Neural Computing and Applications*, vol. 34, no. 20, pp. 17647-17662, June 2022, doi: 10.1007/s00521-022-07402-2.
- [55] N. Alsharif, "Ensembling PCA-based Feature Selection with Random Tree Classifier for Intrusion Detection on IoT Network," in *International Conference on Electrical Engineering, Computer Science and Informatics (EECSI)*, Semarang, Indonesia, 2021, pp. 317-321, doi: 10.23919/EECSI53397.2021.9624298.

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. 14/ No. 53/Autumn 2024

Research Article

Cooperative and Non-cooperative TDOA Based Source Localization with Copula Function Using Semidefinite Relaxation

Marjan Dadkhah Tehrani, MSc¹  | Hannan Lohrasbipeydeh, Assistant Professor^{2*} 

¹Department of Electrical Engineering, Shahed University, Tehran, Iran,
Marjan.dadkhah@shahed.ac.ir

²Department of Electrical Engineering, Shahed University, Tehran, Iran,
h.lohrasbi@shahed.ac.ir

Correspondence

Hannan Lohrasbipeydeh, Assistant Professor of Electrical Engineering, Shahed University, Tehran, Iran
Email: h.lohrasbi@shahed.ac.ir

Received: 8 June 2024

Revised: 21 June 2024

Accepted: 25 June 2024

Abstract

The time difference of arrival based approach to wireless localization is perhaps one of the most interesting research subjects over the past decade. A method using copula function is proposed for source localization using TDOA measurements for both noncooperative and cooperative scheme. The proposed method is started with noncooperative localization, and finally is extended to the cooperative localization problem. Because of unknown measurement noise covariance matrix, by using the theory of copulas with Sklar's theorem, the joint likelihood function of TDOA measurements is coupled to the corresponding univariate marginal likelihood functions. Then, an attractive alternative using method of inference functions for margings is applied to the maximum likelihood estimation. The procedure involving maximization of univariate marginal likelihood functions and then estimation of copula parameter. The maximization suffers from nonconvexity, so we apply semidefinite relaxation techniques to derive a convex estimator. Simulation results corroborate the performance of the proposed method as for sufficient signal to noise ratio, we observe one meter of improvement in source location accuracy.

Keywords: Time Difference of Arrival, Semidefinite Relaxation, Copula Functions, Source Localization, Correlated Noise.

Highlights

- A method using copula function is proposed for source localization using TDOA measurements for both noncooperative and cooperative scheme.
- The joint likelihood function is coupled to the corresponding univariate marginal likelihood functions with unknown measurement noise covariance matrix, by using the theory of copulas.
- An attractive alternative using method of inference functions for margings is applied to the maximum likelihood estimation.

Citation: M. Dadkhah Tehrani, and H. Lohrasbipeydeh, "Cooperative and Non-cooperative TDOA Based Source Localization with Copula Function Using Semidefinite Relaxation," *Journal of Southern Communication Engineering*, vol. 14, no. 53, pp. 91–105, 2024, doi:10.30495/jce.2023.1996352.1281, [in Persian].

مقاله پژوهشی

مکان‌یابی مشارکتی و غیرمشارکتی منبع مبتنی بر اختلاف زمان دریافت سیگنال با استفاده از تابع هم‌بند بر پایه رهاسازی نیمه‌معین

مرجان دادخواه تهرانی¹ | حنان لهراسبی پیده² * ID

چکیده:

یکی از جالب توجه‌ترین موضوعات تحقیقاتی دو دهه‌ی اخیر، مکان‌یابی بی‌سیم منبع با رویکرد مبتنی بر اختلاف زمان دریافت سیگنال (TDOA) می‌باشد. در این پژوهش روشی با بهره‌گیری از تابع هم‌بند برای مکان‌یابی منبع با استفاده از اندازه‌گیری‌های TDOA برای هر دو مدل مکان‌یابی غیرمشارکتی و مشارکتی در نظر گرفته شده است. در این روش ابتدا به حل مسئله‌ی مکان‌یابی در شرایط غیرمشارکتی پرداخته و سپس تکنیک‌های غیرمشارکتی را برای مسئله‌ی مکان‌یابی مشارکتی گسترش می‌دهیم. به دلیل نامعلوم بودن ماتریس کوواریانس نویز اندازه‌گیری، با به‌کارگیری تئوری توابع هم‌بند مبتنی بر قضیه‌ی اسکالر، تابع شبیه‌نمایی مشترک اندازه‌گیری‌های TDOA را به توابع شبیه‌نمایی حاشیه‌ای یک متغیره‌ی متناظر ارتباط می‌دهیم. سپس یک راه جایگزین برای تخمین شبیه‌نمایی بیشینه با استفاده از روش توابع منطقی برای حاشیه‌ها اعمال می‌نماییم. فرآیند این تخمین شامل بیشینه‌سازی توابع شبیه‌نمایی حاشیه‌ای یک متغیره و سپس تخمین پارامتر تابع هم‌بند است. از آن‌رو که این بیشینه‌سازی از مشکل نامحدب بودن رنج می‌برد، تکنیک‌های آزادسازی نیمه معین را اعمال نموده تا یک تخمین گر محدب حاصل گردد. نتایج شبیه‌سازی عملکرد روش پیشنهادی را تایید نموده به گونه‌ای که در سیگنال به نویز نسبتاً مناسب تا یک متر بهبود در خطای حاصل از مکان‌یابی حاصل گردیده است.

کلید واژه‌ها: اختلاف زمان دریافت، آزادسازی نیمه‌معین، توابع هم‌بند، مکان‌یابی منبع، نویز هم‌بسته.

¹ دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی برق، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه شاهد، تهران، ایران، marjan.dadkhan@shahed.ac.ir

² استادیار گروه مهندسی برق، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه شاهد، تهران، ایران، h.lohrasbi@shahed.ac.ir

نویسنده مسئول

^o حنان لهراسبی پیده، استادیار گروه مهندسی برق، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه شاهد، تهران، ایران، h.lohrasbi@shahed.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۹ خرداد ۱۴۰۳

تاریخ بازنگری: ۱ تیر ۱۴۰۳

تاریخ پذیرش: ۵ تیر ۱۴۰۳

<https://doi.org/10.30495/jce.2023.1996352.1281>

۱-مقدمه

امروزه مکان‌یابی منبع یکی از جالب توجه‌ترین موضوعات سال‌های اخیر بوده است. از حوزه‌های کاربرد مکان‌یابی می‌توان رادار، سونار، ناوبری، ارتباطات بی‌سیم و ارتباطات وسایل نقلیه را برشمرد. هم‌چنین این موضوع یک مسئله‌ی اساسی در شبکه‌های حسگر بی‌سیم است. در مکان‌یابی منبع، سیگنال دریافتی توسط حسگرها حامل اطلاعاتی مانند زمان دریافت¹ (TOA)، اختلاف زمان دریافت² (TDOA)، توان دریافت³ (RSS) و یا جهت دریافت⁴ (AOA) هستند [۲]-[۱]. روش‌های مختلف مکان‌یابی

¹ Time of Arrival² Time Difference of Arrival³ Received Signal Strength⁴ Angle of Arrival

می‌توانند از هریک از بسترهای ذکر شده برای دریافت اطلاعات استفاده نمایند. اساساً اندازه‌گیری‌های TOA، TDOA و RSS اطلاعات فاصله‌ی میان حسگرها و منبع را ارائه می‌کنند، درحالی‌که اندازه‌گیری‌های AOA شامل اطلاعاتی از زاویه و جهت منبع نسبت به حسگرها است. با این‌وجود یافتن مکان منبع کار ساده‌ای نیست، چراکه این اندازه‌گیری‌ها روابطی غیرخطی با منبع دارند. روش‌های مبتنی بر زمان از حیث دقت تخمین نسبت به روش‌های مبتنی بر انرژی از دقت بالاتری برخوردار هستند اما تا حدودی پیچیدگی محاسباتی بالاتری را نیز دارا هستند. یکی از معمول‌ترین بسترهای دریافت اطلاعات سیگنال، اندازه‌گیری‌های مبتنی بر اختلاف زمان دریافت سیگنال یعنی TDOA در تعدادی حسگر است [۳].

در مسائل مکان‌یابی بر پایه اختلاف زمان دریافت سیگنال، با فرض گاوسی بودن نویز اندازه‌گیری، می‌توان از روش بیشینه شبیه‌نمایی استفاده نمود. مسئله بیشینه شبیه‌نمایی ایجاد شده نسبت به پارامتر مجهول مسئله، غیرخطی و نامحدب است. الگوریتم‌های بسیاری برای حل این مسئله در شرایط ذکر شده در نظر گرفته شده است. مسئله فوق می‌تواند به کمک روش‌های تکرارپذیر مانند روش‌های مبتنی بر حداقل مربعات وزن‌دار مقید تکرارپذیر [۴] حل گردد که در آن تخمین نهایی جواب وابسته به انتخاب مناسب مقدار اولیه برای حل مسئله است. در ادامه برای حل مشکل مقداردهی اولیه در روش‌هایی تکرارپذیر، از تکنیک‌های فرم بسته استفاده گردید [۵]. نتایج حاصل از این فرم بسته با کمک روش مبتنی بر حداقل میانگین مربعات وزن‌دار دومرحله‌ای^۱ (TSWLS) در مرجع [۶] بهبود پیدا نمود. در مرجع [۷] روشی مبتنی بر نمایش قطبی ویرایش‌شده^۲ (MPR) در نظر گرفته شد که منجر به حل مسئله مکان‌یابی در شرایط فرم بسته گردید که نتایج حاصل از نمایش‌های قبل را تا حد قابل توجهی بهبود داد. مائو و سایر نویسندگان در مرجع [۸]، نتایج بدست‌آمده را با استفاده از درون‌یابی کروی وزن‌دار^۳ در شرایط حضور خطای حسگر با نویز گاوسی پایین بهبود بخشید.

توابع هدف بسیاری در قالب یک مسئله TDOA برای یافتن پاسخ مسئله مکان‌یابی طرح گردیده که یکی از معروف‌ترین آن‌ها حل مسئله بر پایه فرمول‌بندی مسئله مکان‌یابی مبتنی بر مفهوم بیشینه شبیه‌نمایی^۴ (ML) است. علت شهرت تخمین به روش ML، آن است که این تخمین‌گرها می‌توانند به حد پایین^۵ CRLB دست پیدا نموده و لذا بهینه باشند [۹]. البته باید توجه داشت که توابع هدف بدست آمده بر پایه بیشینه شبیه‌نمایی اغلب غیرمحدب هستند و لذا بسیاری از ابزارهای بهینه‌سازی محدب استاندارد قابل استفاده نیستند. برای غلبه بر مسئله غیرمحدب بودن، می‌توان از روش‌های مبتنی بر راه‌سازی محدب^۶ (SDR) مانند روش‌های برنامه‌ریزی نیمه معین^۷ (SDP) [۱۱]-[۱۰] یا روش‌های ترکیبی استفاده نمود [۱۲]. نویسندگان در مرجع [۱۳] به حل مسئله مکان‌یابی مورد بحث با اعمال روش تصویرکردن به فضای پوچ پرداخته تا نمایشی از فرم بسته حل مسئله در شرایطی سرعت انتشار مجهول پرداختند. این مسئله در [۱۴] با کاهش تعداد متغیرهای وابسته به کمک تصویرسازی توسعه پیدا نمود که منجر به حل مسئله مکان‌یابی به صورت زیر بهینه گردید. در [۱۵] مسئله مذکور با توجه به ویژگی‌های نمایش MPR مجدد فرمول‌بندی شده و دو الگوریتم مبتنی بر تصویرسازی زیرفضاها حاصل گردید که ابتدا به تخمین جهت منبع و سپس فاصله و مکان آن می‌پردازد. در مرجع [۱۶] به حل مسئله مکان‌یابی مبتنی بر انرژی دریافتی توسط حسگرها پرداخته شده که در آن نویز حاصل از چند مسیره‌گی توسط میانگین‌گیری مکانی ابتدا حذف گردیده و در نهایت به کمک فیلترسازی و با استفاده از تابع همبند از نوع t-student به تخمین مکان منبع در شرایط غیرمشارکتی پرداخته شده است.

در یک شبکه حسگر مکان حسگرها از قبل مشخص است. در این مقاله، این حسگرها را می‌توان گره‌های لنگر نیز نامگذاری نمود. یک مسئله مکان‌یابی می‌تواند با توجه به ارتباط بین حسگرها و منابع در حالت کلی به یکی از دو دسته مکان‌یابی مشارکتی و غیرمشارکتی تقسیم بندی گردد [۱۷]. در شرایط مکان‌یابی مشارکتی، گره‌های منبع قادر به مکالمه با یکدیگر و نیز گره‌های لنگر یا همان حسگرها هستند. بنابراین، در شرایط مشارکتی اندازه‌گیری‌های بین منابع و نیز بین منبع و حسگرها برای استفاده

¹ Two stages weighted least squares

² Modified polar representation

³ Weighted spherical interpolation

⁴ Maximum likelihood

⁵ Cramer-Rao lower bound

⁶ Semidefinite Relaxation

⁷ Semidefinite Programming

در شرایط تخمین مکان موجود هستند. بعلاوه، در مکان‌یابی مشارکتی، گره‌های لنگر می‌توانند مکان تمامی گره‌های منبع را به‌طور هم‌زمان تخمین بزنند [۱۸].

در این مقاله مسئله مکان‌یابی در حضور نویز گاوسی با میانگین صفر و ماتریس کوواریانس مجهول در نظر گرفته شده است. در اینجا برای حذف پارامتر مجهول از مسئله بیشینه‌شبه‌نمایی، از تئوری مرکزی توابع همبند (کاپولا)^۱ [۱۹] استفاده گردیده است. کاپولاها اساساً توابع پارامتریکی هستند که توابع توزیع حاشیه‌ای تک‌متغیره را به تابع توزیع چندمتغیره معادل آن پیوند می‌زنند [۲۰]. توابع مورد نظر نقش کلیدی را در حوزه‌های مختلف از جمله اقتصاد، مالی و صنایع دیگر بازی می‌کنند. در اینجا با استفاده از توابع همبند مناسب در تخمین مسئله بهینه‌سازی مبتنی بر بیشینه‌شبه‌نمایی و سپس اعمال تکنیک برنامه‌ریزی نیمه‌معین، می‌توان تخمین مناسبی از مکان منبع را به دست آورد. نوآوری مطرح شده در این مقاله به شرح زیر خواهد بود. نخست، به بررسی دو مدل مسئله‌ی مکان‌یابی منبع در شرایط غیرمشارکتی و مشارکتی بر مبنای اندازه‌گیری‌های اختلاف زمان دریافت سیگنال پرداخته شده که در آن از روشی مبتنی بر یکی از مهم‌ترین قضایای تئوری همبندها با عنوان قضیه‌ی اسکالر استفاده گردیده است [۲۰]. با توجه به در نظر گرفتن داده اختلاف زمانی، نویز اندازه‌گیری حاصل همبسته بوده و لذا در محاسبه مسئله مکان‌یابی، می‌بایست ابتدا ماتریس کوواریانس نویز تخمین زده شده و سپس مسئله مکان‌یابی پیاده‌سازی گردد. در شرایطی که ماتریس کوواریانس نویز اندازه‌گیری مبهم و نامعلوم است، حل یک مسئله‌ی مکان‌یابی منبع بر پایه اندازه‌گیری‌های اختلاف زمان دریافت سیگنال، امری دشوار خواهد بود زیرا مشکل غیرخطی و نامحدب بودن نسبت به پارامتر مجهول یعنی مکان منبع مطرح است.

در قدم بعدی، به دلیل نامعلوم بودن ماتریس کوواریانس نویز اندازه‌گیری، با به‌کارگیری تئوری توابع همبند مبتنی بر قضیه‌ی اسکالر، تابع شبه‌نمایی مشترک اندازه‌گیری‌های TDOA را به توابع شبه‌نمایی حاشیه‌ای یک متغیره‌ی متناظر ارتباط می‌دهیم. سپس یک راه جایگزین برای تخمین شبه‌نمایی بیشینه با استفاده از روش توابع منطقی برای حاشیه‌ها^۲ (IFM) اعمال می‌نماییم. در این مرحله مشکل غیرخطی و نامحدب بودن نسبت به پارامتر مجهول با اعمال آزادسازی نیمه‌معین حل گردیده و در نهایت تخمین موقعیت منبع حاصل می‌گردد. نتایج حاصل از شبه‌سازی نشان می‌دهد که در بازه‌ی تغییرات واریانس نویز اندازه‌گیری از -60dB تا 20dB به میزان قابل توجهی بهبود عملکرد حاصل از مکان‌یابی روش فوق صورت گرفته که در میزان سیگنال به نویز نسبتاً مناسب تا یک متر اصلاح در خطای حاصل از مکان‌یابی حاصل گردیده است.

در ادامه بخش‌های مختلف مقاله به قرار زیر مرتب گردید است. بخش دوم مقاله به مدل‌سازی مسئله بر اساس مقادیر اندازه‌گیری شده اختلاف زمان دریافت سیگنال در شرایط نویز همبسته با ماتریس کوواریانس نامعلوم می‌پردازد. در ادامه در بخش سوم به پیاده‌سازی مسئله مکان‌یابی در شرایط غیرمشارکتی و مشارکتی پرداخته شد. نتایج حاصل از شبه‌سازی در بخش چهارم ارائه گردیده است. در نهایت نتیجه‌گیری مقاله در بخش پنجم ارائه گردید.

۲-مدل سیستم

این بخش به مدل‌سازی مسئله تخمین مکان منبع بر اساس مقادیر TDOA اندازه‌گیری شده همبسته در شرایط غیرمشارکتی می‌پردازد. در این مدل‌سازی، منبع مورد بررسی دارای مکانی ناشناخته بوده و هر یک از حسگرها دارای مکانی از پیش مشخص هستند. از این‌رو فرض نموده $\theta = [x, y]^T$ مکان منبع ناشناخته بوده که قرار است در یک فضای دو بعدی تخمین زده شود و $s_i = [x_i, y_i]^T$ برای $i = 1, 2, \dots, N$ نیز مختصات مکان از پیش تعیین شده حسگرها بوده که در آن $(\cdot)^T$ بیانگر ترانپوز و N تعداد حسگرها را نمایش می‌دهد. مجموعه مقادیر TDOA بین اولین و i امین حسگر یعنی t_{i1} ، در حضور نویز اندازه‌گیری گاوسی همبسته با میانگین صفر به‌صورت زیر قابل بیان است

$$t_{i1} = t_{i1}^0 + \Delta t_{i1}, \quad i = 2, \dots, N \quad (1)$$

که در آن t_{i1}^0 بیانگر مقادیر بدون نویز و صحیح اندازه‌گیری TDOA است. با ضرب طرفین رابطه (۱) در سرعت انتشار سیگنال می‌توان رابطه اندازه‌گیری‌های مربوط به اختلاف فاصله را به‌صورت زیر بازنویسی نمود

¹ Copula

² Inference Functions for Margins

$$r_{i1} = r_{i1}^o + n_{i1}, \quad i = 2, \dots, N \quad (2)$$

که در آن n_{i1} تفاضل نویز اندازه‌گیری با انحراف معیار σ_{i1} در حسگر i ام است. تخمین‌گر بیشینه شبیه‌نمایی یک روش بهینه و کارآمد مجانبی برای تعیین مکان منبع است. فرض کنید $\Gamma = [\Gamma_{21}, \dots, \Gamma_{N1}]^T$ بردار اندازه‌گیری‌های اختلاف فاصله‌ها است. از این‌رو، تخمین‌گر ML حاصل از مدل اندازه‌گیری مقادیر TDOA بیان شده در رابطه ۲، می‌تواند به کمک مسئله بهینه‌سازی غیر محدب زیر حاصل گردد [۲۳]

$$K = \{\hat{\theta}, \hat{\Psi}\} = \arg \max_{\theta^o, \Psi} f(r | \theta^o, \Psi) \quad (3)$$

که در آن $f(\cdot)$ بیانگر تابع چگالی احتمال مشترک^۱ (PDF) و Ψ نیز ماتریس کواریانس مجهول از توزیع گاوسی با درایه‌های Ψ_{ij} بوده که می‌تواند به صورت زیر نمایش داده شود:

$$\Psi_{ij} = \begin{cases} \beta_{ij} \sigma_{i1} \sigma_{j1} & j \neq i \\ \sigma_i^2 + \sigma_1^2 & j = i \end{cases}, \quad i, j = 2, \dots, N \quad (4)$$

که در آن β_{ij} ضریب همبستگی بین n_{j1} و n_{i1} است. باید توجه داشت که رابطه ۳ به تابع شبیه‌نمایی مشترک نیاز داشته تا بتواند پاسخ دقیق مکان منبع بر پایه تخمین‌گر ML را به دست آورد. از تئوری مرکزی کاپولا در توزیع‌های پیوسته، که از آن با عنوان قضیه اسکالر یاد می‌شود [۲۰]، برای مدل‌سازی همبستگی بیان شده در مسئله بالا می‌توان استفاده نمود. از این‌رو تابع چگالی احتمال چند متغیره مشترک $f(r)$ را می‌توان بر حسب توزیع‌های حاشیه‌ای $f(r_{i1})$ به صورت زیر فرمول‌بندی و بازنویسی نمود

$$f(r) = \left[\prod_{i=2}^N f(r_{i1}) \right] c(F_2(r_{21}), \dots, F_N(r_{N1})) \quad (5)$$

که در آن F_i بیانگر تابع توزیع تجمعی^۲ (CDF) معادل c تابع چگالی همبند بوده که می‌تواند با مشتق‌گیری از تابع همبند یعنی C نسبت به آرگومان‌های متناظرش به صورت زیر محاسبه گردد [۱۹]:

$$c(\mathbf{F}) = \frac{\partial^{N-1} C(F_2(r_{21}), \dots, F_N(r_{N1}))}{\partial F_2(r_{21}), \dots, \partial F_N(r_{N1})} \quad (6)$$

که در آن $\mathbf{F} = [F_2(r_{21}), \dots, F_N(r_{N1})]$ است. توابع همبند بسیاری از خانواده‌های مختلف مانند همبندهای گاوسی، بیضوی، ارشمیدسی و غیره تاکنون در نظر گرفته شده‌اند که عمده تفاوت آن‌ها در نمایش میزان وابستگی آن‌ها است. تابع همبند گاوسی، به دلیل سادگی در پیاده‌سازی و نیز ساختار ساده و مناسب آن در نمایش همبستگی، یکی از توابع همبند مطلوب در کاربردهای عملی بوده که می‌تواند رابطه وابستگی خطی بین مقادیر اندازه‌گیری‌های TDOA همبسته را بر اساس ضرایب همبستگی، به نمایش گذارد. بنابراین به کمک تابع همبند گاوسی و قضیه اسکالر بیان شده در رابطه ۵ می‌توان مسئله بیشینه‌نمایی مطرح‌شده در رابطه ۳ را به صورت زیر بازنویسی نمود

$$K = \arg \max_{\theta^o, \Psi^o} \left[\sum_{i=2}^N \log f(r_{i1} | \theta^o) + \log c(F_2(r_{21} | \theta^o), \dots, F_N(r_{N1} | \theta^o)) | \Psi^o \right] \quad (7)$$

که در آن Ψ^o پارامترهای تابع همبند بوده که به ماتریس کواریانس مجهول مرتبط است. مسئله ML بیان شده در رابطه ۷، شامل بیشینه‌سازی هم‌زمان روی پارامترهای همبند و نیز پارامترهای حاشیه‌ای است. در مرجع [۱۹]-[۱۸] نشان داده شده که پارامترهای حاشیه‌ای θ^o می‌توانند به صورت مجزا از ماتریس همبستگی Ψ^o تخمین زده شوند. این امر توسط روش توابع منطقی برای حاشیه‌ها صورت می‌پذیرد [۲۱] که به طور مجانبی معادل بیشینه‌نمایی است. بنابراین در مسئله فوق می‌توان ابتدا به تخمین پارامترهای حاشیه‌ای پرداخته و سپس به کمک پارامترهای تخمین‌زده حاصل به یافتن تابع همبند متناظر و در نهایت به تخمین ماتریس کواریانس مجهول پرداخت. این رویکرد منجر به یافتن ابرپارامتر K به صورت بهینه در مسئله بیشینه‌سازی غیرمحدب در رابطه ۷ می‌گردد.

¹ Probability Density Function

² Cumulative Distribution Function

۳- مکان‌یابی TDOA مبتنی بر توابع همبند

مکان‌یابی منبع مبتنی بر اختلاف زمان دریافت سیگنال در شرایط نویز همبسته، می‌تواند در دو وضعیت مشارکتی و غیرمشارکتی مورد بررسی قرار گیرد. در مکان‌یابی غیرمشارکتی، تنها اندازه‌گیری‌های میان یک منبع و چندین حسگر در نظر گرفته می‌شود. به بیانی دیگر در مکان‌یابی غیرمشارکتی، یک یا چند منبع تنها با حسگرها می‌تواند ارتباط برقرار کنند. حسگرهای نصب شده از موقعیت خود، آگاهی دارند و موقعیت منبع نامعلوم است. یکی از علت‌های مهم پیدایش مکان‌یابی مشارکتی، مشکل نبود حسگرهای در دسترس و نیز ارتباطات محدود میان حسگرها و منبع، بوده است. در مکان‌یابی مشارکتی، یک یا چند منبع قادر به ایجاد ارتباط با حسگرها و منابع دیگر هستند. از این‌رو نه‌تنها اندازه‌گیری‌های TDOA میان منبع‌ها و حسگرها اندازه‌گیری می‌گردد، بلکه اندازه‌گیری‌های TDOA میان گره‌های منبع نیز در حل مسئله مشارکت دارند و موقعیت تمامی گره‌های منبع به‌طور هم‌زمان تخمین زده می‌شود. عملکرد و استواری این مدل از مکان‌یابی را می‌توان نسبت به مکان‌یابی غیرمشارکتی بهبود یافته دانست.

۳-۱- مکان‌یابی غیرمشارکتی مبتنی بر IFM

روش تخمین IFM در مکان‌یابی غیرمشارکتی بر مبنای رابطه ۵ در دو مرحله آغاز می‌گردد. ابتدا پارامتر حاشیه‌ای مجهول θ بر پایه مجموع توابع لگاریتم شبیه‌نمایی حاشیه‌ای، به‌صورت زیر تخمین زده می‌شود

$$\hat{\theta} = \arg \max_{\theta^o} \sum_{i=2}^N \log f(r_{i1} | \theta^o) = \arg \min_{\theta^o} \sum_{i=2}^N (r_{i1} - \|\theta^o - s_i\| + \|\theta^o - s_1\|)^2 \quad (8)$$

در ادامه متغیرهای کمکی زیر

$$y = \theta^{oT} \theta^o, \quad G = gg^T, \quad g = [\|\theta^o - s_2\| \quad \dots \quad \|\theta^o - s_N\| \quad \|\theta^o - s_1\|]^T \quad (9)$$

تعریف می‌نماییم. به کمک این متغیرها می‌توان تابع هدف غیرمحدب داده‌شده در رابطه ۸ را به‌صورت زیر فرمول‌بندی نمود

$$\hat{\theta} = \arg \min_{\theta^o} \text{Tr}(r^T r - 2Ag^T + AGA^T) \quad (10)$$

که در این رابطه مقادیر A و $[G]_{ii}$ برابر است با:

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 0 & \dots & 0 & -1 \\ 0 & 1 & \dots & 0 & -1 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & 1 & -1 \end{bmatrix}_{(N-1) \times N}, \quad [G]_{ii} = \begin{cases} s_{i+1}^T s_{i+1} - 2s_{i+1}^T \theta^o + y & 1 \leq i \leq N-1 \\ s_1^T s_1 - 2s_1 \theta^o + y & i = N \end{cases} \quad (11)$$

و $\text{Tr}(\cdot)$ بیانگر ترانهاده ماتریس است. مسئله بهینه‌سازی بیان شده در رابطه ۶ می‌تواند با استفاده از رابطه ۷ و نیز متغیرهای کمکی y و G به‌صورت زیر بازنویسی گردد

$$\begin{aligned} & \min_{\theta^o, g, G, y} \text{Tr}(AGA^T - 2Ag^T) \\ & \text{subject to } G = gg^T, y = \theta^{oT} \theta^o, \\ & [g]_i \geq 0, i = 1, 2, \dots, N \end{aligned} \quad (12)$$

تابع هدف داده شده در مسئله بهینه‌سازی رابطه ۸ یک تابع خطی نسبت به متغیر مجهول g است و لذا تابعی محدب است اما قیدهای تساوی مسئله کمینه‌سازی فوق همچنان نامحدب هستند. این قیدهای تساوی می‌توانند به کمک آزادسازی نیمه معین به نامعادلات ماتریسی خطی (LMI) با استفاده از لم متمم شور^۲ تبدیل گردند [۲۲] که در نتیجه آن مسئله بهینه‌سازی نامحدب بیان‌شده در رابطه ۱۲ بصورت یک مسئله کمینه‌سازی محدب به شکل زیر تبدیل می‌گردد

$$G = gg^T \rightarrow \begin{bmatrix} G & g \\ g^T & 1 \end{bmatrix} \geq \mathbf{0}_{N \times 1} \quad (13)$$

¹ Linear Matrix Inequalities

² Schur's Complement

$$y = \theta^{oT} \theta^o \rightarrow \begin{bmatrix} \mathbf{I} & \theta^o \\ \theta^{oT} & y \end{bmatrix} \geq \mathbf{0}_3 \quad (14)$$

بنابراین مسئله بهینه‌سازی IFM داده شده در رابطه ۸ در نخستین قدم می‌تواند با استفاده از نامعادلات ماتریس خطی داده شده در روابط ۱۳ و ۱۴، به صورت یک مسئله برنامه‌ریزی نیمه‌معین بصورت زیر بازنویسی شود

$$\begin{aligned} \min_{\theta^o, g, G, y} \quad & \text{Tr}(\mathbf{A}G\mathbf{A}^T - 2\mathbf{A}g\mathbf{A}^T) \\ \text{subject to} \quad & [g]_i \geq 0, \quad i = 1, 2, \dots, N, \\ & \begin{bmatrix} \mathbf{G} & \mathbf{g} \\ \mathbf{g}^T & 1 \end{bmatrix} \geq \mathbf{0}, \quad \begin{bmatrix} \mathbf{I} & \theta^o \\ \theta^{oT} & y \end{bmatrix} \geq \mathbf{0}. \end{aligned} \quad (15)$$

بنابراین، مسئله بهینه‌سازی IFM در رابطه ۵ در نخستین گام به کمک برنامه‌ریزی نیمه معین [۲۲] به یک مسئله کمینه‌سازی محدب تبدیل می‌گردد. این امر منجر به یافتن جواب بهینه سراسری توسط الگوریتم‌های حل برنامه‌ریزی نیمه‌معین مانند SDPT3 و SeDuMi می‌شود که از روش نقطه داخلی^۱ برای به دست آوردن جواب بهینه استفاده می‌نمایند [۲۴]. با استفاده از پارامتر تخمین زده شده در قدم اول و جایگزینی آن در رابطه ۶ می‌توان گام دوم را برای حل مسئله کمینه‌سازی داده شده در رابطه ۷ را آغاز نمود.

هدف گام دوم یافتن پارامتر تابع همبند و به عبارتی ماتریس کوواریانس مجهول است. باید توجه داشت که تخمین بیشینه شبیه‌نمایی و نیز فرآیند IFM در برخی حالات خاص از توابع توزیع گاوسی چندمتغیره که دارای توابع همبند گاوسی چند متغیره و توابع حاشیه‌ای گاوسی تک متغیره هستند، می‌تواند با هم برابر باشند [۲۰]. تابع چگالی همبند گاوسی را می‌توان به کمک توزیع نرمال چندمتغیره که در رابطه ۵ مطرح شد به صورت زیر نمایش داد:

$$c(u_2, \dots, u_N | \Psi^o) = \frac{1}{|\Psi^o|^{\frac{1}{2}}} \exp \left[\frac{z^T (\mathbf{I} - \Psi^{o-1}) z}{2} \right] \quad (16)$$

که در آن $z = [z_2, \dots, z_N]^T$ و $z_i = p^{-1}(u_i)$ است بطوریکه p توزیع تجمعی گاوسی استاندارد، \mathbf{I} ماتریس یک، $u_i = F_i(r_{i1})$ برای مقادیر $i = 2, \dots, N$ و Ψ^o نیز ماتریس همبستگی از بردار تصادفی z با درایه‌های $[\Psi^o]_{ij} = 1$ برای $i = j$ و $[\Psi^o]_{ij} = \beta_{ij}$ برای $i \neq j$ است.

۳-۲- توسعه مکان‌یابی در شرایط مشارکتی

در این بخش مکان‌یابی منبع بر پایه اختلاف زمان دریافت سیگنال در شرایط مشارکتی در نظر گرفته شده است که در آن بیشتر از دو منبع با مختصات نامشخص در فضای دوبعدی قرار گرفته که در آن منابع می‌توانند با یکدیگر و نیز با حسگرهای ارتباط داشته باشند. در این حالت یک شبکه از N حسگر به همراه M منبع در نظر گرفته شده است. مکان حسگرها و منابع به ترتیب با $\theta = [x_j, y_j]^T$ و $s_i = [x_i, y_i]^T$ برای $i = 1, \dots, N$ و $j = 1, \dots, M$ نشان داده شده‌اند. در مکان‌یابی مشارکتی، دو مجموعه از اندازه‌گیری‌های TDOA را در اختیار داریم. فرض کنید t_{ji}^A بیانگر اندازه‌گیری‌های اختلاف زمان دریافت سیگنال بین i امین منبع و j امین حسگر نسبت به اختلاف زمان بین i امین منبع و حسگر مرجع باشد و نیز t_{ki}^B بیانگر اندازه‌گیری‌های اختلاف زمان دریافت سیگنال بین k امین منبع و i امین منبع نسبت به اختلاف زمان بین k امین منبع و منبع مرجع باشد که به صورت زیر قابل بیان است

$$t_{ji}^A = \frac{1}{v} \left(\|\theta_j^o - s_i\| - \|\theta_j^o - s_1\| \right) + \Delta t_{ji}^A \quad (17)$$

$$t_{ki}^B = \frac{1}{v} \left(\|\theta_k^o - \theta_i^o\| - \|\theta_k^o - \theta_1^o\| \right) + \Delta t_{ki}^B \quad (18)$$

¹ Interior Point

که در آن v سرعت انتشار سیگنال، Δt_{ji}^B و Δt_{ji}^A نیز نوین اندازه گیری TDOA برای $i, k = 2, \dots, N$ با $i \neq k$ و $j = 1, \dots, M$ هستند. با ضرب طرفین رابطه ۱۷ و ۱۸ در v ، مجموعه اندازه گیری های اختلاف فاصله به صورت زیر به دست می آید

$$r_c = \begin{bmatrix} r^{A^T} & r^{B^T} \end{bmatrix}^T \quad (19)$$

که در رابطه فوق درایه های بردار عبارت اند از:

$$r^A = \begin{bmatrix} r_{21}^A, \dots, r_{N1}^A, r_{22}^A, \dots, r_{N2}^A, \dots, r_{NM}^A \end{bmatrix}^T \quad (20)$$

$$r^B = \begin{bmatrix} r_{32}^B, \dots, r_{M2}^B, r_{23}^B, \dots, r_{M3}^B, \dots, r_{(M-1)M}^B \end{bmatrix}^T \quad (21)$$

با در نظر گرفتن رابطه ۲۰، مسئله کمینه سازی بیان شده در رابطه ۳ را می توان به کمک تئوری اسکالر برای مکان یابی منبع مبتنی بر اختلاف زمان دریافت سیگنال در شرایط مشارکتی، به صورت زیر فرمول بندی نمود

$$\max_{\theta_1^o, \theta_2^o, \dots, \theta_M^o, \Psi_c} \left[\sum_{i=1}^L \log f(r_{c_i} | \theta_1^o, \theta_2^o, \dots, \theta_M^o) + \log c \left(F_1(r_{c_1} | \theta_1^o, \dots, \theta_M^o), \dots, F_L(r_{c_L} | \theta_1^o, \dots, \theta_M^o) | \Psi_c \right) \right] \quad (22)$$

که در آن r_{c_i} مؤلفه i ام بردار r_c و Ψ_c پارامتر همبند مکان یابی منبع در شرایط TDOA برای حالت مشارکتی است. تابع هدف مسئله کمینه سازی داده شده در رابطه ۱۹ یک تابع غیرخطی بر حسب متغیرهای مجهول مکان منبع است. متغیر کمکی G_c را به صورت زیر تعریف می نماییم

$$G_c = g_c g_c^T \quad (23)$$

و در آن بردار g_c به صورت زیر تشکیل می گردد:

$$g_c = \begin{bmatrix} g_1^A, g_2^A, \dots, g_M^A, g_1^B, g_2^B, \dots, g_{M-1}^B \end{bmatrix}^T \quad (24)$$

که درایه های بردار g_c به صورت زیر قابل محاسبه است:

$$g_i^A = \begin{bmatrix} \|\theta_i^o - s_2\|, \dots, \|\theta_i^o - s_N\|, \|\theta_i^o - s_1\| \end{bmatrix}^T \quad (25)$$

$$g_{j-1}^B = \begin{bmatrix} \|\theta_j^o - \theta_p^o\|, \dots, \|\theta_j^o - \theta_M^o\|, \|\theta_j^o - \theta_1^o\| \end{bmatrix}^T$$

اکنون فرض کرده ماتریس Y یک ماتریس کمکی از مرتبه $M \times M$ با درایه j, k ام به صورت زیر باشد:

$$Y(j, k) = \theta_j^{oT} \theta_k^o, \quad j, k = 1, \dots, M \quad (26)$$

بنابراین درایه های قطر اصلی ماتریس G_c در رابطه ۲۳ بصورت زیر به دست می آید:

$$[G_c]_{ii} = \begin{cases} s_{i+1}^T s_{i+1} - 2s_{i+1}^T \theta_\omega^o + Y(1, \omega) & i \in \Omega_1 \\ s_1^T s_{i+1} - 2s_1^T \theta_{\omega-1}^o + Y(1, \omega-1) & i \in \Omega_2 \\ Y(j, j) - 2Y(j, k) + Y(k, k) & i \in \Omega_3 \end{cases} \quad (27)$$

که در آن $\omega = [i/N]$ و Ω_i بیانگر مجموعه اندیس هایی است که به صورت زیر بیان می گردد:

$$\Omega_1 = \{1, \dots, N-1, N+1, \dots, M \times (N-1)\}$$

$$\Omega_2 = \{N, 2N, \dots, M \times N\}$$

$$\Omega_3 = \{M \times (N+1), \dots, (M-1) \times (M-1)\}$$

(28)

بنابراین، تابع هدف داده شده در رابطه ۲۲ می تواند با جایگزینی رابطه ۲۳ به صورت زیر فرمول بندی گردد:

$$\min_{\theta_1^o, \theta_2^o, \dots, \theta_M^o, g_c, G_c} \text{Tr}(r_c^T r_c - 2A_c g_c r_c^T + A_c G_c A_c^T)$$

(29)

subject to $Y(j, k) - \theta_j^{oT} \theta_k^o = 0$

$G_c - g_c g_c^T = 0 \quad [g_c]_i \geq 0.$

که در آن:

$$A_c = \begin{bmatrix} A_1 & O_{(MN-M) \times (M-1)^2} \\ O_{(M^2-3M+2) \times MN} & A_2 \end{bmatrix} \quad (30)$$

و مقادیر A_1 و A_2 ماتریس‌های قطری بلوکی با درایه‌های قطری بلوکی $[A_1]_i = A_{(N-1) \times N}$ برای $1 \leq i \leq M$ و $[A_2]_i = A_{(M-2) \times (M-1)}$ برای $1 \leq i \leq M-1$ هستند. تابع هدف مسئله بهینه‌سازی بیان شده در رابطه ۲۹ نسبت به پارامتر مجهول g_c و G_c خطی هستند و لذا یک تابع محدب است، اما قیدهای مسئله همچنان غیرخطی و نامحدب است. این قیدها می‌توانند توسط آزادسازی نیمه‌معین به یک دسته نامعادلات ماتریس خطی به کمک مل متمم شور به صورت زیر تبدیل گردد

$$G_c = g_c g_c^T \rightarrow \begin{bmatrix} G_c & g_c \\ g_c^T & 1 \end{bmatrix} \geq 0 \quad (31)$$

$$Y(j, k) = \theta_j^o \theta_k^o \rightarrow \begin{bmatrix} \mathbf{I} & \theta_k^o \\ \theta_j^{oT} & Y(j, k) \end{bmatrix} \geq 0 \quad (32)$$

که در آن $k, j = 1, \dots, M$ است. فرض نموده $\Omega = \Omega_1 \cup \Omega_2 \cup \Omega_3$ است. بنابراین، به کمک نامعادلات ماتریس خطی حاصل شده در روابط ۳۱ و ۳۲، می‌توان مسئله کمینه‌سازی بیان شده در رابطه ۲۹ را به شکل یک مسئله SDP به صورت زیر بازنویسی نمود

$$\begin{aligned} \min_{\theta_1^o, \theta_2^o, \dots, \theta_M^o, g_c, G_c, Y(j, k)} & \text{Tr}(A_c G_c A_c^T - 2A_c g_c g_c^T) \\ \text{subject to} & [g_c]_i \geq 0, \quad i \in \bar{\Omega} \\ & \begin{bmatrix} G_c & g_c \\ g_c^T & 1 \end{bmatrix} \geq 0, \quad \begin{bmatrix} \mathbf{I} & \theta_k^o \\ \theta_k^{oT} & Y(j, k) \end{bmatrix} \geq 0 \end{aligned} \quad (33)$$

مسئله بهینه‌سازی فوق یک مسئله محدب از گام اول IFM برای یافتن پاسخ بهینه مکان‌یابی در شرایط مشارکتی به کمک حل‌کننده‌هایی برنامه‌ریزی نیمه‌معین است. با استفاده از تخمین به دست آمده در گام اول و جایگزینی آن در رابطه ۲۲، می‌توان پارامتر تابع همبند را مانند شرایط غیرمشارکتی به دست آورد.

۴- نتایج شبیه‌سازی

در این بخش نتایج حاصل از شبیه‌سازی برای ارزیابی عملکرد روش پیشنهادی تابع همبند مبتنی بر برنامه‌ریزی نیمه‌معین برای هر دو شرایط مشارکتی و غیرمشارکتی ارائه گردیده است. معیار ارزیابی نتایج ریشه‌ی میانگین مربعات خطا^۱ (RMSE) و نیز میزان اریبی^۲ (Bias) در نظر گرفته شده است که به صورت زیر تعریف می‌گردد

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{\sum_{l=1}^L \|\hat{\theta}_l - \theta^o\|^2}{L}} \quad (34)$$

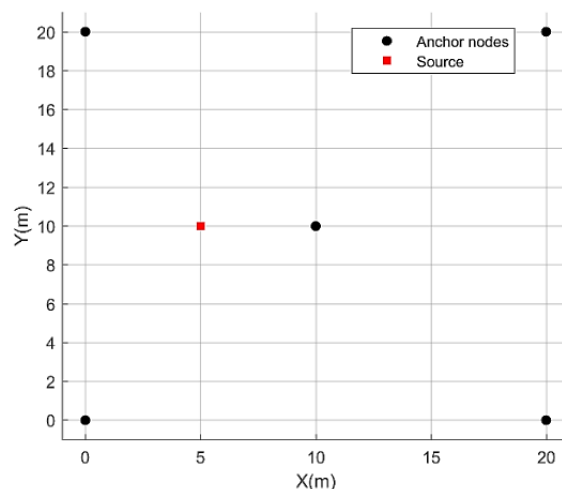
$$\text{Bias} = \left\| \frac{\sum_{l=1}^L \hat{\theta}_l}{L} - \theta^o \right\| \quad (35)$$

بطوری که در این روابط L بیانگر دفعاتی است که الگوریتم اجرا شده است. در ادامه، ابتدا نتایج شبیه‌سازی مکان‌یابی غیرمشارکتی و سپس نتایج مکان‌یابی مشارکتی ارائه گردیده است. در این بخش ابتدا عملکرد مسئله‌ی غیرمشارکتی را با اعمال سناریوهای مختلف در موارد تخمین پارامتر همبند، مقایسه با دیگر روش‌های مکان‌یابی غیرمشارکتی، مقایسه با کران پایین کران رانو تحت ارزیابی قرار داده‌ایم. شکل ۱ و شکل ۲ دو وضعیت مختلف مکان‌یابی قرارگیری حسگرها و منبع مورد تخمین را نشان می‌دهند. همان‌طور که در بخش ۳ بیان شد در مرحله‌ی دوم از روش IFM پارامتر مجهول همبند از جایگزینی مکان تخمین زده شده حاصل در مرحله‌ی اول، می‌تواند به دست آید. بدین منظور پارامتر تخمین زده شده از θ در توابع توزیع جمع‌ی، که آرگومان‌های تابع همبند هستند، جایگزین θ^o می‌شود. در مسئله‌ی غیرمشارکتی، با این جایگزینی مقادیر $F(\hat{\tau}_{i1}|\theta^o)$ برای $i = 2, \dots, N$ حاصل می‌شوند. تابع copulafit در نرم‌افزار Matlab با دریافت این مقادیر به عنوان ورودی و نیز انتخاب نوع همبند، می‌تواند به تخمین

¹ Root Mean Squared Error

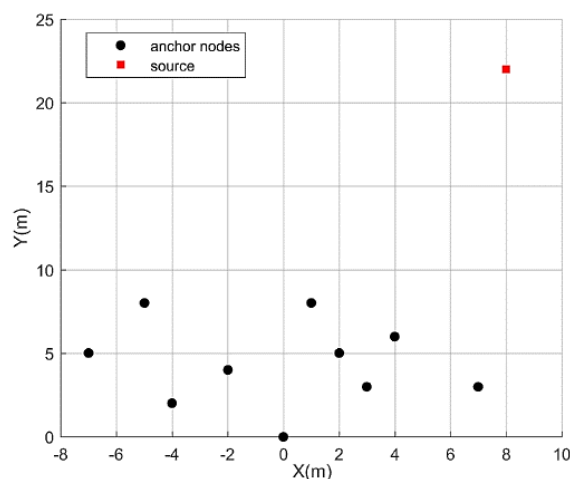
² Bias

پارامتر مجهول هم‌بند موردنظر پردازد. ماتریس کوواریانس برای تابع توزیع تجمعی مشترک گوسی همان ماتریس هم‌بستگی برای هم‌بند گوسی متناظر آن تابع توزیع است.



شکل ۱: حالت الف - مکان قرارگیری حسگرها (گره‌های لنگر) و منبع - وضعیت اول

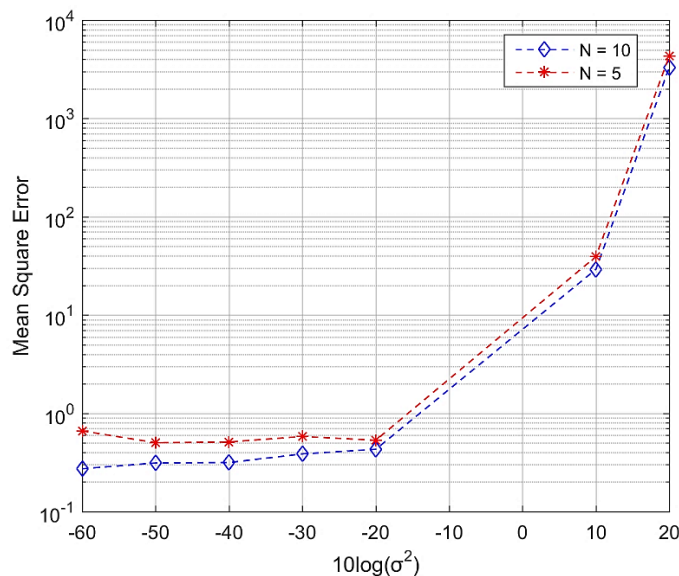
Figure 1. Source and sensors (Anchor nodes) location - State (1)



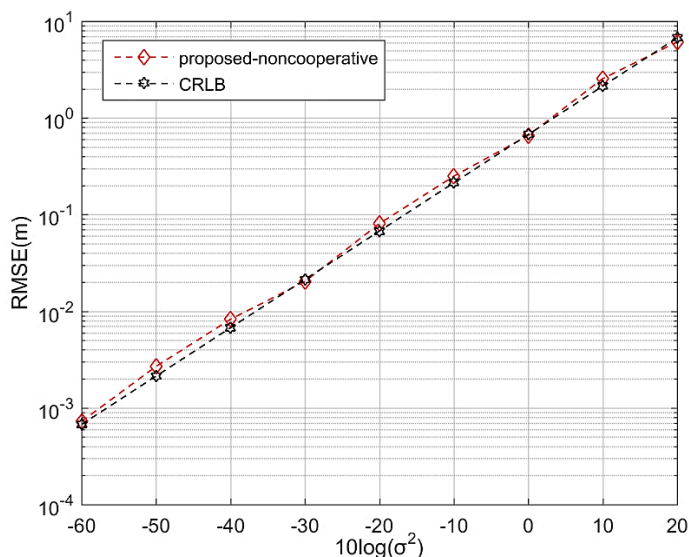
شکل ۲: مکان قرارگیری حسگرها (گره‌های لنگر) و منبع - وضعیت دوم

Figure 2. Source and sensors (Anchor nodes) location - State (2)

شکل ۳ با در نظر گرفتن دو وضعیت از چیدمان حسگرها و منبع، در مسئله‌ی غیرمشارکتی به مقایسه‌ی این دو وضعیت با استفاده از معیار میانگین مربعات خطا پرداخته است. در چیدمان شکل ۱ تعداد ۵ حسگر و در چیدمان شکل ۲ تعداد ۱۰ حسگر وجود دارند. از شکل ۳ مشخص است که افزایش تعداد حسگرها در کاهش خطای ناشی از تخمین به‌طور قابل توجهی مؤثر است. در ادامه با در نظر گرفتن تغییر مقدار واریانس نویز اندازه‌گیری در بازه‌ی -60dB تا 20dB ، مقایسه‌ی میان کران پایین کرامر رانو و RMSE روش پیشنهادی غیرمشارکتی در هر دو وضعیت هندسه قرارگیری صورت گرفت. شکل ۴ نشان‌دهنده‌ی این مقایسه به ازای مقادیر مختلف انحراف معیار نویز اندازه‌گیری است. از شکل ۴ مشهود است که روش پیشنهادی به‌خوبی به کران پایین کرامر رانو نزدیک شده است. هم‌چنین با افزایش مقدار انحراف معیار نویز، RMSE نیز افزایش می‌یابد. پیش از این، تأثیر افزایش تعداد حسگرها در شبیه‌سازی شکل ۳، که میانگین مربعات خطای تخمین ماتریس هم‌بستگی تابع هم‌بند را ارائه می‌کرد، بررسی شد. تعداد حسگرها در شبکه از جمله مواردی است که می‌تواند بر عملکرد الگوریتم‌های مکان‌یابی مبتنی بر TDOA تأثیر داشته باشد.



شکل ۳: مقایسه میانگین مربعات خطای تخمین ماتریس همبستگی تابع همبند برحسب واریانس نویز اندازه با ۵ و ۱۰ حسگر
 Figure 3. Comparison of RMSE of correlation matrix of Copula function versus noise variance for N=5 and N = 10 sensors

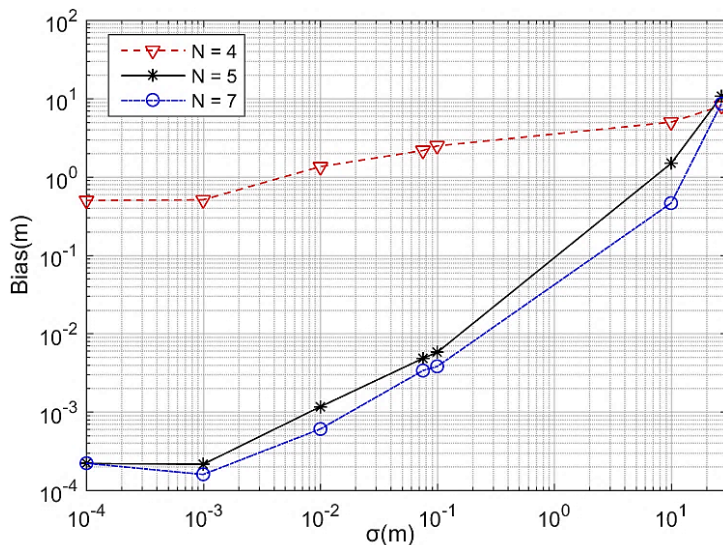


شکل ۴: مقایسه RMSE مکان‌یابی غیرمشارکتی با CRLB، به ازای مقادیر مختلف واریانس نویز اندازه‌گیری
 Figure 4. Comparison of RMSE of non-cooperative localization with CRLB versus noise variance

نخست برای وضعیت مکان حسگرها در شکل ۱ آزمایشی بر پایه‌ی معیار اریبی انجام گرفت. سپس حسگر با موقعیت مکانی $[10,10]^T$ از میان حسگرهای موجود در سناریوی شکل ۱ حذف گردید و نتایج آزمایش مجدد ثبت شد. مقایسه‌ای میان دو حالت مسئله با وجود ۴ و ۵ حسگر با استفاده از معیار اریبی صورت گرفت. در نهایت مشاهده گردید که اریبی تخمین بهبود چشمگیری یافته است. سپس دو گره‌ی دیگر با موقعیت‌های $[15,15]^T$ و $[15,10]^T$ به ۵ گره‌ی موجود افزوده شد. نتایج این مقایسه به ازای مقادیر مختلف واریانس نویز در شکل ۵ به نمایش درآمده است.

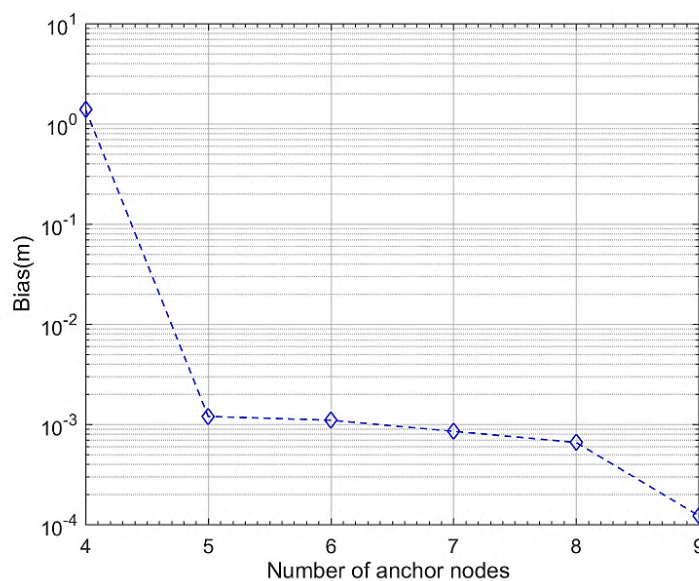
شکل ۵ علاوه بر نمایش تأثیر مثبت افزایش تعداد حسگرها، بیانگر افزایش معیار اریبی تخمین هم‌زمان با افزایش انحراف معیار نویز اندازه‌گیری نیز است. علت افزایش میزان اریبی به دلیل تقریب ناشی از آزادسازی محدب در حل مسئله بهینه‌سازی و تخمین مسئله در شرایط زیر بهینه است. لازم به ذکر است که این نتیجه با ۱۰۰ مرتبه تکرار الگوریتم به‌دست‌آمده است ($L = 100$). در بررسی دیگری از تأثیر افزایش حسگرها بر عملکرد روش پیشنهادی، در مقدار ثابت $\sigma = 10^{-2}$ ، اریبی تخمین به ازای

تعداد ۴، ۵، ۶، ۷، ۸ و ۹ حسگر تحت آزمایش قرار گرفت. شکل ۶ نتیجه این آزمایش را نشان می‌دهد. مطابق آزمایش پیشین، مشهود است که با افزایش تعداد حسگرها اریبی کاهش می‌یابد.



شکل ۵: تأثیر افزایش تعداد حسگرها بر اریبی تخمین به ازای مقادیر مختلف واریانس نویز اندازه‌گیری

Figure 5. Effect of sensors increments on Bias of non-cooperative localization with CRLB versus noise variance

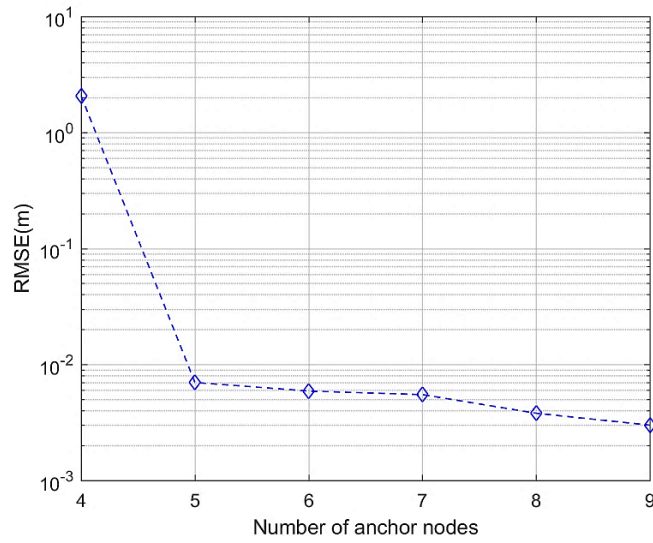


شکل ۶: مقایسه مقدار اریبی تخمین بر حسب تعداد حسگرها (گره‌های لنگر) در مکان‌یابی غیرمشارکتی

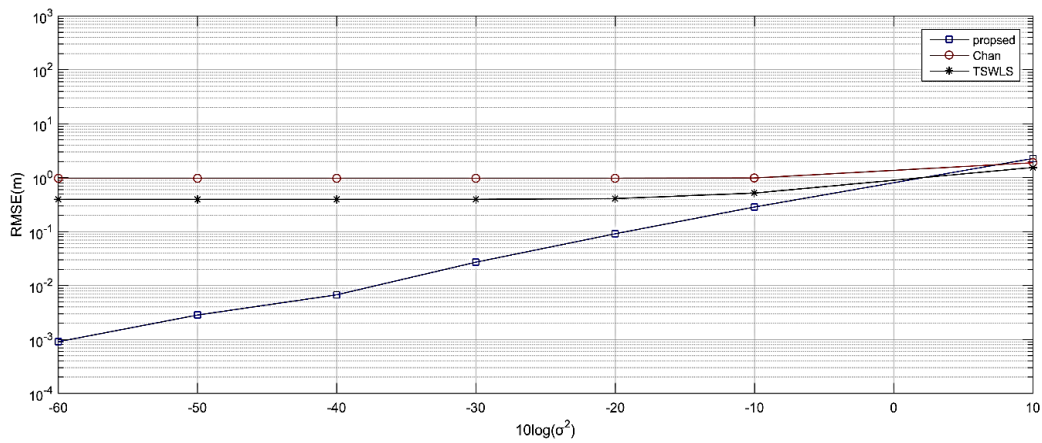
Figure 6. Comparison of Bias versus sensor numbers (Anchor Nodes) for non-cooperative localization

در ادامه، طبق شرایط در نظر گرفته شده برای محاسبه اریبی یعنی مقدار ثابت $\sigma = 10^{-2}$ ، مقدار RMSE تخمین نیز به ازای تعداد ۴، ۵، ۶، ۷، ۸ و ۹ حسگر تحت آزمایش قرار گرفت. شکل ۷ نتیجه‌ی این شبیه‌سازی را نشان می‌دهد. مشهود است که با افزایش تعداد حسگرها مقدار RMSE تخمین کاهش می‌یابد. در اینجا با توجه به افزایش تعداد حسگرها میزان داده دریافتی توسط حسگرها افزایش یافته و در نتیجه در شرایط تقریب محذب حاصل از مسئله بهینه‌سازی می‌توان نتایج مطلوب‌تری را به دست آورد زیرا پارامتر تعداد سنسورها در مخرج ظاهر گردیده و با افزایش آن میزان مجذور خطا کاهش می‌یابد. در ادامه روش پیشنهادی غیرمشارکتی با روش‌های TSWLS [۶] و Chan [۱۲] از منظر دو معیار RMSE و Bias مقایسه شده است. نتایج شبیه‌سازی در شکل ۸ و شکل ۹ متناظراً نشان داده شده است. نتایج شبیه‌سازی‌های شکل ۸ و شکل ۹ در شرایطی به دست آمده که سناریوی شکل ۱ برای قرارگیری حسگرها (گره‌های لنگر) و منبع حاکم بوده است. جهت حصول نتایج، روش‌های Chan، TSWLS و روش پیشنهادی غیرمشارکتی در این آزمایش به ترتیب 5000 مرتبه تکرار شده‌اند. هم‌چنین بازه‌ی تغییرات

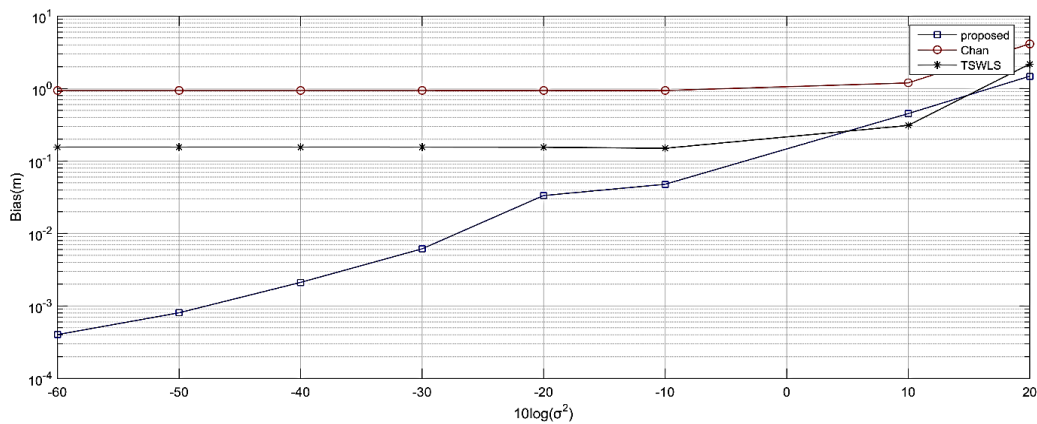
واریانس نویز اندازه‌گیری از -60dB تا 20dB در نظر گرفته شده‌است. همان‌طور که در نتایج شبیه‌سازی مشاهده می‌شود، روش پیشنهادی غیرمشارکتی از دو روش مذکور عملکرد بهتری را از خود نشان می‌دهد و در واریانس‌های یکسان از نویز اندازه‌گیری، RMSE و Bias کمتری نسبت به دو روش دیگر دارد.



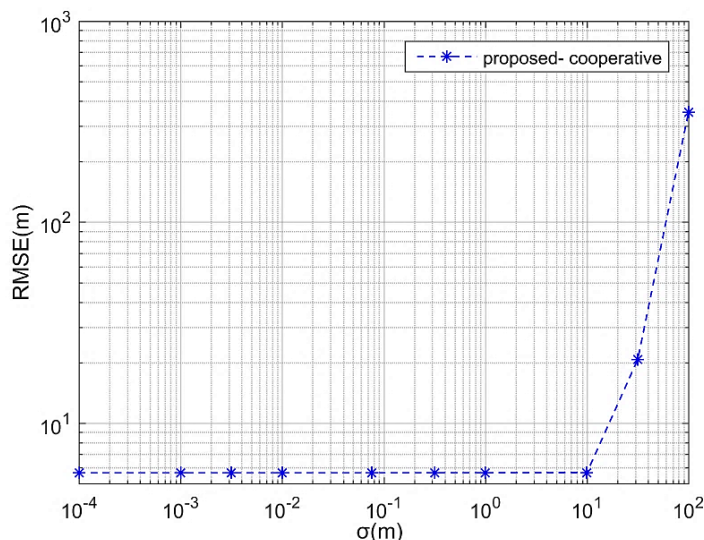
شکل ۷: مقایسه مقدار RMSE تخمین بر حسب تعداد حسگرها (گره‌های لنگر) در مکان‌یابی غیرمشارکتی
 Figure 7. Comparison of RMSE versus sensor numbers (Anchor Nodes) for non-cooperative localization



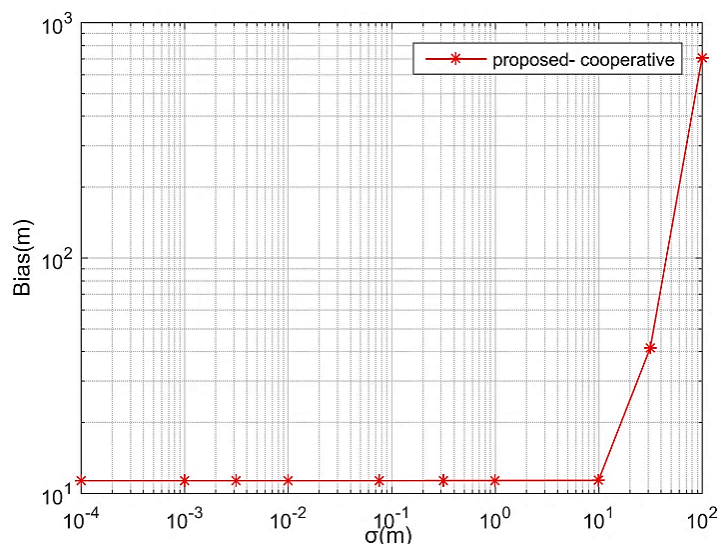
شکل ۸: مقایسه مقدار RMSE تخمین در مکان‌یابی غیرمشارکتی با واریانس نویز اندازه‌گیری
 Figure 8. comparison of RMSE versus variance of noise for non-cooperative localization



شکل ۹: مقایسه مقدار Bias تخمین در مکان‌یابی غیرمشارکتی با واریانس نویز اندازه‌گیری
 Figure 9. Comparison of Bias versus variance of noise for non-cooperative localization



شکل ۱۰: مقایسه مقدار RMSE تخمین بر حسب واریانس نویز اندازه‌گیری در مکان‌یابی مشارکتی
Figure 10. Comparison of RMSE versus variance of noise for cooperative localization



شکل ۱۱: مقایسه مقدار Bias تخمین بر حسب واریانس نویز اندازه‌گیری در مکان‌یابی مشارکتی
Figure 11. Comparison of RMSE versus variance of noise for cooperative localization

شایان ذکر است بر اساس شبیه‌سازی‌های صورت گرفته، روش پیشنهادی غیرمشارکتی با وجود تعداد ۴ حسگر برای رسیدن به تخمین نهایی موقعیت منبع میانگین زمانی 0.2979 ثانیه را نیاز دارد. در توجیه بحث خطای حاصل در نتایج باید توجه داشت که انتخاب توابع همبند در شرایط مختلف و نیز تقریب حاصل از ماتریس کوواریانس نویز با توجه به میزان همبسته بودن خطا، در نتایج حاصل می‌تواند اثرگذار باشد. در ضمن با توجه به آزادسازی محدب صورت گرفته به واسطه قیدهای تساوی، می‌توان انتظار ظاهر شدن بخشی از خطای مذکور را انتظار داشت.

جهت پیاده‌سازی روش پیشنهادی مشارکتی از چیدمان گره‌های لنگر در شکل ۱ استفاده شده‌است. تعداد گره‌ی منبع به صورت یکنواخت در فضایی مربع‌گونه با ابعاد 10×10 توزیع شده‌اند. در واقع طول و عرض این گره‌ها توزیع $U(0,10)$ را دارا هستند. شکل ۱۰ و شکل ۱۱ به ترتیب با معیارهای RMSE و اریبی عملکرد روش پیشنهادی مشارکتی را به نمایش گذاشته‌اند. آنچه از این دو شکل مشهود است، افزایش RMSE و اریبی همزمان با افزایش انحراف معیار نویز صورت می‌گیرد.

۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله، برای دو مدل مسئله‌ی مکان‌یابی غیرمشارکتی و مشارکتی بر مبنای اندازه‌گیری‌های TDOA روشی بر پایه‌ی قضیه‌ی اسکالر که از مهم‌ترین قضایای تئوری هم‌بندها به شمار می‌رود، ارائه گردید. در شرایطی که ماتریس کوواریانس نویز اندازه‌گیری مبهم و نامعلوم بود، حلّ یک مسئله‌ی مکان‌یابی مبتنی بر اندازه‌گیری‌های TDOA، که همواره از مشکل غیرخطی و نامحدّب بودن نسبت به پارامتر مجهول مکان منبع رنج می‌برد، امری دشوار می‌نمود. قضیه‌ی اسکالر به کمک آمد و با به‌کارگیری یک هم‌بند گوسی مسئله از حالتی که مشروط به دانستن ماتریس کوواریانس نویز اندازه‌گیری است، بیرون آمد. سپس با اعمال روش IFM مرحله‌ی دیگری از حلّ مسئله پدید آمد. در این مرحله مشکل غیرخطی و نامحدّب بودن نسبت به پارامتر مجهول مکان منبع سر برآورد. از این رو با چندین عملیات جبری و سرانجام با اعمال آزادسازی نیمه معین، تخمینی از موقعیت منبع حاصل شد.

مراجع

- [1] A. Forster, Introduction to wireless sensor networks. John Wiley & Sons, 2016.
- [2] L. Huang *et al.*, "Robust TDOA-Based Indoor Localization Using Improved Clock-Sync-Scheme and Multilevel Constrained ARPF," in *IEEE Sensors Journal*, vol. 23, no. 10, pp. 10633-10643, 15 May 15, 2023, doi: 10.1109/JSEN.2023.3259540.
- [3] Y. Sun, K. C. Ho, Y. Yang and L. Chen, "An Asymptotically Optimal Estimator for Source Location and Propagation Speed by TDOA," in *IEEE Signal Processing Letters*, vol. 30, pp. 1037-1041, 2023, doi: 10.1109/LSP.2023.3302229.
- [4] X. Qu, L. Xie and W. Tan, "Iterative Constrained Weighted Least Squares Source Localization Using TDOA and FDOA Measurements," in *IEEE Transactions on Signal Processing*, vol. 65, no. 15, pp. 3990-4003, 1 Aug. 1, 2017, doi: 10.1109/TSP.2017.2703667.
- [5] K. C. Ho, X. Lu and L. Kovavisaruch, "Source Localization Using TDOA and FDOA Measurements in the Presence of Receiver Location Errors: Analysis and Solution," in *IEEE Transactions on Signal Processing*, vol. 55, no. 2, pp. 684-696, Feb. 2007, doi: 10.1109/TSP.2006.885744.
- [6] A. Noroozi, A. H. Oveis, S. M. Hosseini and M. A. Sebt, "Improved Algebraic Solution for Source Localization From TDOA and FDOA Measurements," in *IEEE Wireless Communications Letters*, vol. 7, no. 3, pp. 352-355, June 2018, doi: 10.1109/LWC.2017.2777995.
- [7] Y. Sun, K. C. Ho and Q. Wan, "Solution and Analysis of TDOA Localization of a Near or Distant Source in Closed Form," in *IEEE Transactions on Signal Processing*, vol. 67, no. 2, pp. 320-335, 15 Jan. 15, 2019, doi: 10.1109/TSP.2018.2879622.
- [8] Z. Mao, H. Su, B. He and X. Jing, "Moving Source Localization in Passive Sensor Network With Location Uncertainty," in *IEEE Signal Processing Letters*, vol. 28, pp. 823-827, 2021, doi: 10.1109/LSP.2021.3074034.
- [9] N. Vankayalapati, S. Kay and Q. Ding, "TDOA based direct positioning maximum likelihood estimator and the cramer-rao bound," in *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, vol. 50, no. 3, pp. 1616-1635, July 2014, doi: 10.1109/TAES.2013.110499.
- [10] Y. Zou and H. Liu, "Semidefinite Programming Methods for Alleviating Clock Synchronization Bias and Sensor Position Errors in TDOA Localization," in *IEEE Signal Processing Letters*, vol. 27, pp. 241-245, 2020, doi: 10.1109/LSP.2020.2965822.
- [11] X. Ma, T. Ballal, H. Chen, O. Aldayel and T. Y. Al-Naffouri, "A Maximum-Likelihood TDOA Localization Algorithm Using Difference-of-Convex Programming," in *IEEE Signal Processing Letters*, vol. 28, pp. 309-313, 2021, doi: 10.1109/LSP.2021.3051836.

- [12] H. Chen, T. Ballal, N. Saeed, M. -S. Alouini and T. Y. Al-Naffouri, "A Joint TDOA-PDOA Localization Approach Using Particle Swarm Optimization," in *IEEE Wireless Communications Letters*, vol. 9, no. 8, pp. 1240-1244, Aug. 2020, doi: 10.1109/LWC.2020.2986756.
- [13] Y. Sun, K. C. Ho, Y. Yang and L. Chen, "An Asymptotically Optimal Estimator for Source Location and Propagation Speed by TDOA," in *IEEE Signal Processing Letters*, vol. 30, pp. 1037-1041, 2023, doi: 10.1109/LSP.2023.3302229.
- [14] W. Xiong, C. Schindelbauer and H. C. So, "Globally Optimized TDOA High-Frequency Source Localization Based on Quasi-Parabolic Ionosphere Modeling and Collaborative Gradient Projection," in *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, vol. 59, no. 1, pp. 580-590, Feb. 2023, doi: 10.1109/TAES.2022.3185971.
- [15] Y. Sun, K. C. Ho, T. Xing, Y. Yang and L. Chen, "Projection-Based Algorithm and Performance Analysis for TDOA Localization in MPR," in *IEEE Transactions on Signal Processing*, vol. 72, pp. 896-911, 2024, doi: 10.1109/TSP.2024.3352923.
- [16] M. R. Basheer and S. Jagannathan, "Localization of Objects Using Cross-Correlation of Shadow Fading Noise and Copulas," *IEEE Global Telecommunications Conference - GLOBECOM*, Houston, TX, USA, 2011, pp. 1-5, doi: 10.1109/GLOCOM.2011.6134101.
- [17] N. Patwari, J. N. Ash, S. Kyperountas, A. O. Hero, R. L. Moses and N. S. Correal, "Locating the nodes: cooperative localization in wireless sensor networks," in *IEEE Signal Processing Magazine*, vol. 22, no. 4, pp. 54-69, July 2005, doi: 10.1109/MSP.2005.1458287.
- [18] R. M. Vaghefi, M. R. Gholami, R. M. Buehrer and E. G. Strom, "Cooperative Received Signal Strength-Based Sensor Localization With Unknown Transmit Powers," in *IEEE Transactions on Signal Processing*, vol. 61, no. 6, pp. 1389-1403, March 15, 2013, doi: 10.1109/TSP.2012.2232664.
- [19] R. B. Nelsen, *An introduction to copulas*. Springer Science & Business Media, 2007.
- [20] H. Joe, *Multivariate models and multivariate dependence concepts*. CRC press, 1997.
- [21] H. Joe and J. J. Xu, "The estimation method of inference functions for margins for multivariate models," 1996.
- [22] S. Boyd, S. P. Boyd, and L. Vandenberghe, *Convex optimization*. Cambridge university press, 2004.
- [23] S. M. Kay, *Fundamentals of statistical signal processing: estimation theory*. Prentice-Hall, Inc., 1993.
- [24] M. Grant and S. Boyd, "CVX: Matlab software for disciplined convex programming, version 2.1," ed, 2014.

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>





Contents

Classification of Breast Cancer Masses using Non-Linear Quadratic Support Vector Machine and Comparison with Self-Organizing Neural Network	1
Soodeh Bakhshandeh; Seyede Monire Atyabi; Sahar Saberi	
A Single Stage Dynamic Transmission Expansion Planning Model in the Competitive Market	15
Hamid Gorjipour; Mojtaba Najafi; Naghi Moaddabi Pirkolachi	
A Complete Analysis for Detection and Localization of Partial Discharges in XLPE Cables, Power Transformers and Generators..	29
Amir Ghaedi; Reza Sedaghati; Mehrdad Mahmoudian	
Low-Power and Reliable Approximate Subtractors for Image Processing Applications	53
Fatemeh Pooladi; Farshad Pesaran; Nabiollah Shiri	
A Distributed Denial-of-Service (DDoS) Attack Detection Approach in Fog Layer Based on Distributed Blockchain Database and Machine Learning	67
Mohsen Eghbali; Mohammad Reza Mollhoseini Ardakani	
Cooperative and Non-cooperative TDOA Based Source Localization with Copula Function Using Semidefinite Relaxation	91
Marjan Dadkhah Tehrani; Hannan Lohrasbipeydeh	



Journal of Southern Communication Engineering

License holder: Islamic Azad University Bushehr Branch

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

Editorial Board:

Dr. Mohammad Naser-Moghaddasi	Professor	Islamic Azad University Science and Research Branch
Dr. Homayoon Oraizi	Professor	Iran University of Science and Tech.
Dr. Srajoddin katebi	Professor	Shiraz University
Dr. Ebrahim Abiri	Professor	Shiraz University of Technology
Dr. Karim Mohammadi	Professor	Iran University of Science and Tech.
Dr. Abdolreza Nabavi	Professor	Tarbiat Modares University
Dr. Massoud Dousti	Associate Professor	Islamic Azad University Science and Research Branch
Dr. Alireza Behrad	Professor	Shahed University
Dr. Mohammad Mardaneh	Professor	Shiraz University of Technology
Dr. Ghazanfar Shahgholian	Professor	Islamic Azad University Najafabad branch
Dr. Ramezan Ali Sadeghzadeh Sheikhan	Professor	K.N. Toosi University of Technology
Dr. Esmail Najafiaghdam	Professor	Sahand University of Technology
Dr. 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:

