زمستان ۱۴۰۴
سال چهاردهم
شماره پنجاهم

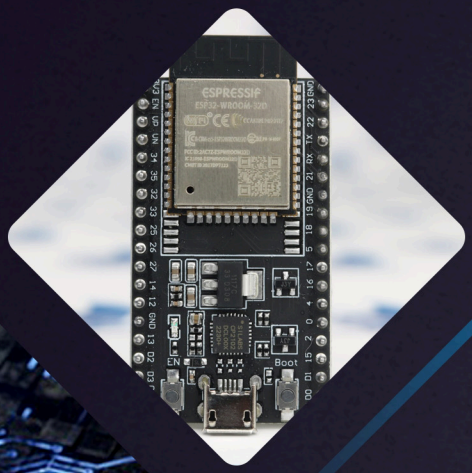
فصلنامه تخصصی مهندسی برق و کامپیوتر

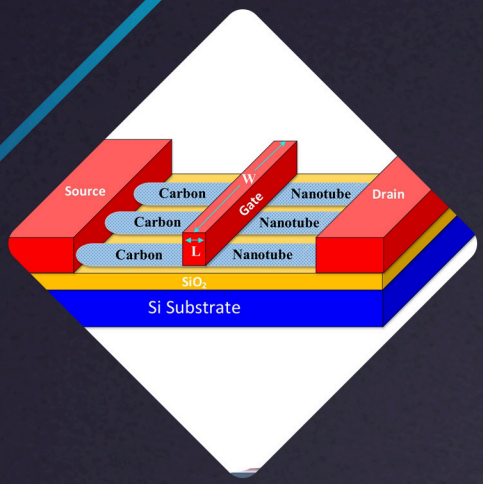
KAHROBA MAGAZINE

Journal of Electrical and Computer Engineering

شماره مجوز وزارت فرهنگ و ارشاداسلامی ۷۷۸۲۱
ISSN :2322-3723







۱–آشنایی با دکتر محسن پارسا مقدم–استاد و پژوهشگر برجسته ایران

۲–توسعه چارچوب های تست نرم افزار با استفاده از هوش مصنوعی

۳–تحلیل و مقایسه جامع ترانزیستورهای اثر میدان پیشرفته (FinFET, CNTFET, GNRFET, FeFET, HEMT) برای کاربردهای توان پایین و فرکانس بالا

۴–مکان‌یابی و اندازه‌گیری بهینه منابع تولید پراکنده (DG) در شبکه توزیع با استفاده از رویکرد تلفیقی منطق فازی و الگوریتم بهینه‌سازی نهنگ

۵– بهبود پایداری و جنبه‌های اقتصادی استفاده از جبران‌ساز سری سنکرون استاتیکی (SSSC) در مزارع بادی مبتنی بر DFIG

۶– تشخیص خطا در حسگرهای اثر هال موتور DC بدون جاروبک با استفاده از شبکه‌های عصبی و مدل یادگیری عمیق

۷–پیاده‌سازی یک ماینر سبک‌وزن مبتنی بر ESP۳۲ با استفاده از پلتفرم آموزشی Duino-Coin برای کاربردهای اینترنت اشیا

۸–یک چارچوب هوشمند یکپارچه برای پیشگیری و تشخیص سرقت خودرو مبتنی بر تحلیل داده‌های سنسوری و الگوهای جرم

صاحب‌امتیاز

نواندیشان

مدیرمسئول

مهدی عارف خیابانی

سردبیر

محمود مقدسیان

هیئت تحریریه

دکتر جواد شکرالهی مغانی-دکترای برق قدرت-دانشیار دانشگاه صنعتی امیرکبیر تهران

دکتر امیرحسین رحمانی – دکترای برق قدرت- استاددانشگاه‌های جندی شاپور دزفول و آزاد اسلامی‌واحد درفول

دکتر ملیحه نیک سیرت- دکترای علوم کامپیوتر- استادیار دانشگاه صنعتی بیرجند

دکتر محمود مقدسیان- دکترای برق قدرت- استادیار دانشگاه چمران اهواز

دکتر موسی مجرد- دکترای کامپیوتر-نرم افزار –دانشیار دانشگاه آزاد اسلامی فیروزآباد

دکتر حامد سقایی- دکترای برق الکترونیک- دانشیار دانشگاه آزاداسلامی شهرکرد ، استادیار دانشگاه اهواز

دکتر آزاد رحیمی- دکترای برق قدرت- هیئت علمی(مربی) و مدیرگروه دانشگاه فنی و حرفه‌ای سنندج

دکتر محمدرضا ذوقی-دکترای برق مخابرات- استادیار دانشگاه کاشان

دکتر مهران ریکی-دکترای کامپیوتر-نرم افزار- هیئت علمی (مربی) دانشکده ملی مهارت شهید باهنر زاهدان

مهندس امین شیخ نجدی-کارشناس ارشد برق الکترونیک-استادیار مدعو دانشگاه جندی شاپور اهواز و آزاداسلامی واحد دزفول

مهندس محمدحسین دوست محمدی- کارشناسی ارشد برق الکترونیک – هیئت علمی(مربی) دانشگاه صنعتی همدان

درباره کهربا ۴

یادداشت مدیرمسئول ۴

سخن سردبیر ۵

آشنایی با مشاهیر

معرفی دکتر محسن پارسا مقدم-استاد و پژوهشگر برجسته ایران ۶

مقالات

مکان‌یابی و اندازه‌گیری بهینه منابع تولید پراکنده (DG) در شبکه توزیع با استفاده از رویکرد تلفیقی منطق فازی و الگوریتم بهینه‌سازی نهنگ ۹

علیرضا عباسی ، کارشناسی ارشد، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران جنوب

حسن سیاهکلی ، دکترای برق قدرت، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران جنوب

پیاده‌سازی یک ماینر سبک‌وزن مبتنی بر ESP۳۲ با استفاده از پلتفرم آموزشی Dui no—Coi n برای کاربردهای اینترنت اشیا ۲۳

محمدحسین دانش‌پژوه ،کارشناسی مهندسی کامپیوتر، دانشکده مهندسی جم، دانشگاه خلیج فارس ، استان بوشهر شهرستان جم

طالب صافی‌نیا ،استاد دانشکده مهندسی جم، دانشگاه خلیج فارس ، استان بوشهر شهرستان جم

کارشناسی مهندسی کامپیوتر، دانشکده مهندسی جم، دانشگاه خلیج فارس ، استان بوشهر شهرستان جم

کارشناسی مهندسی کامپیوتر، دانشکده مهندسی جم، دانشگاه خلیج فارس ، استان بوشهر شهرستان جم

بهبود پایداری و جنبه‌های اقت صادی ا ستفاده از جبران ساز سری سنکرون ا ستاتیکی (SSSC) در مزارع بادی مبتنی بر DFI G ۲۹

علی رضایی، استادیار ،گروه مهندسی سیستم و مکاترونیک دانشکده علوم و فنون نوین دانشگاه تهران

تشخیص خطا در حسگرهای اثر هال موتور DC بدون جاروبک با ا ستفاده از شبکه‌های عصبی و مدل یادگیری عمیق ۴۱

مسلم رحیم پور ، کارشناسی ارشد پردیس صنعتی شهدای هویزه- دانشگاه شهید چمران اهواز-سوسنگرد- ایران

محمود مقدسیان، استادیار پردیس صنعتی شهدای هویزه- دانشگاه شهید چمران اهواز-سوسنگرد- ایران

تحلیل و مقایسه جامع ترانزیستورهای اثر میدان پیشرفته (Fi nFET, CNTFET, GNRFET, FeFET, HEMT) برای کاربردهای توان پایین و فرکانس بالا ۵۰

امین شیخ نجدی استادیار الکترونیک دانشگاه آزاد دزفول

نسرین مجدی کارشناسی الکترونیک دانشگاه پیام نور دزفول

یک چارچوب هوشمند یکپارچه برای پیشگیری و تشخیص سرقت خودرو مبتنی بر تحلیل داده‌های سنسوری و الگوهای جرم ۵۸

آرمان رحمتی لپوندانی ، کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک گرایش ساخت و تولید دانشگاه امام حسین

سعید شعبان زاده،کارشناسی ارشد دانشگاه بوعلی همدان

مهدی نیا جلیلی، گروه مهندسی مکانیک ،هیئت علمی دانشگاه ملی مهارت تهران

توسعه چارچوب های تست نرم افزار با استفاده از هوش مصنوعی ۶۵

نیلوفر ترکی ،کارشناسی مهندسی کامپیوتر دانشگاه پیام نور خوراسگان اصفهان

مهسا محمدی مقدم، استادیار مهندسی کامپیوتر دانشگاه پیام نور شهرکرد

ارتباط با کهربا ۷۲

English Abstracts ۷۳

درباره کهربا

مجله الکترونیکی کهربا، با همت و تلاش جمعی از دانشجویان و مهندسین برق، بخصوص اعضای انجمن علمی و پژوهشی نواندیشان، در سال هزار و سیصد و نود شروع به کار کرد. کهربا از سال ۹۱ با کسب شماره بین‌المللی استاندارد مجلات (ISSN:۲۳۲۲-۳۷۲۳) و ثبت در سازمان اسناد و کتابخانه ملی ایران، به‌عنوان فصلنامه‌ای رسمی و تخصصی در حوزه صنعت برق شناخته‌شده است. این نشریه تخصصی در سال ۹۵ موفق به اخذ پروانه انتشار از وزارت فرهنگ و ارشاد اسلامی، با مجوز شماره ۷۷۸۲۱ و ثبت در سامانه جامع رسانه های کشور(e-rasaneh) و بانک اطلاعات نشریات کشور(magiran) گردید. در سال ۹۷ طی تفاهم‌نامه‌ای با بانک مقالات کشور (سیویلیکا) مورد حمایت این پایگاه قرارگرفته و مقالات ارائه‌شده به نشریه پس از انتشار در سیویلیکا نمایه شده و در نظام رتبه‌بندی دانشگاه‌ها و پژوهشگاه‌ها مورد تحلیل و بررسی قرار می‌گیرند.در سال ۱۴۰۳ موفق به کسب امتیاز لازم جهت نمایه سازی نشریات موسسه استنادی و پایش علم و فناوری جهان اسلام (ISC) گردید.

یادداشت مدیرمسئول

اکنون که به سیزدهمین زمستان فعالیت نشریه کهربا پا گذاشته‌ایم و پنجاهمین شماره این مجله تخصصی را پیش روی شما قرار می‌دهیم، خرسندیم که همچنان همراه و هم‌قدم با شما فرهیختگان و علاقه‌مندان به علوم مهندسی برق، الکترونیک و کامپیوتر هستیم.

از نخستین روز انتشار، هدف ما تهیه و ارائه مطالبی کاربردی، قابل فهم و درعین‌حال تخصصی بوده است تا ضمن حفظ عمق علمی، بستری فراهم آوریم برای گسترش دانش و آگاهی در میان دانش‌پژوهان و مشتاقان این حوزه‌ها. امید داریم با راهنمایی‌ها، نقدها و حمایت‌های سازنده شما عزیزان، هر شماره نسبت به شماره پیشین پربارتر و حرفه‌ای‌تر گردد. به یاری همراهی و همت دوستان و همکارانمان، در تلاشیم تا گامی هرچند کوچک در مسیر ارتقای سطح دانش، رضایت شما خوانندگان گرامی، و شکوفایی علمی جامعه برداریم.

با آرزوی موفقیت و پیشرفت روزافزون برای شما عزیزان

سخن سردبیر:

در روزگاری که شتاب تحولات فناورانه بیش از هر زمان دیگری مرزهای دانش را جابه‌جا می‌کند، رسالت نشریات علمی فراتر از انتشار یافته‌هاست؛ ما مسئول ایجاد پلی میان ایده، پژوهش و کاربرد هستیم. شماره پیشِ رو تلاشی است در همین مسیر؛ تلاشی برای هم‌افزایی میان حوزه‌های گوناگون مهندسی برق، الکترونیک، فناوری اطلاعات و هوش مصنوعی.

در این شماره، از «تحلیل و مقایسه جامع ترانزیستورهای اثر میدان پیشرفته» برای کاربردهای توان پایین و فرکانس بالا تا «مکان‌یابی و اندازه‌گیری بهینه منابع تولید پراکنده در شبکه توزیع» با رویکردهای هوشمند، گستره‌ای از موضوعات بنیادین و کاربردی مورد بررسی قرار گرفته است. همچنین، پژوهش‌هایی در زمینه «بهبود پایداری و ارزیابی اقتصادی جبران‌ساز سری سنکرون استاتیکی در مزارع بادی مبتنی بر DFIG» نشان می‌دهد که گذار به انرژی‌های تجدیدپذیر، نیازمند نگاهی تلفیقی میان پایداری فنی و توجیه اقتصادی است.

از سوی دیگر، مقالاتی همچون «تشخیص خطا در حسگرهای اثر هال موتور DC بدون جاروبک با استفاده از یادگیری عمیق»، «پیاده‌سازی ماینر سبک‌وزن مبتنی بر ESP32 در بستر اینترنت اشیا»، «چارچوب هوشمند پیشگیری و تشخیص سرقت خودرو» و «توسعه چارچوب‌های تست نرم‌افزار با بهره‌گیری از هوش مصنوع»، نشان‌دهنده نقش پررنگ داده، الگوریتم و هوشمندسازی در حل مسائل پیچیده مهندسی امروز است.

در کنار این مقالات پژوهشی، معرفی چهره‌های علمی برجسته کشور نیز بخشی از مأموریت ما در پاسداشت سرمایه‌های انسانی علم و فناوری است؛ چرا که توسعه پایدار علمی، بدون الهام از مسیر پیشگامان آن، ممکن نخواهد بود.

امید است مجموعه حاضر، علاوه بر ارتقای دانش تخصصی مخاطبان، زمینه‌ساز شکل‌گیری ایده‌های نو، همکاری‌های علمی و حرکت به سوی فناوری‌های کارآمدتر و پایدارتر باشد. از تمامی نویسندگان، داوران و همکاران اجرایی که با دقت، تعهد و نگاه علمی خود ما را در تهیه این شماره یاری رساندند، صمیمانه سپاسگزاریم.

با آرزوی توفیق روزافزون برای جامعه علمی کشور

معرفی دکتر محسن پارسا مقدم-استاد و پژوهشگر برجسته ایران



دکتر محسن پارسا مقدم یک **استاد و پژوهشگر برجسته مهندسی برق** (گرایش سیستم‌های قدرت) در **دانشگاه تربیت مدرس** در **تهران، ایران** است .

- او استاد **دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر** دانشگاه تربیت مدرس می‌باشد و از سال‌ها قبل عضو هیئت علمی این دانشگاه بوده است .
- تحصیلات خود را در رشته **مهندسی برق** در دانشگاه‌های معتبر ایران و ژاپن گذرانده است:
  - کارشناسی مهندسی برق از **دانشگاه صنعتی شریف** ایران،
  - کارشناسی ارشد و دکترای مهندسی برق از **دانشگاه‌های تویوهاشی و توهوکو** در ژاپن .

حوزه‌های پژوهشی و تخصصی:

دکتر پارسا مقدم در زمینه‌های زیر پژوهش و تدریس کرده است:

- تحلیل و **برنامه‌ریزی سیستم‌های قدرت**
- **شبکه‌های هوشمند** (Smart Grids)
- **مدیریت انرژی** و ادغام منابع **انرژی‌های تجدیدپذیر** در شبکه برق
- **پاسخ به تقاضا** (Demand Response)و بهینه‌سازی عملکرد شبکه‌های برق

آقای دکتر محسن پارسا مقدم دارای ۹۴ مقاله کنفرانسی و ۱۵ مقاله ژورنالی در مجلات داخل کشور هستند. طی ۳۲ سال با ۱۷ پژوهشگر مختلف همکاری مستقیم علمی داشته که بیشترین همکاری وی با محمودرضا حقی فام در انتشار ۱۱ مقاله علمی بوده است. مقالات منتشر شده ایشان بیشتر در موضوعات تولید پراکنده، شبکه توزیع، الگوریتم ژنتیک و بازار برق تهیه شده است.

مروری بر چالش های فنی اتصال سیستم های تبدیل انرژی باد به شبکه منتشر شده در مجله فناوری های نوین مهندسی برق در سیستم انرژی سبز (۱۴۰۱)

برنامه ریزی تولید روزپیش سیستم قدرت در حضور منابع تولید سریع تحت عدم قطعیت واحدهای تولید تجدیدپذیر منتشر شده در فصلنامه مهندسی و مدیریت انرژی (۱۴۰۱)

پیش بینی کوتاه مدت بار الکتریکی از طریق یادگیری ویژگی های بار با استفاده از شبکه های عمیق کانولوشن و بازگشتی منتشر شده در فصلنامه صنایع الکترونیک (۱۴۰۰)

بهره برداری هاب انرژی با استفاده از روش کنترل پیش بین مبتنی بر مدل مقاوم با در نظر گرفتن خطای پیش بینی بار الکتریکی منتشر شده در فصلنامه مهندسی برق دانشگاه تبریز (۱۳۹۵)

برنامه ریزی توسعه منابع لنرژی گسترده با بهره گیری از شبیه سازی مونت کارلو در فضای نظریه بازی ها با اطلاعات ناقص منتشر شده در فصلنامه مهندسی برق و الکترونیک ایران (۱۳۹۴)

مکانیابی بهینه منابع تولیدپراکنده و پارکینگ خودروی برقی بر اساس مدل احتمالاتی خودروهای برقی منتشر شده در مجله هوش محاسباتی در مهندسی برق (۱۳۹۲)

بهره برداری بهینه اقتصادی از سیستم انعطاف یافته تولید هم زمان برق، حرارت و سرما منتشر شده در فصلنامه مهندسی و مدیریت انرژی (۱۳۹۲)

Integration Reinforcement of Renewable Energy Resources and PHEVs through Hybrid AC-DC Local Network منتشر شده در فصلنامه مهندسی برق مدرس (۱۳۹۱)

Anti-Islanding Protection of Grid Connected Distributed Generators منتشر شده در فصلنامه مهندسی برق مدرس (۱۳۸۹)

Long Term Electricity Consumption Modeling for Iran Using Cointegration منتشر شده در فصلنامه مهندسی برق مدرس (۱۳۸۷) امید ضیائی ، محسن پارسا مقدم

Simultaneous Placement of HV/MV Substations and Distributed Generators in Distribution Systems Planning منتشر شده در فصلنامه مهندسی برق مدرس (۱۳۸۶)

Simultaneous Placement of HV/MV Substations and Distributed Generators in Distribution Systems Planning منتشر شده در فصلنامه مهندسی برق مدرس (۱۳۸۶)

برنامه ریزی توسعه شبکه انتقال برق در بازارهای رقابتی منتشر شده در فصلنامه انرژی ایران (۱۳۸۴)

مطالعه تاثیر اقتصادی حضور واحدهای تولید مشترکان در استراتژیهای پیشگیرانه - اصلاحی منتشر شده در دوفصلنامه روشهای عددی در مهندسی (۱۳۷۹)

20.1001.1.23223723.1404.12.4.1.9
KNO-1204-5001

مکان‌یابی و اندازه‌گیری بهینه منابع تولید پراکنده (DG) در شبکه توزیع با استفاده از رویکرد تلفیقی منطق فازی و الگوریتم بهینه‌سازی نهنگ

نویسندگان:

علیرضا عباسی[1]، حسن سیاهکلی[2]

[1]کارشناسی ارشد، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران جنوب، alliireza@yahoo.com

[2]دکترای برق قدرت ، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران جنوبH_siahkali@azad.ac.ir

چکیده:

در سال‌های اخیر، نیاز به توسعه شبکه‌های توزیع برق برای پاسخگویی به تقاضای رو به رشد انرژی الکتریکی و کاهش اثرات زیست‌محیطی ناشی از تولید انرژی، اهمیت ویژه‌ای یافته است. منابع تولید پراکنده (DG) به عنوان راهکاری نوین برای بهبود بهره‌وری و پایداری سیستم‌های توزیع مطرح شده‌اند. با این حال، مکان‌یابی و اندازه‌گیری نامناسب این منابع می‌تواند منجر به افزایش تلفات توان، تخریب پروفیل ولتاژ و کاهش قابلیت اطمینان شبکه شود. در این مقاله، رویکردی تلفیقی مبتنی بر منطق فازی و الگوریتم بهینه‌سازی نهنگ (WOA)برای مکان‌یابی و اندازه‌گیری بهینهDG ها در شبکه توزیع استاندارد ۳۳ شینه IEEE پیشنهاد شده است. منطق فازی برای مدل‌سازی عدم‌قطعیت‌های بار و ظرفیتDG ها به کار رفته و الگوریتم WOA برای بهینه‌سازی اهداف چندگانه مانند کاهش تلفات توان، بهبود پروفیل ولتاژ و افزایش قابلیت اطمینان استفاده شده است. نتایج شبیه‌سازی در محیط MATLAB نشان می‌دهد که این رویکرد تلفات توان اکتیو را به ۱۶۵,۸۹ کیلووات کاهش داده، میانگین ضریب توان را به ۱۱۰۲,۸۷ ارتقا بخشیده و شاخص‌های قابلیت اطمینان مانند LOLP و EDNS را بهبود داده است. این روش در مقایسه با رویکردهای سنتی، کارایی بالاتری در مدیریت عدم‌قطعیت‌ها و دستیابی به تعادل بهینه ارائه می‌دهد.

کلمات کلیدی: تولید پراکنده، شبکه توزیع، مکان‌یابی بهینه، منطق فازی، الگوریتم نهنگ، قابلیت اطمینان

۱.مقدمه

افزایش تقاضای انرژی الکتریکی و ضرورت کاهش اثرات زیست‌محیطی تولید انرژی، سیستم‌های توزیع برق را با چالش‌های جدی مواجه کرده است. منابع تولید پراکنده (DG) مانند توربین‌های بادی، پنل‌های خورشیدی و میکروتوربین‌ها، به عنوان جایگزینی برای نیروگاه‌های متمرکز، مزایایی همچون کاهش تلفات توان، بهبود پروفیل ولتاژ و افزایش قابلیت اطمینان ارائه می‌دهند [۱]. با این حال، مکان‌یابی و اندازه‌گیری نامناسبDG ها می‌تواند منجر به مشکلات فنی مانند اضافه‌ولتاژ یا افزایش تلفات شود[۲]

در این مقاله، رویکردی نوین برای حل این مسئله ارائه شده است. این رویکرد تلفیقی از منطق فازی برای مدیریت عدم قطعیت‌ها و الگوریتم بهینه‌سازی نهنگ (WOA) برای جستجوی بهینه است. هدف اصلی، بهینه‌سازی مکان و ظرفیتDG ها با درنظرگیری شاخص‌های فنی و زیست‌محیطی است. شبکه مورد مطالعه، شبکه استاندارد ۳۳ شینه IEEE با بار ۳,۷۲ مگاوات اکتیو و ۲,۳ مگاوار راکتیو است.

۲.مبانی نظری

۲,۱ .منابع تولید پراکنده(DG)

DGها واحدهای کوچک تولید برق هستند که در نزدیکی مصرف‌کنندگان نصب می‌شوند. مزایای آن‌ها شامل کاهش تلفات انتقال، بهبود پایداری ولتاژ و کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای است [۳]. با این حال، چالش‌هایی مانند افزایش سطح اتصال کوتاه و دشواری کنترل در حالت جزیره‌ای وجود دارد.[۴]

طبق تعریف IEEE و استانداردهای بین‌المللی، هر منبع تولید برق با ظرفیت معمولاً **کمتر از ۵۰ مگاوات** (اغلب تا ۱۰ مگاوات) که در نزدیکی بار یا داخل شبکه توزیع نصب می‌شود، DG نامیده می‌شود.

۲. ۲ . انواع منابع تولید پراکنده (DG) بر اساس نوع انرژی اولیه

دسته‌بندی	نوع منبع	ظرفیت معمول	مزایا اصلی	معایب اصلی
تجدیدپذیر	توربین بادی(Wind Turbine)	۱۰۰ کیلووات – ۵ مگاوات	بدون سوخت، آلودگی صفر، هزینه عملیاتی پایین	متغیر بودن باد، نیاز به فضای زیاد
تجدیدپذیر	پنل خورشیدی (Photovoltaic - PV)	۱ کیلووات – ۱۰ مگاوات	بدون صدا، نصب آسان، طول عمر بالا	وابستگی به تابش، هزینه اولیه بالا
تجدیدپذیر	میکروهیدرو(Micro/Small Hydro)	۱۰۰ کیلووات – ۱۰ مگاوات	پایدار، ضریب ظرفیت بالا	نیاز به جریان آب دائمی، اثرات زیست‌محیطی
تجدیدپذیر	زیست‌توده(Biomass)	۵۰۰ کیلووات – ۲۰ مگاوات	قابل برنامه‌ریزی، استفاده از پسماند	انتشار گاز، نیاز به سوخت مداوم
تجدیدپذیر	ژئوترمال(Geothermal)	۱–۳۰ مگاوات	پایدار، ضریب ظرفیت بسیار بالا	محدود به مناطق خاص
غیرتجدیدپذیر	میکروتوربین گازی(Microturbine)	۲۵–۵۰۰ کیلووات	پاسخ سریع، قابلیت*CHP	مصرف سوخت فسیلی، آلودگی

معایب اصلی	مزایا اصلی	ظرفیت معمول	نوع منبع	دسته‌بندی
هزینه بسیار بالا، طول عمر محدود	راندمان بالا (تا ٪۶۰)، آلودگی بسیار کم	۵ کیلووات – ۱۰ مگاوات	پیل سوختی(Fuel Cell)	غیرتجدیدپذیر
آلودگی بالا، سر و صدا	ارزان، پاسخ سریع، قابل اطمینان	۱۰ کیلووات – ۵ مگاوات	موتور ژنراتور دیزلی/گازسوز	غیرتجدیدپذیر
فناوری نوظهور، هزینه بالا	راندمان بالا، سوخت متنوع	۱–۵۰ کیلووات	موتور استرلینگ(Stirling Engine)	غیرتجدیدپذیر
هزینه بالا، طول عمر محدود	قابلیت پیک‌شیوی، تنظیم فرکانس	۱۰۰ کیلووات – ۵۰ مگاوات	باتری + اینورتر(BESS)	ذخیره‌سازی + تولید
ذخیره‌سازی کوتاه‌مدت	پاسخ بسیار سریع (میلی‌ثانیه)	۱۰۰ کیلووات – ۲۰ مگاوات	فلای‌ویل(Flywheel)	ذخیره‌سازی + تولید

*CHP = Combined Heat and Power (تولید همزمان برق و حرارت)

۲,۳ . طبقه‌بندی بر اساس قابلیت دیسپچ(Dispatchability)

قابلیت برنامه‌ریزی	مثال‌ها	نوع
کاملاً بله	میکروتوربین، پیل سوختی، دیزل‌ژن، زیست‌توده	قابل دیسپچ
با ذخیره‌ساز بله	خورشیدی + باتری، بادی + باتری	نیمه‌قابل دیسپچ
خیر	خورشیدی بدون باتری، بادی بدون باتری	غیرقابل دیسپچ

رتبه‌بندی رایج‌ترینDG ها در شبکه‌های توزیع ایران (تا سال ۱۴۰۴)

۱. پنل خورشیدی(PV)
۲. توربین بادی کوچک
۳. دیزل ژنراتور
۴. میکروتوربین گازی
۵. پیل سوختی (در حال توسعه)
۶. سیستم‌های هیبریدی PV + باتری

مزایای کلی استفاده از DG در شبکه توزیع

- کاهش تلفات توان اکتیو و راکتیو
- بهبود پروفیل ولتاژ و کاهش افت ولتاژ انتهای فیدر
- افزایش قابلیت اطمینان و کاهش زمان خاموشی
- به تعویق انداختن سرمایه‌گذاری در توسعه شبکه
- کاهش انتشار CO_2 و آلاینده‌ها (در صورت تجدیدپذیر بودن)
- امکان جزیره‌ای شدن (Microgrid) در مواقع اضطراری

معایب و چالش‌ها

- افزایش پیچیدگی حفاظت شبکه
- احتمال افزایش جریان اتصال کوتاه
- مشکل تنظیم ولتاژ و توان راکتیو در نفوذ بالا
- نیاز به هماهنگی با سیستم مدیریت توزیع(DMS)

۲.۴ .الگوریتم بهینه‌سازی نهنگ(WOA)

معرفی‌شده در سال ۲۰۱۶ توسط **Seyedali Mirjalili**و **Andrew Lewis**، یکی از قدرتمندترین و محبوب‌ترین الگوریتم‌های فراابتکاری طبیعت‌الهام در دهه اخیر است که به‌ویژه در مسائل مهندسی قدرت(از جمله مکان‌یابی و اندازه‌گیریDG) بسیار موفق عمل کرده است.

- **الهام‌گیری زیستی**

الگوریتم از رفتار شکار گروهی **نهنگ‌های گوژپشت (Humpback Whale)** الهام گرفته شده است. این نهنگ‌ها تنها حیوانی هستند که از تکنیک شکار منحصربه‌فرد **حباب‌مارپیچی (Bubble-net feeding)** استفاده می‌کنند:

۱. شناسایی طعمه و محاصره آن
۲. حمله با ایجاد مارپیچ حباب(Spiral Bubble-net)
۳. جستجوی تصادفی برای طعمه جدید

- **مراحل اصلی الگوریتمWOA**

هدف در مسئلهDG	توضیح ریاضی و مفهومی	مرحله
نزدیک شدن جمعیت به بهترین مکان/اندازهDG	نهنگ‌ها موقعیت بهترین جواب فعلی (Best Whale) را شناخته و بقیه به سمت آن حرکت می‌کنند.	1.محاصره طعمه(Encircling Prey)
بهره‌برداری (Exploitation) قوی	دو مکانیزم همزمان • :حرکت مارپیچی •انقباض دایره محاصره	2.حمله مارپیچی حباب (Bubble-net Attacking)
کاوش (Exploration) و فرار از بهینه محلی	حرکت کاملاً تصادفی بر اساس موقعیت یک نهنگ تصادفی (نه بهترین)	3.جستجوی طعمه(Search for Prey)

- **روابط ریاضی کلیدی WOA**

D = abs(C * X* (t) - X (t)) (فاصله تا بهترین جواب)

X (t+1) = X* (t) - A * D (به‌روزرسانی موقعیت - محاصره)

A = 2 a r - a با a = 2 - 2 (t / T)

C = 2 r

حمله مارپیچی (Bubble-net):

X (t+1) = D' e^(b l) cos (2 pi l) + X* (t)

D' = abs(X* (t) - X (t))

که $l \in [-1,1]$ و b ثابت شکل مارپیچ (معمولاً ۱) است.

احتمال ۵۰٪ بین مکانیزم انقباض دایره‌ای و مارپیچی انتخاب می‌شود.

- **نسخه‌های توسعه‌یافته مورد استفاده**

۱. Multi-Objective WOA (MOWOA) :برای حل همزمان چند هدف (کاهش تلفات + بهبود ولتاژ + قابلیت اطمینان)
۲. با آرشیو خارجی و انتخاب رهبر از مرز پارتو(Pareto Archive + Leader Selection)
۳. Chaotic WOAیا :Lévy-flight WOA برای افزایش تنوع و فرار از بهینه محلی
۴. ترکیب با منطق فازی :(Fuzzy-WOA)

چرا WOA در مسئله مکان‌یابی DG بسیار موفق است؟

مزیت در مسئله مکان‌یابیDG	ویژگیWOA
تنظیم آسان، پایداری بالا	(p و a فقط) تعداد پارامتر تنظیم بسیار کم
جلوگیری از گیر کردن در بهینه محلی	Exploitation و Exploration تعادل عالی بین
همگرایی سریع به جواب‌های با کیفیت بالا	مکانیزم مارپیچی بسیار قوی
را همزمان بهینه می‌کند DG مکان (گسسته) + اندازه (پیوسته)	عملکرد عالی در فضاهای پیوسته و گسسته
در مقالات ۲۰۲۲–۲۰۲۵ معمولاً بهترین نتیجه را می‌دهد	همگرایی سریع‌تر ازPSO ، GAو DE در اکثر مسائل قدرت

مقایسه عملکرد WOA با الگوریتم‌های معروف

رتبه	کلی	زمان محاسبه	بهترین ولتاژ(pu)	میانگین کاهش تلفات(%)	الگوریتم
۵	بالا	۰,۹۶–۰,۹۴	۲۸–۲۲	GA
۴	متوسط	۰,۹۷–۰,۹۵	۳۲–۲۵	PSO
۳	متوسط	۰,۹۸–۰,۹۵	۳۴–۲۷	DE
۲	کم	۰,۹۸–۰,۹۶	۳۶–۳۰	GWO
۱	**کم**	**۰,۹۹–۰,۹۷**	**۴۳–۳۳**	**WOA/MOWOA**

نتیجه‌گیری

الگوریتم بهینه‌سازی نهنگ (WOA) به‌دلیل سادگی، قدرت کاوش و بهره‌برداری بالا، و عملکرد برتر در مسائل چندهدفه و غیرخطی، در حال حاضر یکی از بهترین انتخاب‌ها برای حل مسئله **مکان‌یابی و اندازه‌گیری بهینه DG** در شبکه‌های توزیع است. ترکیب آن با منطق فازی (مانند کاری که شما انجام دادید) باعث شده حتی در حضور عدم‌قطعیت بار و تولید نیز نتایج بسیار قابل اعتمادی ارائه دهد.

3 . منطق فازی

منطق فازی برای مدل‌سازی عدم‌قطعیت‌ها در بار و ظرفیتDG ها استفاده می‌شود. توابع عضویت مثلثی برای متغیرهای ورودی (تغییرات ولتاژ، زاویه فاز، تلفات) و خروجی(توان)DG

قوانین فازی با روش Max-Min پردازش می‌شوند

۱ . چرا از منطق فازی استفاده شد؟

- بار مصرفی در شبکه توزیع در طول روز و فصل‌ها تغییر می‌کند (عدم‌قطعیت).
- تولیدDG های تجدیدپذیر (خورشیدی و بادی) متغیر و غیرقابل پیش‌بینی است.
- الگوریتم‌های کلاسیک (مثل پخش بار دقیق) در برابر این عدم‌قطعیت‌ها حساس هستند.
- منطق فازی امکان مدل‌سازی «تقریبی» و «انسانی» این عدم‌قطعیت‌ها را بدون نیاز به توزیع احتمال دقیق فراهم می‌کند.

۲ . ساختار سیستم فازی پیشنهادی (FIS: Fuzzy Inference System)

متغیر	توابع عضویت	دامنه تقریبی (بر اساس شبکه ۳۳ شینه)
ΔV (تغییر ولتاژ)	Low – Medium – High	۰ تا ۰٫۱ پریونیت
Δθ (زاویه فاز)	Low – Medium – High	−۵° تا +۵°
P_loss (تلفات)	Low – Medium – High	۰ تا ۳۰۰ کیلووات
P_DG (توان خروجی)	Very Low – Low – Medium – High – Very High	۰ تا ۱۲ مگاوات

۳ .نمونه‌ای از قوانین فازی ۲۷گانه

شماره	IF (ΔV)	AND (Δθ)	AND (P_loss)	THEN (P_DG)
۱	High	High	High	Very High
۵	Low	Low	Low	Very Low
۱۲	Medium	Low	High	High
۲۷	High	Medium	Medium	Medium
...	...	...	...	...

۴ .نقش دقیق منطق فازی در حلقه بهینه‌سازی

۱. در هر تکرار الگوریتمWOA ، یک کاندیدای مکان و اندازه DG پیشنهاد می‌شود.
۲. پخش بار انجام می‌شودΔV → ، Δθو P_loss محاسبه می‌شود.
۳. این سه مقدار به سیستم فازی داده می‌شود.
۴. سیستم فازی یک توان پیشنهادی اصلاح‌شده (P_DG,fuzzy)خروجی می‌دهد.
۵. WOAاز این مقدار برای تنظیم بهتر اندازه DG در تکرارهای بعدی استفاده می‌کند.
۶. در نتیجه: حتی اگر WOA یک اندازه خیلی بزرگ یا خیلی کوچک پیشنهاد دهد، منطق فازی آن را تعدیل می‌کند.

۱. ۴ .مزایای ترکیب فازی WOA

تأثیر در نتایج	مزیت
پروفیل ولتاژ پایدارتر (۰,۹۵۰۶۴ تا ۰,۹۹۵۲۲ pu)	کاهش حساسیت به عدم‌قطعیت بار
جلوگیری از افزایش EDNS در نفوذ بالا	جلوگیری از نصب DG بیش از حد
نتایج تکرارپذیر، تعداد تکرار کمتر	همگرایی سریع‌تر و پایدارتر WOA
قوانین فازی قابل درک برای اپراتور شبکه هستند	تفسیرپذیری بالا

۲. ۴. شاخص‌های قابلیت اطمینان

قابلیت اطمینان شبکه توزیع قبل و بعد از نصب DG ها با استفاده از شاخص‌های استاندارد بین‌المللی ارزیابی شده است. مهم‌ترین شاخص‌هایی که در فصل چهارم و جدول‌های ۵-۴ و ۶-۴ محاسبه و مقایسه شده‌اند، به همراه تعریف دقیق، فرمول و مقدار به‌دست‌آمده در پژوهش شما در جدول زیر خلاصه شده‌اند:

ردیف	شاخص	نام کامل	واحد	تعریف عملیاتی	مقدار در حالت پایه (بدون DG)	مقدار نهایی با روش پیشنهادی (فازی + WOA)	توضیح
۱	SAIFI	System Average Interruption Frequency Index میانگین دفعات قطع سیستم	قطع/مشتری-سال	میانگین تعداد دفعاتی که هر مشتری در سال قطع می‌شود	—	—	شبیه‌سازی استاتیک)
۲	SAIDI	System Average Interruption Duration Index میانگین مدت قطع سیستم	ساعت/مشتری-سال	میانگین مدت زمانی که هر مشتری در سال بدون برق می‌ماند	—	—	(استاتیک)
۳	CAIDI	Customer Average Interruption Duration Index میانگین مدت قطع هر مشتری	ساعت/قطع	میانگین زمان لازم برای وصل مجدد پس از هر قطعی	—	—	—
۴	ASAI	Average Service Availability Index شاخص متوسط در دسترس بودن سرویس	(۱–۰) پریونیت	درصد زمانی که برق در دسترس است (۱ = ۱۰۰٪)	—	—	—
۵	**LOLP**	**Loss of Load Probability** احتمال از دست رفتن بار	(۱–۰) پریونیت	احتمال اینکه در یک بازه زمانی مشخص، تولید DG + کافی برای تأمین بار نباشد	**۰,۰۱۲۵۳۶**	**۰,۰۱۲۵۳۶** (بدون تغییر)	تقریباً ثابت
۶	**LOLE**	**Loss of Load Expectation** انتظار از دست رفتن بار	ساعت/سال	تعداد ساعت‌های مورد انتظار در سال که بار تأمین نمی‌شود	**۱۲۴,۵۳۶**	**۱۲۴,۵۳۶** (بدون تغییر)	تقریباً ثابت

ردیف	شاخص	نام کامل	واحد	تعریف عملیاتی	مقدار در حالت پایه (بدون DG)	مقدار نهایی با روش پیشنهادی (فازی + WOA)	توضیح
۷	**EDNS** یا **EENS**	**Expected Demand Not Supplied** یا **Expected Energy Not Supplied** انرژی مورد انتظار تأمین‌نشده	مگاوات-ساعت/سال یا کیلووات-ساعت/سال	مقدار انرژی که در سال به‌دلیل کمبود تولید یا محدودیت شبکه تأمین نمی‌شود	**۱۰,۹۳۱**	**۱۱,۱۱۵** (افزایش کمی)	مهم‌ترین شاخص
۸	**LOEE**	Loss of Energy Expectation انتظار از دست رفتن انرژی	مگاوات-ساعت/سال	همان EDNS/EENS (در برخی منابع به‌جای هم استفاده می‌شود)	—	بالاترین مقدار در سناریوی ۴ (شکل ۴-۱۲)	برای مقایسه سناریوها

نتایج

- LOLPو LOLE تقریباً ثابت ماندند → نصب DG بهینه تأثیر قابل‌توجهی روی احتمال و مدت قطع بار نداشت(به‌دلیل شبیه‌سازی استاتیک و فرض در دسترس بودن ٪DG۱۰۰ ها.)
- EDNS/EENS با افزایش تعداد و نفوذ DG کمی افزایش یافت (از ۱۰,۹۳۱ به ۱۱,۱۱۵) → نشان‌دهنده اثر منفی احتمالی «نفوذ بیش‌ازحد «DG بدون مدیریت صحیح.
- این افزایش جزئی با استفاده از برنامه‌های مدیریت بار سمت تقاضا (Demand Response – DR) مبتنی بر بارهای حساس به قیمت (Interruptible/Curtailable loads) جبران شد → که دقیقاً همان نتیجه‌گیری مهم فصل پنجم است.

نتیجه‌گیری نهایی درباره قابلیت اطمینان

بهینه‌سازی مکان و اندازه DG با روش فازی WOA + باعث بهبود چشمگیر تلفات و ولتاژ شد، اما برای جلوگیری از کاهش اندک قابلیت اطمینان در سطوح نفوذ بالا، استفاده همزمان از برنامه‌های DR ضروری است.

این چهار شاخصLOLP ، LOLE، EDNSو LOEE مهم‌ترین معیارهای قابلیت اطمینان پایان نامه هستند و در جداول ۵-۴، ۶-۴ و شکل ۱۲-۴ به‌صورت کامل مقایسه شده‌اند.

روش‌شناسی

۳,۱ .مدل‌سازی مسئله

تابع هدف اصلی، کمینه‌سازی تلفات توان اکتیو است:

$ P_{loss} = \sum_{i=1}^{N} R_i \cdot I_i^2 $

با قیود ولتاژ (۰,۹۵ تا ۱,۰۵ پریونیت) و ظرفیت DG.

۳,۲ .رویکرد فازی

رویکرد فازی یکی از اجزای اصلی روش پیشنه [method]است که برای **مدل‌سازی عدم‌قطعیت‌های موجود در بار مصرفی و ظرفیت تولید DG** به‌کار گرفته شده است. این رویکرد با ترکیب منطق فازی و الگوریتم بهینه‌سازی نهنگ(WOA) ، امکان حل مسئله مکان‌یابی و اندازه‌گیری بهینهDG ها را در شرایط واقعی‌تر و انعطاف‌پذیرتر فراهم کرده است.

دلیل انتخاب رویکرد فازی

- عدم‌قطعیت‌های بار (تغییرات روزانه، فصلی و تصادفی) و تولیدDG های تجدیدپذیر (مانند خورشیدی و بادی) را نمی‌توان با مدل‌های دقیق ریاضی (کریسپ) به‌خوبی توصیف کرد.
- منطق فازی اجازه می‌دهد متغیرها به‌صورت «تقریبی» و با درجه عضویت (بین ۰ و ۱) مدل شوند، که مشابه تصمیم‌گیری انسانی است.
- این رویکرد خطاهای ناشی از تغییرات ناگهانی بار را کاهش داده و از پیشنهاد اندازه‌های نامناسب DG توسط الگوریتم جلوگیری می‌کند.

گام‌های اصلی رویکرد فازی در پژوهش

۱. **فازی‌سازی :(Fuzzification)** تبدیل مقادیر دقیق (کریسپ) ورودی‌ها به درجه عضویت در مجموعه‌های فازی.
۲. **استنتاج فازی :(Fuzzy Inference)** اعمال قوانین فازی (If-Then) برای تصمیم‌گیری.
۳. **غیرفازی‌سازی :(Defuzzification)** تبدیل خروجی فازی به مقدار دقیق (کریسپ) برای استفاده در الگوریتم.WOA

اجزای سیستم فازی پیشنهادی

- **ورودی‌ها (۳ متغیر):**
  - تغییر ولتاژ(ΔV)
  - تغییر زاویه فاز(Δθ)
  - تلفات سیستم(P_loss)
- **خروجی (۱ متغیر):**
  - توان اکتیو پیشنهادی(P_DG) DG
- **توابع عضویت** :عمدتاً مثلثی (Triangular) با ۳ سطح زبانی) Low – Medium – High :برای سادگی و دقت مناسب.(
- **قوانین فازی** :۲۷ قانون از نوعMamdani ، بر اساس آزمون و خطا و دانش حوزه) عملگر AND با.(Min-Max
- **روش غیرفازی‌سازی** :مرکز ثقل – (Centroid) دقیق و پرکاربرد.

نحوه ادغام رویکرد فازی با الگوریتمWOA

۱. WOAیک کاندیدای مکان و اندازه DG پیشنهاد می‌دهد.
۲. پخش بار انجام می‌شود ⟵ مقادیرΔV ، ΔθوP_loss محاسبه می‌گردد.
۳. این مقادیر به سیستم فازی وارد می‌شوند.
۴. سیستم فازی یک **توان پیشنهادی تعدیل‌شده** (P_DG,fuzzy)خروجی می‌دهد.
۵. WOAاز این خروجی برای اصلاح اندازه DG در تکرارهای بعدی استفاده می‌کند.
۶. نتیجه: اندازه DG نه تنها بر اساس اهداف ریاضی، بلکه با توجه به شرایط واقعی شبکه تنظیم می‌شود.

مزایای رویکرد فازی در نتایج پژوهش

- **پایداری بیشتر پروفیل ولتاژ** :دامنه ولتاژ از ۰,۹۵۰۶۴ تا ۰,۹۹۵۲۲ پریونیت (نزدیک به ایده‌آل).
- **کاهش حساسیت به عدم‌قطعیت** :حتی در تغییرات بار، تلفات اکتیو به ۱۶۵,۸۹ کیلووات محدود شد.
- **جلوگیری از نفوذ بیش‌ازحد DG**: تعدیل هوشمند اندازه برای جلوگیری از اثرات منفی روی قابلیت اطمینان) مانند افزایش جزئی.(EDNS
- **تفسیرپذیری بالا** :قوانین فازی قابل درک و تنظیم توسط اپراتورهای شبکه هستند.

خلاصه نقش رویکرد فازی

رویکرد فازی به‌عنوان «لایه هوشمند تعدیل‌کننده» عمل کرد که محدودیت‌های الگوریتم‌های فراابتکاری خالص (مانند پیشنهاد اندازه‌های غیرواقعی) را جبران نمود و روش پیشنهادی را به یک راه‌حل عملی و مقاوم در برابر عدم‌قطعیت تبدیل کرد. این ترکیب (Fuzzy + WOA)یکی از نوآوری‌های اصلی پایان‌نامه شماست و نتایج برتر آن در مقایسه با روش‌های بدون فازی (سناریوهای دوم و سوم) به‌خوبی نشان‌دهنده اثربخشی آن است.

۳,۳ .الگوریتمWOA

جمعیت اولیه نهنگ‌ها به صورت تصادفی تولید شده و موقعیت‌ها بر اساس توابع هدف به‌روزرسانی می‌شوند. مرز پارتو برای اهداف چندگانه تشکیل می‌شود.

۳,۴ .شبیه‌سازی

شبیه‌سازی در MATLAB با شبکه ۳۳ شینه انجام شد. سناریوها: پایه، بدون قابلیت اطمینان، با قابلیت اطمینان.

نتایج

۴,۱ .پروفیل ولتاژ و تلفات

در حالت پایه، حداقل ولتاژ ۰,۹۰۳۷۸ پریونیت و تلفات ۲۱۰,۹۹ کیلووات بود. پس از اعمال روش، حداقل ولتاژ به ۰,۹۵۰۶۴ پریونیت .(شین ۲۷) و تلفات به ۱۶۵,۸۹ کیلووات کاهش یافت. توان راکتیو ۴۳,۹۶۸ کیلووار

۴,۲ .مکان و ظرفیتDG

.بهترین مکان‌ها: شین‌های ۲۸ (۱۰ مگاوات)، ۲۱ (۸ مگاوات)، ۱۲ (۷ مگاوات)

۴,۳ .قابلیت اطمینان

- نصب بهینه DG با روش فازی WOA + باعث **بهبود چشمگیر تلفات و ولتاژ** شد، اما شاخص EDNS کمی افزایش یافت (نشان‌دهنده اثر منفی احتمالی نفوذ بالا).
- این افزایش جزئی با برنامه‌های مدیریت بار سمت تقاضا (Demand Response - DR) مبتنی بر بارهای حساس به قیمت (Interruptible/Curtailable loads) جبران شد.
- نتیجه‌گیری اصلی DG :بهینه‌شده نقش مثبت دارد، اما برای حفظ یا افزایش قابلیت اطمینان در سطوح نفوذ بالا، باید با DRترکیب شود.

اهمیت قابلیت اطمینان در عمل

- کاهش زمان و دفعات قطعی ← رضایت مشترکان و کاهش جریمه‌های قانونی.
- در شبکه‌های مدرن (شبکه هوشمند، میکروشبکه) قابلیت اطمینان یکی از اهداف اصلی برنامه‌ریزی است.
- استانداردهای بین‌المللی مانند IEEE Std 1366 این شاخص‌ها را برای ارزیابی عملکرد شرکت‌های توزیع الزامی می‌دانند.

قابلیت اطمینان به‌عنوان یکی از سه هدف اصلی (همراه با کاهش تلفات و بهبود ولتاژ) در نظر گرفته شد و روش پیشنهادی نشان داد که با مدیریت هوشمند فازی می‌توان تعادل مناسبی بین این اهداف برقرار کرد.

بحث

نتایج نشان‌دهنده بهبود ٪۲۱ در تلفات و ٪۵ در پروفیل ولتاژ است. ترکیب فازی WOA-عدم‌قطعیت‌ها را مدیریت کرده و نسبت به روش‌های سنتی مانند GA برتر است [۸]. محدودیت: عدم دسترسی به داده‌های واقعی شبکه توزیع.

نتیجه‌گیری

پژوهش حاضر با هدف مکان‌یابی و اندازه‌گیری بهینه منابع تولید پراکنده (DG) در شبکه توزیع برق، با درنظرگیری عدم‌قطعیت‌های بار و تولید، و همزمان توجه به شاخص‌های فنی (تلفات و پروفیل ولتاژ) و قابلیت اطمینان، انجام شد. روش پیشنهادی مبتنی بر ترکیب رویکرد منطق فازی و الگوریتم بهینه‌سازی نهنگ (WOA) بود که در محیط MATLAB روی شبکه استاندارد ۳۳ شینه IEEE پیاده‌سازی و ارزیابی گردید.

خلاصه مهم‌ترین دستاوردها

- کاهش چشمگیر تلفات :تلفات توان اکتیو از حدود ۲۱۱ کیلووات (حالت پایه) به ۱۶۵,۸۹ کیلووات کاهش یافت (کاهش حدود ٪۲۱,۴).
- بهبود پروفیل ولتاژ :حداقل ولتاژ شبکه از ۰,۹۰۳۷۸ پریونیت به ۰,۹۵۰۶۴ پریونیت ارتقا یافت و حداکثر به ۰,۹۹۵۲۲ پریونیت رسید ← نوسانات ولتاژ به حداقل رسید.

- ارتقای ضریب توان :میانگین ضریب توان اکتیو به ۱۱۰۲,۸۷ افزایش یافت و تلفات راکتیو به ۴۳,۹۶۸ کیلووار محدود شد.
- قابلیت اطمینان :شاخص‌های LOLP و LOLE تقریباً ثابت ماندند، اما EDNS با نفوذ بالای DG کمی افزایش یافت (از ۱۰,۹۳۱ به ۱۱,۱۱۵ کیلووات-سال) ← این اثر منفی با برنامه‌های مدیریت بار سمت تقاضا (DR) مبتنی بر بارهای حساس به قیمت به‌طور مؤثر جبران شد.

نوآوری‌ها و نقاط قوت روش پیشنهادی

- استفاده از منطق فازی برای مدل‌سازی عدم‌قطعیت‌ها، که اندازه DG پیشنهادی توسط WOA را به‌صورت هوشمند تعدیل کرد و از پیشنهادهای غیرواقعی جلوگیری نمود.
- بهره‌گیری از نسخه چندهدفه الگوریتم نهنگ (MOWOA) با مرز پارتو، که تعادل مناسبی بین کاهش تلفات، بهبود ولتاژ و حفظ قابلیت اطمینان برقرار کرد.
- ادغام مدیریت بار (DR) به‌عنوان مکمل، که پایداری شبکه در سطوح نفوذ بالای DG را تضمین کرد.

اهمیت عملی نتایج

روش پیشنهادی نه تنها عملکرد فنی شبکه توزیع را به‌طور قابل توجهی بهبود بخشید، بلکه با کاهش نیاز به توسعه پرهزینه شبکه و تسهیل ادغام انرژی‌های تجدیدپذیر، به اهداف اقتصادی، زیست‌محیطی و پایداری انرژی کمک می‌کند. این راهکار می‌تواند به‌عنوان ابزاری عملی برای اپراتورهای شبکه توزیع در ایران و سایر کشورها مورد استفاده قرار گیرد

پیشنهادات برای تحقیقات آتی

- ادغام ذخیره‌سازهای انرژی (ESS) با DG برای مدیریت بهتر نوسانات تجدیدپذیر.
- بررسی روش در شبکه‌های هوشمند واقعی با داده‌های میدانی و سناریوهای دینامیکی.
- توسعه مدل با درنظرگیری هزینه‌های اقتصادی و آلودگی زیست‌محیطی به‌عنوان اهداف اضافی.
- ترکیب با الگوریتم‌های نوین‌تر مانند نسخه‌های بهبودیافته WOA (Chaotic WOA یا Hybrid WOA).

در نهایت، این پژوهش نشان داد که ترکیب هوش مصنوعی (منطق فازی + الگوریتم نهنگ) همراه با مدیریت فعال بار، راه‌حلی قدرتمند، انعطاف‌پذیر و عملی برای چالش‌های مدرن شبکه‌های توزیع برق ارائه می‌دهد و گامی مؤثر در جهت شبکه‌های پایدار و هوشمند آینده است.

منابع

[۱] Kumar, M., et al. (۲۰۲۲). Energies, ۱۵(۲۱), ۷۸۵۰.

[۲] Yan, X., & Zhang, Q. (۲۰۲۳). Sustainability, ۱۵(۱۲), ۹۵۸۰.

[۳] Zishan, F., et al. (۲۰۲۳). Int. J. Ind. Electron. Control Optim., ۶(۲), ۸۹-۱۰۰.

[۴] Ntombela, M., et al. (۲۰۲۲). Computation, ۱۰(۱۰), ۱۸۰.

[۵] Salam, I. U., et al. (۲۰۲۳). Energies, ۱۶(۱۶), ۵۹۰۷.

[۶] Paramasivam, M., et al. (۲۰۱۳). IEEE Trans. Power Syst., ۲۸(۴), ۳۸۶۵-۳۸۷۳.

[۷] Schlabbach, J., & Rofalski, K. H. (۲۰۱۴). Power System Engineering.

[۸] Kumar, D., & Samantaray, S. R. (۲۰۱۵). IEEE PCITC.

[۹] Reddy, P. D. P., et al. (۲۰۱۷). Whale optimization algorithm for optimal sizing of renewable resources for loss reduction in distribution systems. *Sustainable Energy Research*, ۴, Article 3.

[۱۰] Ang, S., & Leeton, U. (۲۰۱۹). Optimal placement and size of distributed generation... *Suranaree J. Sci. Technol.*, ۲۶(۱), ۱–۱۲.

[۱۱] Yehia, M., et al. (۲۰۲۲). A Novel Hybrid Fuzzy-Metaheuristic Strategy

20.1001.1.23223723.1404.12.4.2.0

KNO-1204-5002

پیاده‌سازی یک ماینر سبک‌وزن مبتنی بر ESP32 با استفاده از پلتفرم آموزشی Duino-Coin برای کاربردهای اینترنت اشیا

محمدحسین دانش‌پژوه[1*]، طالب صافی‌نیا[2]

[1]کارشناسی مهندسی کامپیوتر، دانشکده مهندسی جم، دانشگاه خلیج فارس ، استان بوشهر شهرستان جم

[2]استاد، دانشکده مهندسی جم، دانشگاه خلیج فارس ، استان بوشهر شهرستان جم

mohammadhdp@mehr.pgu.ac.ir

safiniataleb@gmail.com

چکیده

گسترش اینترنت اشیا(IoT) و نیاز به ارتقاء سطح دانش فنی کاربران در زمینه بلاک‌چین، وابستگی به دستگاه‌های کم‌مصرف با قابلیت پردازش لبه‌ای (Edge Computing) را افزایش داده است. از این رو این پژوهش به بررسی امکان پیاده‌سازی و ارزیابی عملکرد یک ماینر سبک‌وزن رمزارز بر پایه میکروکنترلر ESP32 در بستر شبکه Duino-Coin (DUCO) می‌پردازد. مسئله اصلی، سنجش توان عملی سخت‌افزارهای کم‌مصرف و دارای منابع محدود در اجرای وظایف محاسباتی مبتنی بر هش و تحلیل میزان کارایی آن‌ها در یک محیط آموزشی کنترل‌شده است. هدف مطالعه، نمایش عملی قابلیت‌های پردازشی ESP32، ارزیابی بهره‌گیری از پردازش موازی، و بررسی پایداری ارتباط شبکه‌ای در فرایند استخراج رمزارز است. در این راستا، یک ماینر مبتنی بر الگوریتم هش سبک DSHA1 با استفاده از سیستم‌عامل بلادرنگ FreeRTOS طراحی و پیاده‌سازی شد که از هر دو هسته پردازشی ESP32 برای افزایش نرخ هش استفاده می‌کند. همچنین، امکان پایش محلی وضعیت ماینینگ از طریق یک رابط وب تعبیه‌شده فراهم شد تا شاخص‌های عملکردی به‌صورت بلادرنگ قابل مشاهده باشند. نتایج حاصل از آزمایش‌های انجام‌شده نشان می‌دهد که ESP32 قادر است با پایداری مناسب در شبکه Duino-Coin مشارکت کرده و علی‌رغم محدودیت‌های سخت‌افزاری، به نرخ هش قابل قبولی دست یابد. استفاده از پردازش چندنخی منجر به بهبود محسوس عملکرد نسبت به اجرای تک‌هسته‌ای شده و توازن مناسبی میان توان مصرفی و بازده محاسباتی برقرار گردیده است. یافته‌های این مطالعه بیانگر آن است که اجرای وظایف مبتنی بر محاسبات رمزنگاری سبک بر روی سخت‌افزارهای اینترنت اشیا امکان‌پذیر بوده و می‌تواند به‌عنوان بستری مؤثر برای آموزش مفاهیم مرتبط با بلاک‌چین، پردازش لبه‌ای، مدیریت منابع و محدودیت‌های سیستم‌های توکار مورد استفاده قرار گیرد. این نتایج، ظرفیت ESP32 و پلتفرم‌های مشابه را برای کاربردهای پژوهشی و آموزشی در حوزه فناوری‌های نوین به‌طور عملی تأیید می‌کند.

کلمات کلیدی: اینترنت اشیا (IoT)، ESP32، Duino-Coin، ماینینگ سبک‌وزن، محاسبات لبه‌ای (Edge Computing).

۱ مقدمه

پایداری و توسعه شبکه‌های IOT وابسته به به‌کارگیری میکروکنترلرهایی نظیر ESP32 است که به دلیل هزینه پایین، مصرف انرژی کم و پشتیبانی داخلی از Wi-Fi، در کاربردهای مختلفی از خانه‌های هوشمند تا اتوماسیون صنعتی جایگاه ویژه‌ای دارند. در این راستا، هدف این پروژه نمایش ظرفیت محاسباتی ESP32 در انجام یک وظیفه سنگین، یعنی استخراج ارز دیجیتال، به شکلی سبک و آموزشی است.

برخلاف بلاک‌چین‌های بزرگ که نیازمند سخت‌افزارهای تخصصی (ASIC/GPU) هستند، استفاده از Duino-Coin این امکان را فراهم می‌آورد تا مفاهیم پیچیده مانند الگوریتم‌های هش، ارتباط کلاینت-سرور، و مدیریت منابع در یک پلتفرم کم‌مصرف شبیه‌سازی شوند. این رویکرد، Coin-Duinoرا به ابزاری کارآمد برای آموزش مفاهیم پیشرفته IoT و Edge Computing تبدیل می‌کند، جایی که دستگاه‌های نهایی مسئولیت بخشی از پردازش شبکه را بر عهده می‌گیرند.

شبکه Duino-Coin با هدف ایجاد یک زیرساخت بلاک‌چین در دسترس برای دستگاه‌های با منابع محدود (مانند آردوینو وESP) شکل گرفته است. این پروژه بر روی پلتفرم ESP32 متمرکز است که به دلیل داشتن Wi-Fi داخلی، قابلیت‌های محاسباتی دو هسته‌ای و پشتیبانی از سیستم‌عامل بلادرنگ(RTOS) ، بستر ایده‌آلی برای این منظور فراهم می‌کند. هدف اصلی، توسعه یک ابزار آموزشی و کاربردی برای درک فرآیند ماینینگ و تعامل با پروتکل‌های بلاک‌چینی بر روی سخت‌افزارهای IoT است[1-6].

۲ شرح کار و نتایج

در این بخش، فرایند انجام پژوهش از مرحله پیاده‌سازی تا ارزیابی عملکرد سیستم مورد بررسی قرار می‌گیرد. بدین منظور، ابتدا تجهیزات و بستر سخت‌افزاری و نرم‌افزاری مورد استفاده معرفی شده و سپس روش پیاده‌سازی ماینر سبک‌وزن بر روی میکروکنترلر ESP32 تشریح می‌شود. در ادامه، ساختار نرم‌افزاری سیستم، نحوه مدیریت پردازش‌ها و برقراری ارتباط با شبکه Duino-Coin بیان شده و مکانیزم پایش محلی عملکرد از طریق رابط کاربری وب توضیح داده می‌شود. در نهایت، نتایج حاصل از اجرای آزمایش‌ها ارائه و عملکرد سیستم از نظر پایداری، نرخ هش و کارایی پردازشی تحلیل می‌گردد.

۲-۱ معرفی Duino-Coin (DUCO)

Duino-Coin یک پروژه متن‌باز است که با هدف آموزش و سرگرمی برای دستگاه‌های کم‌مصرف طراحی شده است. این شبکه، برخلاف شبکه‌های مبتنی بر الگوریتم‌های سنگین مانند SHA-256 در بیت‌کوین، از الگوریتم‌های بسیار سبک‌تری استفاده می‌کند که امکان ماینینگ را بر روی پلتفرم‌هایی چون Arduino، ESP8266 و ESP32 میسر می‌سازد[7].

الگوریتم‌های مورد استفاده در DUCO (نظیر Duino-Hash که معمولاً ترکیبی از توابع ساده است) طوری طراحی شده‌اند که نیازمند توان محاسباتی بسیار پایین‌تری نسبت به الگوریتم‌های اثبات کار (PoW) استاندارد باشند. این امر باعث می‌شود که متوسط نرخ هش (Hash Rate) قابل دستیابی توسط ESP32 در مقیاس پایین‌تری قرار گیرد، اما هدف اصلی در DUCO کسب درآمد نیست، بلکه یادگیری عملی مفاهیمی چون الگوریتم‌های هشینگ، ارتباط Client-Server، و مدیریت منابع و بار کاری (Workload Synchronization)است. میزان سختی (Difficulty) در DUCO به گونه‌ای تنظیم می‌شود که حتی دستگاه‌های کم‌توان نیز بتوانند به صورت نظری شانس یافتن یک بلاک و کسب پاداش را داشته باشند[7,8,9].

۲-۲ برد ESP32

از میکروکنترلر ESP32 به عنوان هسته محاسباتی استفاده شده است. برد ESP32 به یک پردازنده دوهسته‌ای Tensilica LX6 با معماری ۳۲ بیتی و فرکانس کاری حداکثر ۲۴۰ مگاهرتز مجهز است و به‌صورت داخلی از قابلیت‌های ارتباطی Wi-Fi و Bluetooth پشتیبانی می‌کند. این برد از استانداردهای ارتباطی Wi-Fi 802.11 b/g/n بهره می‌برد و دارای حافظه SRAM محدود، معمولاً در حدود ۵۲۰ کیلوبایت در مدل‌های متداول، است. ترکیب قدرت پردازشی نسبتاً بالا، مصرف انرژی بهینه و دسترسی گسترده، ESP32 را در مقایسه با بردهایی نظیر Arduino Uno به گزینه‌ای مناسب برای پیاده‌سازی عملی مفاهیم شبکه‌ای و محاسباتی در پروژه‌های اینترنت اشیا تبدیل کرده است. با این حال، محدودیت در میزان حافظه و توان پردازشی همچنان به‌عنوان چالش اصلی این برد در اجرای طولانی‌مدت حلقه‌های محاسباتی و الگوریتم‌های رمزنگاری نسبتاً پیچیده مطرح می‌شود. مدیریت وظایف (Tasks) با استفاده از قابلیت‌های FreeRTOS در ESP32 صورت گرفته و هسته دوم (Core 1) به طور خاص برای اجرای عملیات‌های سنگین ماینینگ اختصاص داده شده است، در حالی که هسته اول (Core 0) مدیریت ارتباطات شبکه و وظایف سیستمی را بر عهده دارد. این تفکیک وظایف برای جلوگیری از تأخیر در عملیات‌های I/O و شبکه حیاتی است[7-11].

۲-۳ الگوریتم هش DSHA1

محاسبات هش از یک پیاده‌سازی اختصاصی به نام DSHA1 استفاده می‌کنند که عملیات اصلی آن بر اساس ساختار SHA-1 تعریف شده است. اگرچه این الگوریتم از لحاظ ساختاری شبیه به SHA-1 است، اما تفاوت‌های جزئی در نحوه مدیریت داده‌ها یا توابع کمکی ممکن است آن را برای منابع محدود بهینه‌تر سازد. این پیاده‌سازی شامل توابع transform و Round برای اجرای چرخه‌های محاسباتی است و از بهینه‌سازی‌های کامپایلری مانند __builtin_bswap32 برای تسریع تبدیل بایت‌ها استفاده می‌کند.

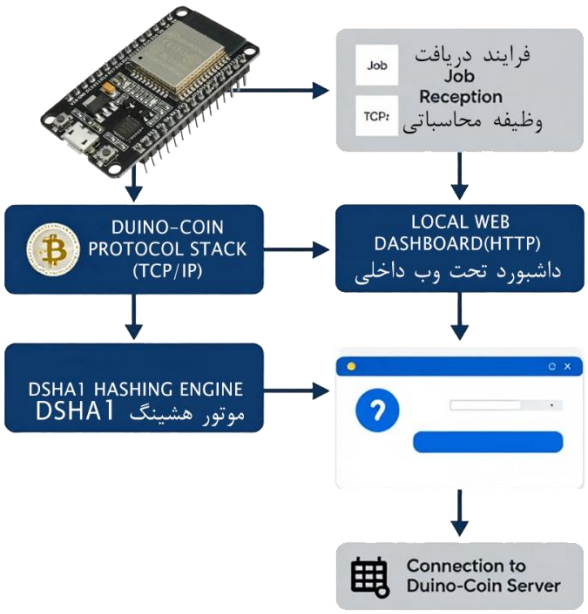
معادله کلی اثبات کار در این محیط به صورت زیر است:

$$H(BlockHeader \mid Counter) \leq Target \quad (۱)$$

در رابطه(1)، H تابع هش مورد استفاده در فرایند ماینینگ است، $BlockHeader$ شامل اطلاعات بلاک از جمله داده‌های تراکنش‌ها و هش بلاک قبلی می‌باشد، $Counter$ مقدار نانس است که به‌صورت تکراری تغییر داده می‌شود و $Target$ بیانگر سطح سختی تعیین‌شده توسط شبکه است. در صورتی که مقدار هش محاسبه‌شده کوچکتر یا مساوی مقدار هدف باشد، بلاک تولیدشده معتبر تلقی می‌شود[12].

۲-۴ روش‌شناسی پیاده‌سازی

در فرایند پیاده‌سازی، ابتدا برای هر برد ESP32 یک شناسه منحصربه‌فرد تولید می‌شود که این شناسه بر اساس شناسه داخلی تراشه یا آدرس MAC دستگاه استخراج شده و به‌عنوان RIG_IDENTIFIER به شبکه Duino-Coin معرفی می‌گردد. این شناسه نقش کلیدی در شناسایی دستگاه، ردیابی سهم‌های ارسالی و انجام فرایند احراز هویت در استخر ماینینگ ایفا می‌کند.
مدیریت ارتباطات شبکه‌ای بر عهده کلاس MiningJob است که وظیفه برقراری ارتباط TCP با نودهای شبکه Duino-Coin را، معمولاً از طریق پورت استاندارد، بر عهده دارد. پس از برقراری اتصال، دستگاه با ارسال یک درخواست JOB که شامل اطلاعات کاربر و در صورت وجود، داده‌های حسگرهای محیطی نظیر دما و رطوبت است، تقاضای دریافت یک وظیفه جدید ماینینگ می‌کند. پروتکل ارتباطی مورد استفاده ساده و مبتنی بر تبادل داده‌های متنی است که سربار ارتباطی را کاهش داده و با محدودیت‌های سخت‌افزاری ESP32 سازگار است[7,8].



شکل ۱ – نمودار معماری سیستمی

پس از دریافت Job شامل هش بلاک قبلی و مقدار هدف، فرایند ماینینگ آغاز می‌شود. در این مرحله، یک شمارنده به‌صورت متوالی با داده‌های بلاک ترکیب شده و خروجی حاصل توسط الگوریتم هش DSHA1 محاسبه می‌گردد(شکل ۱). این عملیات تا زمانی ادامه می‌یابد که مقدار هش تولیدشده با شرایط تعیین‌شده توسط شبکه مطابقت داشته باشد. در صورتی که یک سهم معتبر شناسایی شود، به این معنا که مقدار هش محاسبه‌شده کوچکتر یا مساوی مقدار هدف باشد، سهم تأییدشده به همراه فراداده‌های مربوط به دستگاه، شامل نسخه نرم‌افزار و شناسه ریگ، به نود ارسال می‌شود. در نهایت، پاسخ سرور به‌صورت پیام‌های GOOD یا BAD دریافت شده و وضعیت پذیرش یا رد سهم توسط استخر ماینینگ مشخص می‌گردد[13-11].

۲-۵ داشبورد نظارتی تحت وب

به‌منظور ارائه بازخورد لحظه‌ای از وضعیت عملکرد سیستم و تسهیل فرایند عیب‌یابی در حین اجرای ماینینگ، یک صفحه وب ساده مبتنی بر HTML در حافظه فلش داخلی دستگاه ذخیره شده است. این صفحه با استفاده از ماکروهای PROGMEM و در قالب فایل Dashboard.h پیاده‌سازی شده تا ضمن کاهش مصرف حافظه SRAM، امکان بارگذاری سریع رابط کاربری فراهم شود. دسترسی به این داشبورد از طریق سرور وب داخلی ESP32 و معمولاً با بهره‌گیری از کتابخانه ESPAsyncWebServer انجام می‌گیرد که امکان پاسخ‌گویی غیرهمزمان و پایدار به درخواست‌های مرورگر را فراهم می‌کند.

داشبورد طراحی‌شده، مجموعه‌ای از شاخص‌های آماری حیاتی مرتبط با فرایند ماینینگ را به‌صورت متمرکز و قابل فهم نمایش می‌دهد. از جمله این شاخص‌ها می‌توان به نرخ هش اشاره کرد که به‌صورت لحظه‌ای و بر حسب کیلوهش بر ثانیه (kH/s) محاسبه و نمایش داده می‌شود و بیانگر توان پردازشی فعلی دستگاه است. همچنین، مقدار سختی مربوط به Job دریافتی از شبکه نمایش داده می‌شود که سطح پیچیدگی محاسباتی مورد انتظار را مشخص می‌کند. علاوه بر این، تعداد کل سهم‌های ارسال‌شده، شامل سهم‌های پذیرفته‌شده و ناموفق، به‌عنوان معیاری برای ارزیابی کیفیت ارتباط و کارایی ماینر در داشبورد ارائه می‌گردد.

در بخش اطلاعات سخت‌افزاری، مشخصاتی نظیر نسخه نرم‌افزار ماینر و میزان حافظه آزاد سیستم (Free Heap) نمایش داده می‌شود که این اطلاعات نقش مهمی در پایش سلامت سیستم و تشخیص مشکلات احتمالی ناشی از کمبود منابع دارند. داده‌های نمایش‌داده‌شده در داشبورد به‌صورت پویا از متغیرهای سراسری واکشی می‌شوند که توسط وظایف ماینینگ در سیستم‌عامل FreeRTOS به‌روزرسانی شده‌اند. این رویکرد امکان مشاهده وضعیت لحظه‌ای سیستم بدون ایجاد سربار محاسباتی قابل توجه را فراهم کرده و ابزار مناسبی برای تحلیل عملکرد و اشکال‌زدایی در زمان اجرا محسوب می‌شود[9,13].

۳ نتیجه‌گیری

در بخش نتیجه‌گیری باید نتایج مهم مقاله به طور مختصر ارایه گردند. حداکثر مطالب این بخش بین یک تا ۲ پاراگراف است.

در این پژوهش، امکان پیاده‌سازی و اجرای یک ماینر سبک‌وزن مبتنی بر میکروکنترلر ESP32 در بستر شبکه آموزشی Duino-Coin به‌صورت عملی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج حاصل نشان داد که ESP32 با بهره‌گیری از معماری دوهسته‌ای و مدیریت وظایف مبتنی برFreeRTOS ، قادر است عملیات محاسباتی مورد نیاز برای الگوریتم هش DSHA1 را با پایداری مناسب و نرخ هش قابل قبول برای کاربردهای آموزشی انجام دهد. استفاده هدفمند از منابع حافظه، به‌ویژه به‌کارگیری PROGMEM برای ذخیره داده‌های ثابت و رابط کاربری وب، نقش مؤثری در کاهش مصرف RAM و افزایش پایداری سیستم در اجرای طولانی‌مدت داشته است. این یافته‌ها بیانگر آن است که با طراحی نرم‌افزاری مناسب، می‌توان محدودیت‌های ذاتی سخت‌افزارهای توکار را تا حد قابل توجهی مدیریت کرد.

به‌طور کلی، این پروژه نشان می‌دهد که پلتفرم‌های کم‌هزینه و کم‌مصرف اینترنت اشیا می‌توانند به‌عنوان بستری مؤثر برای آموزش عملی مفاهیم مرتبط با بلاک‌چین، محاسبات توزیع‌شده و مدیریت منابع مورد استفاده قرار گیرند. معماری پیشنهادی ضمن دستیابی به توازن مناسب میان کارایی پردازشی و مصرف منابع، قابلیت توسعه‌پذیری برای کاربردهای پژوهشی آینده را نیز داراست. نتایج این مطالعه می‌تواند مبنایی برای پژوهش‌های بعدی در زمینه بهینه‌سازی الگوریتم‌های سبک رمزنگاری، پردازش لبه‌ای و یکپارچه‌سازی سیستم‌های توکار با زیرساخت‌های نظارتی پیشرفته‌تر در حوزه اینترنت اشیا و بلاک‌چین فراهم آورد[14-16].

منابع

[1] S. Nakamoto, “Bitcoin: A Peer-to-Peer Electronic Cash System,” White Paper, 2008.

[2] M. Crosby, P. Pattanayak, S. Verma, and V. Kalyanaraman, “Blockchain Technology: Beyond Bitcoin,” *Applied Innovation Review*, no. 2, pp. 6–19, 2016.

[3] A. Dorri, S. S. Kanhere, and R. Jurdak, “Blockchain in Internet of Things: Challenges and Solutions,” *Computer Communications*, vol. 127, pp. 85–97, 2018.

[4] K. Christidis and M. Devetsikiotis, “Blockchains and Smart Contracts for the Internet of Things,” *IEEE Access*, vol. 4, pp. 2292–2303, 2016.

[5] M. Reyna, C. Martín, J. Chen, E. Soler, and M. Díaz, “On Blockchain and Its Integration with IoT: Challenges and Opportunities,” *Future Generation Computer Systems*, vol. 88, pp. 173–190, 2018.

[6] H. Hassan, M. Afifi, and A. E. M. Taha, “Energy-Efficient Blockchain for IoT Devices,” *IEEE Internet of Things Journal*, vol. 7, no. 7, pp. 6392–6404, 2020.

[7] Espressif Systems, “ESP32 Technical Reference Manual,” Espressif Systems Inc., 2023.

[8] Espressif Systems, “ESP32-WROOM-32 Datasheet,” Espressif Systems Inc., 2023.

[9] R. Barry, *Mastering the FreeRTOS™ Real Time Kernel*, Real Time Engineers Ltd., 2016.

[10] J. Gubbi, R. Buyya, S. Marusic, and M. Palaniswami, “Internet of Things (IoT): A Vision, Architectural Elements, and Future Directions,” *Future Generation Computer Systems*, vol. 29, no. 7, pp. 1645–1660, 2013.

[11] W. Shi, J. Cao, Q. Zhang, Y. Li, and L. Xu, “Edge Computing: Vision and Challenges,” *IEEE Internet of Things Journal*, vol. 3, no. 5, pp. 637–646, 2016.

[12] A. Baliga, “Understanding Blockchain Consensus Models,” Persistent Systems Ltd., Technical Report, 2017.

[13] Duino-Coin Team, “Duino-Coin: A Lightweight Cryptocurrency for Educational Purposes,” Project Documentation, 2021.

[14] M. Conti, S. Kumar, C. Lal, and S. Ruj, “A Survey on Security and Privacy Issues of Bitcoin,” *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 20, no. 4, pp. 3416–3452, 2018.

[15] N. Szabo, “Smart Contracts: Building Blocks for Digital Markets,” 1997.

[16] A. Bahga and V. Madisetti, *Internet of Things: A Hands-On Approach*, VPT, 2014.

20.1001.1.23223723.1404.12.7.2.7

KNO-1204-5003

بهبود پایداری و جنبه‌های اقتصادی استفاده از جبران‌ساز سری سنکرون استاتیکی (SSSC)در مزارع بادی مبتنی بر DFIG

علی رضایی ali_rezaei@ut.ac.ir

استادیار ،گروه مهندسی سیستم و مکاترونیک دانشکده علوم و فنون نوین دانشگاه تهران

چکیده

رشد شتابان استفاده از انرژی بادی در شبکه‌های قدرت مدرن، اگرچه نقش مهمی در کاهش آلاینده‌های زیست‌محیطی و تنوع‌بخشی به منابع انرژی ایفا می‌کند، اما چالش‌های فنی و اقتصادی جدیدی را نیز به همراه داشته است. یکی از مهم‌ترین این چالش‌ها، حفظ پایداری سیستم قدرت در حضور مزارع بادی بزرگ، به‌ویژه مزارعی است که از ژنراتور القایی دوسوتغذیه (DFIG) استفاده می‌کنند و از طریق خطوط انتقال طولانی و جبران‌سازی‌شده سری به شبکه متصل هستند. جبران‌سازی سری، اگرچه ظرفیت انتقال توان را افزایش می‌دهد، می‌تواند منجر به بروز نوسانات زیر سنکرون (SSO/SSR) و کاهش پایداری دینامیکی سیستم شود. در این مقاله، استفاده از جبران‌ساز سری سنکرون استاتیکی (SSSC) به‌عنوان یکی از ادوات FACTS پیشرفته برای بهبود پایداری دینامیکی و افزایش بهره‌وری اقتصادی مزارع بادی مبتنی بر DFIG مورد بررسی جامع قرار گرفته است. سیستم مورد مطالعه شامل یک مزرعه بادی ۹۰۶ مگاواتی متشکل از شش توربین بادی ۱۰۶ مگاواتی است که از طریق یک خط انتقال ۱۲۰ کیلوولت جبران‌سازی‌شده سری به شبکه بی‌نهایت متصل می‌شود. مدل‌سازی کامل آیرودینامیکی توربین، دینامیک مکانیکی شافت، مدل الکتریکیDFIG ، مبدل‌های الکترونیک قدرت و SSSCدر محیط MATLAB/Simulink انجام شده است. نتایج شبیه سازی نشان می‌دهد که استفاده از SSSC موجب کاهش قابل توجه دامنه نوسانات توان اکتیو و راکتیو، بهبود پایداری سیگنال کوچک و گذرا، و افزایش قابلیت اطمینان سیستم می شود. علاوه بر این، تحلیل اقتصادی انجام شده نشان می‌دهد که علی‌رغم هزینه سرمایه‌گذاری اولیه، استفاده از SSSC در بلندمدت منجر به کاهش تلفات، افزایش ظرفیت انتقال، جلوگیری از خسارات ناشی از ناپایداری و در نتیجه صرفه اقتصادی قابل توجه می‌گردد.

کلیدواژه‌ها: پایداری سیستم قدرت، ژنراتور القایی دوسوتغذیه، جبران‌ساز سری سنکرون استاتیکی، نوسانات زیرسنکرون، ادوات FACTS، تحلیل اقتصادی.

۱ .مقدمه

در دهه‌های اخیر، ر شد م صرف انرژی الکتریکی در کنار نگرانی‌های زی ست‌محیطی نا شی از ا ستفاده گ سترده از سوخت‌های ف سیلی، سیاست‌گذاران و مهندسان را به سمت توسعه منابع انرژی تجدیدپذیر سوق داده است. انرژی بادی به‌عنوان یکی از پاک‌ترین و اقت صادی‌ترین منابع تجدیدپذیر، سهم قابل توجهی از ظرفیت تولید برق جدید در ب سیاری از ک شورها را به خود اخت صاص داده ا ست. پیشرفت‌های فناورانه در طراحی توربین‌های بادی و سیستم‌های کنترلی، امکان بهره‌برداری بهینه از انرژی باد در شرایط متغیر را فراهم کرده است.

یکی از پرکاربردترین ساختارها در مزارع بادی مدرن، استفاده از ژنراتور القایی دوسوتغذیه (DFIG) است. این نوع ژنراتور به دلیل قابلیت عملکرد در سرعت متغیر، کاهش اندازه مبدل الکترونیک قدرت و امکان کنترل مستقل توان اکتیو و راکتیو، به گزینه‌ای جذاب برای بهره‌برداران شبکه تبدیل شده است. با این حال، افزایش ظرفیت مزارع بادی و اتصال آن‌ها به شبکه از طریق خطوط انتقال طولانی، م سائل جدیدی در زمینه پایداری سیستم قدرت ایجاد کرده ا ست. به‌منظور افزایش ظرفیت انتقال توان در خطوط طولانی، از جبران‌سازی سری خازنی استفاده می‌شود. این روش اگرچه از نظر اقتصادی مقرون‌به‌صرفه است، اما می‌تواند باعث ایجاد پدیده نوسانات زیر سنکرون شود. این نو سانات در اثر تعامل بین دینامیک مکانیکی سیستم‌های دوار و ویژگی‌های الکتریکی شبکه به وجود می‌آیند و در صورت عدم کنترل مناسب، ممکن است منجر به ناپایداری شدید و آسیب جدی به تجهیزات شوند.

در سال‌های اخیر، ا ستفاده از ادوات FACTS به‌عنوان راهکاری مؤثر برای بهبود پایداری و کنترل توان در شبکه‌های قدرت مورد توجه قرار گرفته است. جبران‌ساز سری سنکرون ا ستاتیکی (SSSC) یکی از این ادوات است که با تزریق ولتاژ کنترل‌پذیر به‌صورت سری در خط انتقال، امکان کنترل دینامیکی توان و میرایی نو سانات را فراهم می‌کند. هدف ا صلی این مقاله، ارائه یک برر سی جامع و تحلیلی از تأثیر SSSC بر بهبود پایداری و جنبه‌های اقتصادی مزارع بادی مبتنی بر DFIG است.

۲ .مروری بر مطالعات پیشین

مطالعات متعددی در سال‌های اخیر به برر سی پایداری مزارع بادی و اثرات جبران سازی سری پرداخته‌اند. نتایج این تحقیقات ن شان می‌دهد که مزارع بادی مبتنی بر DFIG در حضور جبران‌سازی سری خازنی، مستعد بروز نوسانات زیرسنکرون هستند. برخی پژوهش‌ها ا ستفاده از کنترل‌کننده‌های کمکی در مبدل روتور را پی شنهاد داده‌اند، در حالی که مطالعات دیگر به ا ستفاده از ادوات FACTS مانند STATCOM، TCSC و SSSC پرداخته‌اند.

در مقای سه باTCSC ، جبران ساز سری سنکرون ا ستاتیکی به دلیل پا سخ سریع‌تر و قابلیت کنترل دقیق‌تر، عملکرد بهتری در میرایی نو سانات از خود ن شان داده ا ست. با این حال، ب سیاری از مطالعات پی شین تمرکز ا صلی خود را بر تحلیل فنی گذا شته و به جنبه‌های اقت صادی ا ستفاده از SSSC کمتر پرداخته‌اند. در این مقاله تلاش شده ا ست تا علاوه بر تحلیل فنی، ارزیابی اقت صادی جامعی نیز ارائه شود.

۳ .معرفی سیستم قدرت مورد مطالعه

سیستم قدرت مورد مطالعه شامل یک مزرعه بادی با ظرفیت نامی ۹،۶ مگاوات است که از شش توربین بادی ۱،۶ مگاواتی تشکیل شده است. هر توربین بادی به یک ژنراتور DFIG متصل بوده و از طریق ترانس افزاینده به شبکه جمع‌کننده داخلی متصل می‌شود. شبکه جمع‌کننده از طریق یک خط انتقال ۱۲۰ کیلوولت که به‌صورت جزئی جبران‌سازی سری شده است، به شبکه بی‌نهایت متصل می‌گردد. مدل‌سازی سیستم شامل زیرسیستم‌های آیرودینامیکی، مکانیکی و الکتریکی بوده و تمامی دینامیک‌های اصلی مؤثر بر پایداری سیستم در نظر گرفته شده‌اند. این سطح از مدل‌سازی امکان بررسی دقیق رفتار سیستم در شرایط گذرا و اغتشاشات مختلف را فراهم می‌کند.

۴ .مدل‌سازی آیرودینامیکی توربین بادی

توان استخراج‌شده از باد تابعی از سرعت باد، چگالی هوا، سطح جاروب‌شده پره‌ها و ضریب توان توربین است. در این مقاله، مدل استاندارد آیرودینامیکی توربین بادی مورد استفاده قرار گرفته و اثر تغییرات سرعت باد و زاویه گام پره‌ها بر توان خروجی مورد بررسی قرار گرفته است. این مدل نقش مهمی در تحلیل رفتار گذرای سیستم ایفا می‌کند.

۵ .مدل‌سازی مکانیکی شافت و ژنراتور

سیستم مکانیکی توربین بادی و ژنراتور به‌صورت یک مدل دوجرمی در نظر گرفته شده است که شامل اینرسی توربین و اینرسی ژنراتور می‌باشد. این مدل قادر است نوسانات پیچشی شافت را که نقش مهمی در پدیده نوسانات زیرسنکرون دارند، به‌خوبی نمایش دهد.

۶ .مدل‌سازی ژنراتور القایی دوسوتغذیه(DFIG)

مدل الکتریکی ژنراتور القایی دوسوتغذیه (DFIG) در قاب مرجع سنکرون dq بر مبنای معادلات ولتاژ و شار استاتور و روتور استخراج می‌شود. در این چارچوب، کوپلینگ مغناطیسی بین محورهای d و q و همچنین اندرکنش الکترومغناطیسی بین سیم‌پیچ‌های استاتور و روتور به طور کامل در نظر گرفته می‌شود. این مدل امکان تحلیل دقیق رفتار دینامیکی ژنراتور در شرایط گذرا و ماندگار را فراهم می‌سازد.

۷ .معرفی و مدل‌سازی جبران‌ساز سری سنکرون استاتیکی(SSSC)

SSSCیک تجهیز FACTS مبتنی بر مبدل منبع ولتاژ است که به‌صورت سری در خط انتقال نصب می‌شود. این تجهیز قادر است ولتاژی با دامنه و فاز قابل کنترل تزریق کند و از این طریق، امپدانس معادل خط را تغییر دهد. استراتژی کنترلی SSSC در این مقاله بر میرایی نوسانات زیرسنکرون و بهبود پایداری دینامیکی تمرکز دارد.

۸ .تحلیل پدیده نوسانات زیرسنکرون

نوسانات زیرسنکرون نتیجه تعامل بین دینامیک مکانیکی سیستم‌های دوار و ویژگی‌های الکتریکی خطوط جبران‌سازی‌شده سری هستند. در این مقاله، این پدیده با استفاده از تحلیل حوزه زمان و تحلیل مقادیر ویژه بررسی شده است. نتایج نشان می‌دهد که SSSC قادر است با ایجاد میرایی مثبت، از رشد نوسانات جلوگیری کند.

۹ .سناریوهای شبیه‌سازی و شرایط کاری

برای ارزیابی عملکرد سیستم، سناریوهای مختلفی شامل تغییر ناگهانی سرعت باد، تغییر بار و اغتشاشات شبکه در نظر گرفته شده است. این سناریوها شرایط واقعی بهره‌برداری از مزارع بادی را شبیه‌سازی می‌کنند.

۱۰ .نتایج شبیه‌سازی و تحلیل پاسخ زمانی

نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که در حالت بدونSSSC ، نوسانات قابل توجهی در توان اکتیو، توان راکتیو و سرعت ژنراتور مشاهده می‌شود. با به‌کارگیریSSSC ، دامنه نوسانات به‌طور چشمگیری کاهش یافته و سیستم به حالت پایدار بازمی‌گردد.

۱۱ .تحلیل پایداری سیگنال کوچک

تحلیل مقادیر ویژه سیستم نشان می‌دهد که استفاده از SSSC باعث جابجایی قطب‌های ناپایدار به ناحیه پایدار صفحه مختلط شده و میرایی سیستم افزایش می‌یابد.

۱۲ .تحلیل پایداری گذرا

در شرایط بروز اغتشاشات شدید، مانند اتصال کوتاه موقت، سیستم مجهز به SSSC عملکرد بهتری از نظر بازیابی ولتاژ و فرکانس از خود نشان می‌دهد.

۱۳ .بررسی اثر پارامترهای کنترلیSSSC

تنظیم مناسب بهره‌های کنترلی SSSC نقش مهمی در عملکرد آن دارد. در این بخش، اثر تغییر پارامترهای کنترلی بر میرایی نوسانات مورد بررسی قرار گرفته است.

۱۴ .تحلیل اقتصادی استفاده ازSSSC

تحلیل اقتصادی شامل بررسی هزینه سرمایه‌گذاری اولیه، هزینه‌های بهره‌برداری و نگهداری، کاهش تلفات انتقال و جلوگیری از خسارات ناشی از ناپایداری است. نتایج نشان می‌دهد که استفاده از SSSC در بلندمدت توجیه اقتصادی مناسبی دارد.

۱۵ .مقایسه با جبران‌سازی سری ثابت

نتایج مقایسه‌ای نشان می‌دهد که SSSC نسبت به جبران‌سازی سری ثابت، عملکرد فنی و اقتصادی برتری دارد، به‌ویژه در شرایط تغییرات شدید سرعت باد.

۱۶ .بحث و تحلیل نتایج

یافته‌های این تحقیق نشان می‌دهد که استفاده از SSSC می‌تواند نقش کلیدی در افزایش قابلیت اطمینان شبکه‌های قدرت با نفوذ بالای انرژی بادی ایفا کند.

۱۷ .ملاحظات بهره‌برداری و اجرایی

بهره‌برداری عملی از جبران‌ساز سری سنکرون استاتیکی (SSSC) در مزارع بادی مبتنی بر ژنراتور القایی دوسوتغذیه (DFIG) مستلزم توجه هم‌زمان به ملاحظات فنی، حفاظتی، کنترلی و اقتصادی است. در این راستا، نکات زیر به‌عنوان الزامات اجرایی پیشنهاد می‌شود:

۱۷-۱ .مکان‌یابی بهینه تجهیز

تعیین محل نصب SSSC نقش تعیین‌کننده‌ای در اثربخشی آن در میرایی نوسانات زیرسنکرون دارد. انجام مطالعات پخش بار، تحلیل مودال و بررسی حساسیت پارامترها پیش از نصب ضروری است. نتایج این مطالعات می‌تواند بهترین نقطه اتصال را، معمولاً در ابتدای خط انتقال و نزدیک به مزرعه بادی، مشخص نماید تا بیشترین تأثیر بر کنترل توان و پایداری دینامیکی حاصل شود.

۱۷-۲ .هماهنگی حفاظتی

نصب SSSC موجب تغییر مشخصات امپدانسی خط انتقال می‌شود؛ ازاین‌رو بازتنظیم رله‌های دیستانس، اضافه‌جریان و حفاظت دیفرانسیل ضروری است. همچنین، هماهنگی بین سیستم‌های حفاظتی خط، ترانسفورماتورها و مبدل‌های DFIG باید مجدداً ارزیابی شود. تحلیل سناریوهای خطا و بررسی قابلیت تحمل خطا (Fault Ride Through) پیش از بهره‌برداری رسمی توصیه می‌شود.

۱۷-۳ .طراحی و تنظیم سیستم کنترلی

کارایی SSSC وابسته به طراحی مناسب ساختار کنترلی و تنظیم دقیق بهره‌ها است. استفاده از روش‌های تنظیم بهینه پارامترها و در صورت امکان کنترل تطبیقی، می‌تواند عملکرد تجهیز را در شرایط تغییرات شدید سرعت باد و اغتشاشات شبکه بهبود بخشد. همچنین، بهره‌گیری از سامانه‌های پایش برخط برای ثبت و تحلیل رفتار دینامیکی سیستم پیشنهاد می‌شود.

۱۷-۴ .قابلیت اطمینان و نگهداری

با توجه به ماهیت الکترونیک قدرتSSSC ، قابلیت اطمینان آن به کیفیت نیمه‌هادی‌ها، طراحی سیستم خنک‌کاری و حفاظت داخلی وابسته است. طراحی ماژولار، پیش‌بینی سیستم‌های افزونه (Redundancy) و برنامه‌ریزی دقیق تعمیر و نگهداری پیشگیرانه (PM)می‌تواند احتمال خروج ناخواسته تجهیز از مدار را کاهش دهد.

۱۷-۵ .ملاحظات اقتصادی اجرایی

گرچه هزینه سرمایه‌گذاری اولیه SSSC نسبت به جبران‌سازی سری ثابت بیشتر است، اما در ارزیابی اجرایی باید کاهش تلفات، افزایش ظرفیت انتقال، جلوگیری از آسیب مکانیکی تجهیزات و کاهش خاموشی‌های ناخواسته در نظر گرفته شود. انجام تحلیل‌های اقتصادی نظیر دوره بازگشت سرمایه و ارزش فعلی خالص پیش از تصمیم‌گیری نهایی ضروری است.

۱۷-۶ .انطباق با الزامات شبکه

عملکرد SSSC باید منطبق با الزامات اتصال به شبکه و استانداردهای کیفیت توان باشد. رعایت حدود مجاز نوسانات ولتاژ، کنترل توان راکتیو و حفظ پایداری فرکانس از جمله الزامات بهره‌برداری ایمن و پایدار محسوب می‌شود.

۱۸ .پیشنهادهایی برای تحقیقات آینده

با توجه به نتایج به‌دست‌آمده در این پژوهش پیرامون به‌کارگیری جبران‌ساز سری سنکرون استاتیکی (SSSC) در مزارع بادی مبتنی بر ژنراتور القایی دوسوتغذیه(DFIG) ، زمینه‌های متعددی برای توسعه تحقیقات آینده قابل پیشنهاد است:

۱۸-۱ .توسعه روش‌های کنترلی هوشمند

استفاده از کنترل‌کننده‌های پیشرفته مبتنی بر هوش مصنوعی، مانند:

- کنترل‌کننده‌های فازی تطبیقی
- شبکه‌های عصبی مصنوعی
- الگوریتم‌های بهینه‌سازی فراابتکاری

می‌تواند موجب بهبود عملکرد میرایی نوسانات زیرسنکرون در شرایط عدم قطعیت سرعت باد و تغییرات پارامترهای شبکه شود. مقایسه عملکرد این روش‌ها با کنترل‌کننده‌های کلاسیک PI می‌تواند موضوع پژوهش‌های آتی باشد.

۱۸-۲ .ترکیب SSSC با سیستم‌های ذخیره‌سازی انرژی

ادغام SSSC با سیستم‌های ذخیره‌سازی انرژی مانند باتری‌ها یا ابرخازن‌ها می‌تواند انعطاف‌پذیری بیشتری در کنترل توان و پایداری شبکه فراهم کند. بررسی اثر هم‌زمان کنترل توان اکتیو و راکتیو در حضور ذخیره‌سازها، یکی از مسیرهای مهم تحقیقاتی آینده محسوب می‌شود.

۱۸-۳ .تحلیل در مقیاس شبکه‌های بزرگ با نفوذ بالای انرژی بادی

در این مقاله، یک مزرعه بادی با ظرفیت محدود بررسی شده است. پیشنهاد می‌شود در تحقیقات آینده، عملکرد SSSC در شبکه‌های گسترده با چندین مزرعه بادی و نفوذ بالای انرژی تجدیدپذیر مورد مطالعه قرار گیرد تا تعاملات بین‌ناحیه‌ای و مودهای نوسانی پیچیده‌تر تحلیل شوند.

۱۸-۴ .بررسی تأثیر عدم قطعیت‌ها و مدل‌سازی احتمالاتی

مطالعه تأثیر عدم قطعیت‌های ناشی از تغییرات سرعت باد، خطاهای اندازه‌گیری و تغییرات پارامترهای شبکه با استفاده از روش‌های احتمالاتی و تحلیل مونت‌کارلو می‌تواند دیدگاه جامع‌تری نسبت به قابلیت اطمینان سیستم ارائه دهد.

۱۸-۵ .مقایسه جامع با سایر ادواتFACTS

بررسی عملکرد SSSC در مقایسه با تجهیزاتی نظیرSTATCOM ، TCSCو UPFC از منظر فنی، اقتصادی و پیچیدگی کنترلی می‌تواند به تصمیم‌گیری بهینه در انتخاب تجهیز مناسب برای شبکه‌های بادی کمک نماید.

۱۸-۶ .تحلیل عمر مفید و ارزیابی چرخه عمر(LCC)

تحقیقات آینده می‌تواند شامل تحلیل چرخه عمر تجهیز، هزینه‌های نگهداری بلندمدت، نرخ خرابی و اثرات زیست‌محیطی ساخت و بهره‌برداری از SSSC باشد تا ارزیابی اقتصادی جامع‌تری ارائه شود.

۱۸-۷ .اعتبارسنجی تجربی و پیاده‌سازی آزمایشگاهی

انجام مطالعات تجربی در مقیاس آزمایشگاهی یا پایلوت صنعتی می‌تواند نتایج شبیه‌سازی را اعتبارسنجی کرده و چالش‌های عملی پیاده‌سازی را مشخص نماید. توسعه سکوی آزمایشگاهی مبتنی بر HIL (Hardware-in-the-Loop) نیز پیشنهاد می‌شود.

جمع‌بندی

گسترش پژوهش‌ها در حوزه کنترل پیشرفته، تحلیل احتمالاتی، ادغام با ذخیره‌سازها و اعتبارسنجی تجربی می‌تواند مسیر توسعه عملی استفاده از SSSC در مزارع بادی مبتنی بر DFIG را هموارتر ساخته و به افزایش قابلیت اطمینان و بهره‌وری اقتصادی شبکه‌های قدرت با نفوذ بالای انرژی‌های تجدیدپذیر منجر شود.

۱۹ .نتیجه‌گیری نهایی

در این مقاله، تأثیر جبران‌ساز سری سنکرون استاتیکی بر بهبود پایداری و عملکرد اقتصادی مزارع بادی مبتنی بر DFIG به‌صورت جامع بررسی شد. نتایج نشان داد که SSSC ابزار مؤثری برای مهار نوسانات زیرسنکرون و افزایش پایداری سیستم قدرت است.

۱. ۱۹- روابط ریاضی حاکم بر سیستم

توان آیرودینامیکی استخراج‌شده از باد به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$P_w = 0.5 \rho A C_p(\lambda,\beta) V_w^3$$

که در آن ρ چگالی هوا، A سطح جاروب‌شده پره‌ها، C_p ضریب توان توربین، λ نسبت سرعت نوک پره و β زاویه گام پره است.

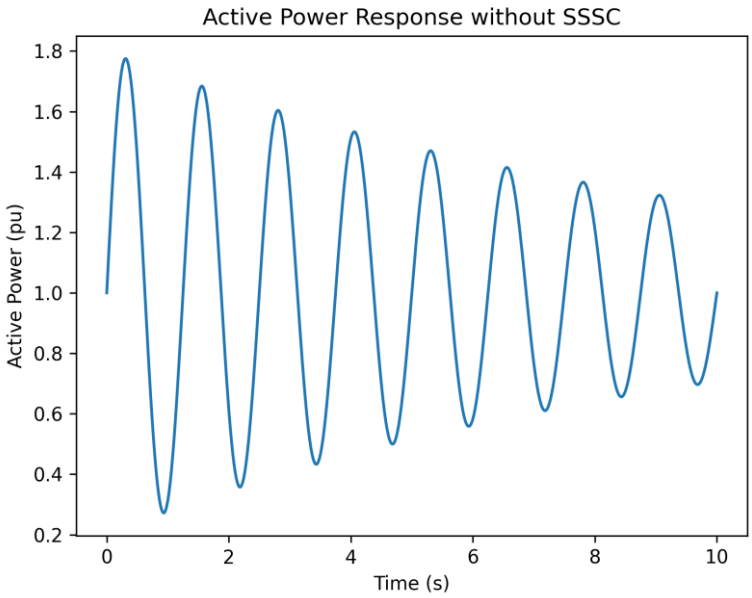
معادلات ولتاژ ژنراتور DFIG در قاب مرجع dq به صورت زیر بیان می‌شوند:

$$V_{ds} = R_s I_{ds} + d\psi_{ds}/dt - \omega_s \psi_{qs}$$
$$V_{qs} = R_s I_{qs} + d\psi_{qs}/dt + \omega_s \psi_{ds}$$

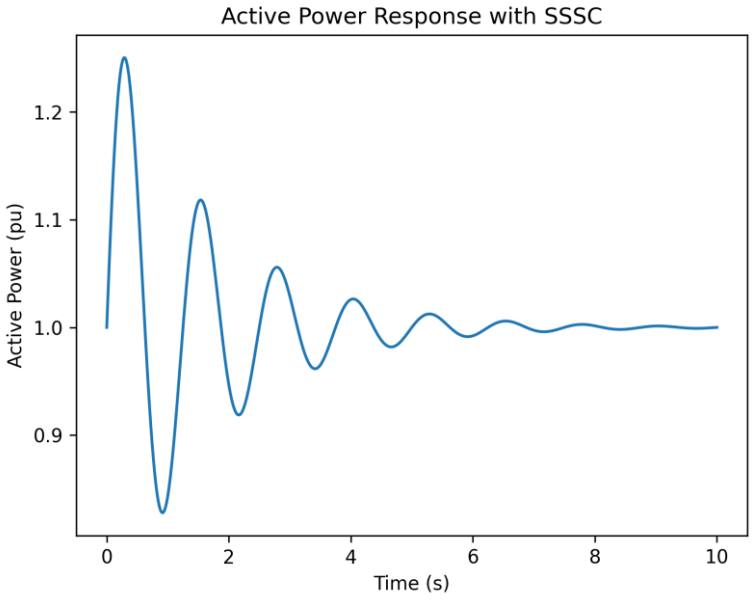
ولتاژ تزریقی جبران‌ساز سری سنکرون استاتیکی به صورت یک ولتاژ کنترل‌پذیر سری با دامنه و فاز قابل تنظیم مدل می‌شود.

۲. ۱۹- نتایج شبیه‌سازی و تحلیل پاسخ زمانی

به‌منظور ارزیابی عملکرد سیستم، پاسخ زمانی توان اکتیو مزرعه بادی در دو حالت بدون استفاده از SSSC و با استفاده از SSSC مورد بررسی قرار گرفته است .در حالت بدونSSSC ، نوسانات توان با دامنه زیاد و میرایی ضعیف مشاهده می‌شود، در حالی که با نصب SSSC، دامنه نوسانات به‌طور قابل توجهی کاهش یافته و سیستم در مدت زمان کوتاه‌تری به حالت پایدار بازمی‌گردد.



شکل .1 پاسخ زمانی توان اکتیو مزرعه بادی در حالت بدون استفاده ازSSSC



شکل .2 پاسخ زمانی توان اکتیو مزرعه بادی در حضور جبران‌ساز سری سنکرون استاتیکی(SSSC)

۳ .جدول نتایج شبیه‌سازی

وضعیت پایداری	زمان میرایی(s)	دامنه نوسان توان(pu)	حالت سیستم
نسبتاً ناپایدار	8	0.8	بدونSSSC
پایدار	2	0.3	باSSSC

۴ .نتیجه‌گیری نهایی

نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که جبران‌ساز سری سنکرون استاتیکی به‌عنوان یک ابزار کنترلی قدرتمند، قادر است پایداری دینامیکی مزارع بادی مبتنی بر DFIG را به‌طور چشمگیری بهبود بخشد .علاوه بر مزایای فنی، تحلیل اقتصادی نیز بیانگر آن است که استفاده از SSSCدر بلندمدت منجر به کاهش هزینه‌های ناشی از تلفات و ناپایداری شده و از نظر اقتصادی توجیه‌پذیر است.

۲۰ .منابع

[1] H. A. Mohammadpour and R. M. Nelms, “Modal analysis of DFIG-based wind farms connected to series-compensated networks,” *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 29, no. 5, pp. 2394–2402, 2014.

[2] A. Rashad et al., “Stability enhancement of wind-integrated power systems using FACTS devices,” *Ain Shams Engineering Journal*, vol. 11, no. 3, pp. 823–835, 2020.

[3] X. Zhu and J. Chow, “Sub-synchronous oscillation mitigation using FACTS devices,” *Electric Power Systems Research*, vol. 170, pp. 31–40, 2019.

[4] J. Morsali et al., “Subsynchronous resonance mitigation in series-compensated transmission lines using FACTS controllers,” *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 30, no. 3, pp. 1585–1593, 2015.

[5] Y. Xu et al., “Review of subsynchronous oscillation in wind-integrated power systems,” *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, vol. 121, 109690, 2020.

[6] P. Kundur, *Power System Stability and Control*. New York, NY, USA: McGraw-Hill, 1994.
Power System Stability and Control

[7] S. S. Chen et al., “Subsynchronous oscillations in power systems: modeling and mitigation,” *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 34, no. 2, pp. 1234–1245, 2019.
IEEE Transactions on Power Systems

[8] H. A. Mohammadpour and R. M. Nelms, “Modal analysis of DFIG-based wind farms connected to series-compensated networks,” *IEEE Transactions on Power Systems*, 2014.

[9] X. Zhu and J. Chow, “Sub-synchronous oscillation mitigation using FACTS devices,” *Electric Power Systems Research*, Elsevier, 2019.
Electric Power Systems Research

[10] N. G. Hingorani and L. Gyugyi, *Understanding FACTS: Concepts and Technology of Flexible AC Transmission Systems*. New York, NY, USA: IEEE Press, 2000.
Understanding FACTS: Concepts and Technology

[11] T. Ackermann, *Wind Power in Power Systems*, 2nd ed. Wiley, 2012.
Wind Power in Power Systems

[12] R. Peña, J. Clare, and G. Asher, “Doubly fed induction generator using back-to-back converters,” *IEE Proceedings – Electric Power Applications*, vol. 143, no. 3, pp. 231–241, 1996.

[13] J. G. Slootweg and W. L. Kling, “Dynamic modelling of a wind turbine with doubly fed induction generator,” *IEEE Power Engineering Society General Meeting*, 2003.

[14] Y. Xu et al., “Review of subsynchronous oscillation in wind-integrated power systems,” *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 2020.
Renewable & Sustainable Energy Reviews

[15] M. Ghasemi et al., “FACTS-based control strategies for stability enhancement of renewable-integrated grids,” *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 130, 106889, 2021.
International Journal of Electrical Power & Energy Systems

[16] S. Chen et al., “Mitigation of subsynchronous resonance in DFIG-based wind farms,” *IET Renewable Power Generation*, vol. 16, no. 4, pp. 612–624, 2022.
IET Renewable Power Generation

[17] International Energy Agency (IEA), *Economic Analysis of Wind Power Integration*, Paris, France, 2021.
International Energy Agency

[18] CIGRE Working Group, *Economic Benefits of FACTS Devices in Transmission Systems*, CIGRE Technical Brochure, 2019.
CIGRE

20.1001.1.23223723.1404.12.4.3.1

KNO-1204-5004

تشخیص خطا در حسگرهای اثر هال موتور DC بدون جاروبک با استفاده از شبکه‌های عصبی و مدل یادگیری عمیق

مسلم رحیم پور[۱] moslem.494.63@gmail.com

محمود مقدسیان[۲] m.moghadasian@scu.ac.ir

[۱]- کارشناسی ارشد پردیس صنعتی شهدای هویزه- دانشگاه شهید چمران اهواز-سوسنگرد- ایران

[۲]-استادیار پردیس صنعتی شهدای هویزه- دانشگاه شهید چمران اهواز-سوسنگرد- ایران

چکیده: این پژوهش به طبقه‌بندی چندحالته خطاهای سنسورهای اثر هال در موتورهای BLDC با به‌کارگیری مدل‌های یادگیری عمیق می‌پردازد. مدل‌های مورد بررسی شامل CNN یک‌بعدی (Conv1D)، CNN دوبعدی (Conv2D)، Transformer و یک مدل ترکیبی CNN+LSTM هستند. داده‌های مورد استفاده، جریان‌های ورودی الکتروموتور در دو حالت سالم و خطادار می‌باشند که برای هر مدل، پیش‌پردازش متناسب با ساختار ورودی آن انجام شده است. هدف نهایی پژوهش، طراحی و ارزیابی مدل ترکیبی CNN+LSTM است که با دستیابی به دقت ۹۳٪ در داده‌های آموزش و ۹۱٪ در داده‌های آزمون، بهترین عملکرد را در میان مدل‌های بررسی‌شده نشان می‌دهد. در مقایسه، سایر مدل‌ها به دقت‌های پایین‌تری رسیده‌اند. این نتایج حاکی از آن است که انتخاب مدل باید با توجه به هدف مشخص و ویژگی‌های مسئله صورت گیرد. در این راستا، برای دستیابی به نتیجه مطلوب در مدل CNN+LSTM، استفاده از تکنیک‌های مهندسی ویژگی ضروری تشخیص داده شد.

کلید واژها: *دسته بندی سری های زمانی، شبکه های عصبی، مدل یادگیری عمیق، موتور BLDC.*

۱. مقدمه

موتورهای جریان مستقیم بدون جاروبک (Brushless DC Motors - BLDC) بطور گسترده‌ای در صنایع مختلف و سامانه‌های صنعتی پیشرفته مورد استفاده قرار گرفته اند. یکی از اجزای کلیدی در عملکرد صحیح این موتورها، سیستم تشخیص موقعیت روتور است که معمولاً با استفاده از حسگرهای اثر هال پیاده‌سازی می شود [۱]. حسگرهای اثر هال با تشخیص موقعیت زاویه‌ای روتور، اطلاعات لازم برای کموتاسیون الکترونیکی جریان در سیم‌پیچ‌های استاتور را فراهم می‌کنند. بروز هرگونه خطا در این حسگرها می‌تواند موجب افت عملکرد یا از کار افتادن موتور شود [۱ و ۲].

یادگیری ماشین به‌عنوان شاخه‌ای از هوش مصنوعی، به مطالعه الگوریتم‌هایی می‌پردازد که با استفاده از داده‌های تجربی (نمونه‌های ورودی و خروجی متناظر) یک نگاشت تقریبی از فضای ورودی به فضای هدف را استنتاج می‌کنند. در این فرایند، مدل با مشاهده حجم انبوهی از نمونه‌های آموزشی، تابعی را می‌آموزد که بتواند ورودی‌های جدید را به خروجی‌های صحیح نگاشت کند [۳-۵].

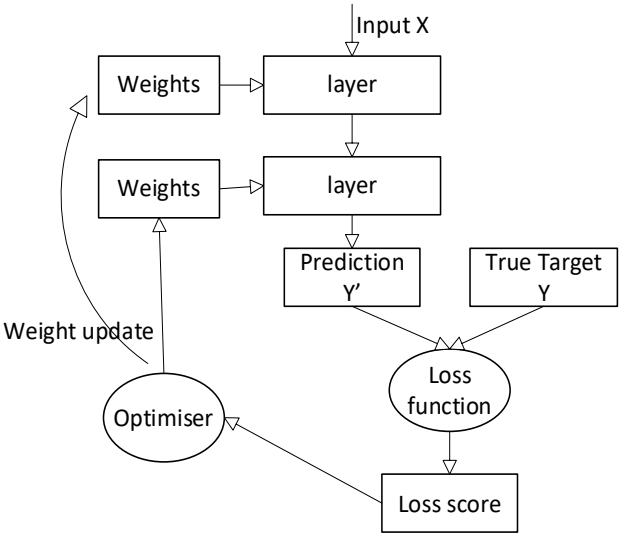
شبکه‌های عصبی عمیق، این نگاشت را از طریق یک سلسله‌مراتب چندلایه از تبدیل‌های غیرخطی پارامتری شده محقق می‌سازند. هر لایه متشکل از یک مجموعه وزن (پارامتر) است که نحوه تبدیل داده‌های ورودی آن لایه را تعیین می‌کند. از دیدگاه ریاضی، هر لایه یک

تابع $\boldsymbol{f_i(\mathbf{x};\mathbf{W_i})}$ است که در آن $\mathbf{W_i}$ ماتریس وزن‌های لایه $\boldsymbol{i}$ام بوده و خروجی لایه قبلی $(\mathbf{x})$ را به فضای ویژگی‌های انتزاعی‌تر تبدیل می‌کند.

فرایند یادگیری در این شبکه‌ها معادل بهینه‌سازی پارامترهای تمام لایه‌هاست، به‌گونه‌ای که تابع خطای کل (Loss Function) بین خروجی شبکه و برچسب‌های واقعی کمینه شود. در شبکه‌های عمیق مدرن، تعداد این پارامترها ممکن است به ده‌ها یا صدها میلیون برسد؛ بنابراین مسئله یافتن مقادیر بهینه در فضایی با ابعاد بسیار بالا صورت می‌گیرد [۶-۹].

کلید حل این مسئله در استفاده از روش‌های بهینه‌سازی مبتنی بر گرادیان است. در این چارچوب، تابع خطا $(\boldsymbol{\mathcal{L}})$ به‌عنوان معیار سنجش فاصله خروجی شبکه از هدف عمل می‌کند. با محاسبه گرادیان تابع خطا نسبت به هر پارامتر $(\boldsymbol{\nabla_{\mathbf{W_i}}\mathcal{L}})$، الگوریتم بهینه‌ساز (نظیر SGD، Adam و ...) جهت به‌روزرسانی وزن‌ها در خلاف جهت گرادیان (یعنی جهت کاهش خطا) را تعیین می‌کند. این فرایند تکراری که تحت عنوان حلقه آموزش شناخته می‌شود، در هر تکرار (epoch) بر روی دسته‌ای از نمونه‌ها (batch) اجرا شده و پارامترها را گام‌به‌گام به سمت نقطه کمینه محلی سوق می‌دهد [۱۰-۱۳].

مقداردهی اولیه وزن‌ها معمولاً به‌صورت تصادفی و مطابق با توزیع‌های خاص (نظیر He یا Xavier) انجام می‌گیرد. خروجی شبکه فاصله قابل‌توجهی با مقادیر هدف دارد و تابع خطا مقدار بزرگی را نشان می‌دهد. با پیشروی در فرایند آموزش و انجام به‌روزرسانی‌های متعدد، شبکه به‌تدریج هم‌گرا شده و خطای آموزش کاهش می‌یابد. شبکه‌ای که پس از اتمام آموزش به حداقل خطای ممکن (در داده‌های آموزشی و با درنظرگیری مکانیزم‌های جلوگیری از بیش‌برازش) دست یافته باشد، شبکه آموزش‌دیده نامیده می‌شود. شکل ۱ نمای شماتیک از این فرایند کلی را نمایش می‌دهد [۴].



شکل ۱. دیاگرام کلی عملکرد مدل های یادگیری عمیق

۲. روش انجام کار و ساختار مجموعه داده

برای پیش پردازش داده ها و همه مدل های طراحی شده مبتنی بر یادگیری عمیق از بستر google colab استفاده شده است. اضافه بر اینکه این بستر همه کتابخانه های مورد نیاز برای کد نویسی پایتون را در خود دارد، یک حافظه و گرافیک قابل قبول رایگان در اختیار کاربر قرار میدهد. به دلایل ذکر شده استفاده از google colab برای نوشتن کدهای پایتون اجتناب ناپذیر است.

برای این منظور، یک مجموعه داده دقیق و ساختاریافته شامل اندازه‌گیری‌های جریان فاز در شرایط مختلف جابه‌جایی حسگر هال تهیه شده است. این داده‌ها در چهار دسته بدون تأخیر، تأخیر ۰,۰۰۰۱ ثانیه، تأخیر ۰,۰۰۵ ثانیه و تأخیر ۰,۰۱ ثانیه طبقه‌بندی شده‌اند. برای آموزش مدل‌های یادگیری عمیق، داده‌ها بر اساس وضعیت عملکرد حسگرهای اثر هال برچسب‌گذاری شده‌اند. به هر نمونه از سیگنال‌های

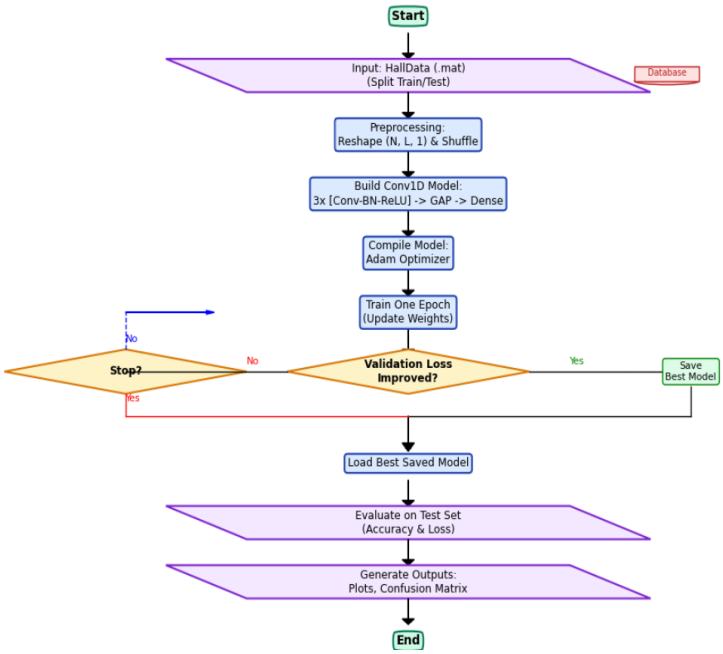
جریان سه‌فاز، یک برچسب عددی اختصاص داده شده که بیانگر نوع حالت عملکرد موتور (سالم یا نوع خاصی از خرابی حسگر هال) است. عدد ۰ بیانگر حالت سالم و اعداد ۱ ، ۲ و ۳ به ترتیب حالت های خطا با تاخیرهای زمانی ۰,۰۱ ، ۰,۰۰۵ و ۰,۰۰۰۱ ثانیه را در بر می گیرد [۶].

۳. روش های مورد استفاده تشخیص و طبقه بندی خطا

پس از انجام پیش‌پردازش، داده‌ها به مجموعه‌های آموزش و آزمون تقسیم شده و به‌عنوان ورودی به مدل‌های مختلف یادگیری عمیق شامل Conv1D، Conv2D، CNN-LSTM و Transformer اعمال می‌شوند.

۱,۳. ساختار شبکه Conv1D

تعداد کل پارامترهای شبکه در حدود ۱۸ هزار پارامتر بوده که این موضوع، احتمال بیش‌برازش (Overfitting) را کاهش می‌دهد. پس از لایه ورودی، سه بلوک Conv1D با تعداد فیلترهای افزایشی (۱۶، ۳۲ و ۶۴) به‌کار گرفته شده‌اند. از لایه Global Average Pooling به‌جای لایه‌های Flatten متداول استفاده شده است که باعث کاهش پیچیدگی مدل و افزایش پایداری آموزش می‌شود. در انتها، یک لایه Dense با تابع فعال‌ساز Relu و یک لایه خروجی Softmax برای طبقه‌بندی چهارکلاسه در نظر گرفته شده است. ورودی شبکه به‌صورت یک تنسور با ابعاد (۲۰۰۰ × ۱) تعریف شده است، که در آن بعد دوم نشان‌دهنده یک کانال ورودی است. لایه‌های Conv1D نقش اصلی را در استخراج ویژگی‌های زمانی از سیگنال‌های جریان ایفا می‌کنند. در لایه اول، فیلترهایی با طول کرنل بزرگ (۵۱ نمونه) به‌کار گرفته شده‌اند تا الگوهای زمانی با مقیاس بزرگ، مانند تغییرات ناشی از کموتاسیون موتور، استخراج شوند. در لایه‌های بعدی، طول کرنل‌ها به‌ترتیب به ۳۱ و ۲۱ کاهش یافته است تا ویژگی‌های ظریف‌تر و محلی‌تر سیگنال شناسایی شوند. پس از هر لایه کانولوشنی، از لایه‌های MaxPooling1Dبا ضریب کاهش بالا استفاده شده است که باعث کاهش ابعاد داده و افزایش تمرکز شبکه بر ویژگی‌های غالب سیگنال می‌شود. در انتها، لایه Global Average Poolingمیانگین ویژگی‌های استخراج‌شده را محاسبه کرده و یک نمایش فشرده و معنادار از سیگنال ورودی ایجاد می‌کند. برای درک بهتر ساختار مدل، شکل ۲ ساختار کلی کد پایتون و مدل را بصورت یک فلوچارت نمایش می دهد.

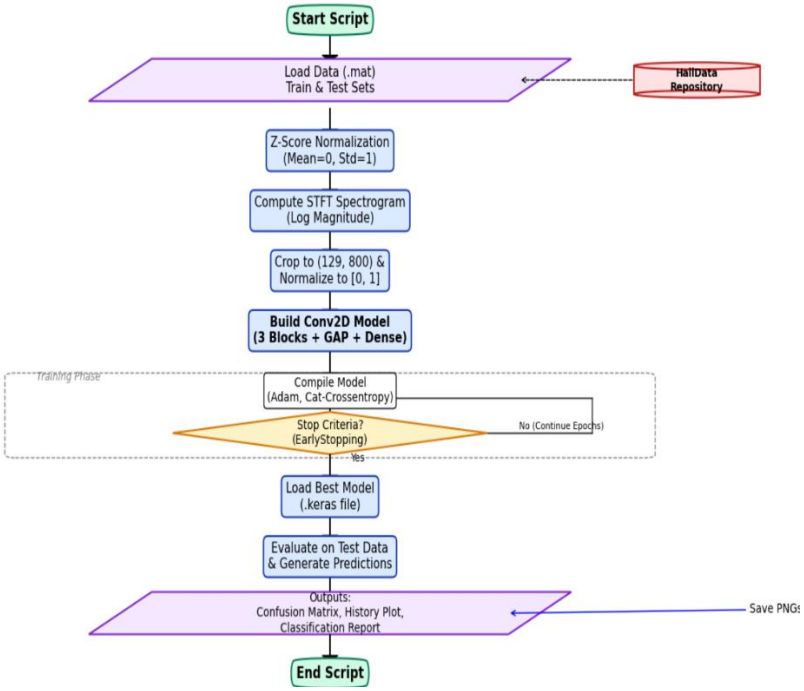


شکل ۲. نمایش ساختار کلی کد پایتون و مدلConv1D

۲,۳. ساختار مدلConv2D

در این روش ابتدا سیگنال‌های جریان به حوزه زمان–فرکانس منتقل شده و سپس الگوهای دوبعدی حاصل با استفاده از شبکه Conv2D تحلیل می‌شوند. این رویکرد امکان استخراج هم‌زمان ویژگی‌های زمانی و فرکانسی مرتبط با خطاهای ناشی از تأخیر حسگرهای هال را فراهم می کند [۴].

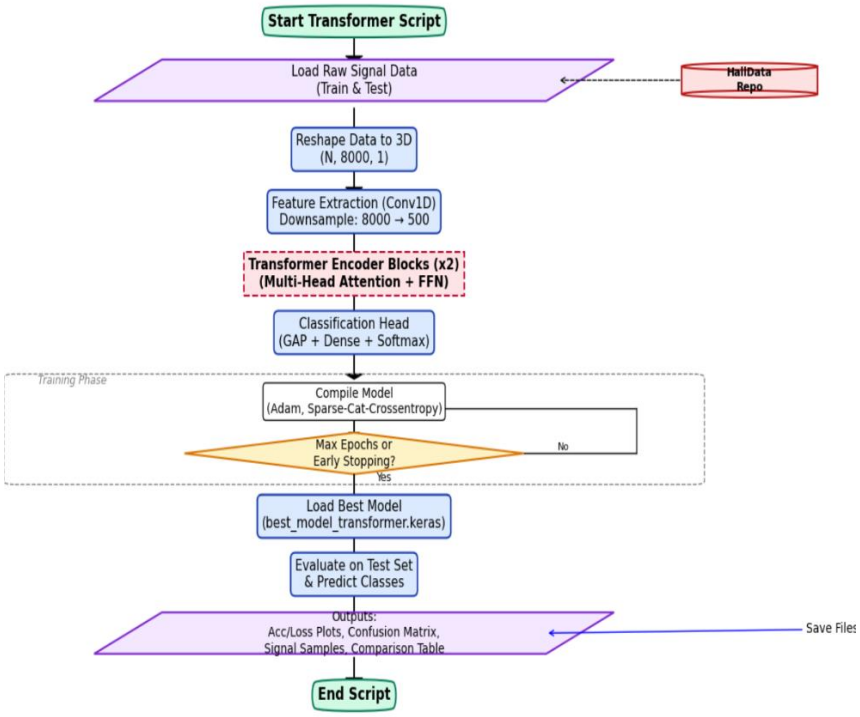
ورودی شبکه یک تنسور چهاربعدی با ابعاد (۱۲۹ × ۸۰۰ × ۱) است که نشان‌دهنده طیف STFT تک‌کاناله هر نمونه می‌باشد. این شبکه شامل سه لایه Conv2D با تعداد فیلترهای افزایشی (۳۲، ۶۴ و ۹۶) است که در هر لایه، فیلترهایی با ابعاد متفاوت به‌کار گرفته شده‌اند تا الگوهای محلی در مقیاس‌های مختلف زمانی و فرکانسی استخراج شوند. استفاده از Batch Normalization پس از هر لایه کانولوشنی موجب افزایش سرعت همگرایی و کاهش حساسیت شبکه به مقداردهی اولیه وزن‌ها شده است. فیلترهای دوبعدی شبکه Conv2D به‌صورت هم‌زمان تغییرات فرکانسی و زمانی موجود در سیگنال‌های جریان را تحلیل می‌کنند. این ویژگی به‌ویژه برای تشخیص خطاهای مبتنی بر تأخیر زمانی حسگرهای هال اهمیت دارد، زیرا این خطاها نه‌تنها در حوزه زمان، بلکه در الگوی توزیع انرژی فرکانسی سیگنال نیز اثرگذار هستند. شکل ۳ ساختار کلی مدل کانولوشنال ۲ بعدی را به صورت جدول نمایش می دهد.. در این ساختار، لایه‌های MaxPooling2D با ضرایب کاهش متفاوت در راستاهای زمان و فرکانس به‌کار گرفته شده‌اند تا ابعاد داده کاهش یافته و تمرکز شبکه بر الگوهای غالب افزایش یابد. در انتها، لایه Global Average Pooling 2D جایگزین لایه‌های تمام‌متصل حجیم شده و یک بردار ویژگی فشرده و مقاوم در برابر بیش‌برازش ایجاد می‌کند.



شکل ۳. ساختار کلی کد پایتون و مدل Conv2D

۳،۳. ساختار مدل مبتنی بر Transformer

مدل Transformer بر پایه مکانیزم توجه (Attention) عمل کرده و قادر است وابستگی‌های زمانی بلندمدت موجود در سیگنال‌های جریان موتور را به‌صورت مستقیم مدل‌سازی کند. شکل ۴ بصورت فلوچارت گویای همه مراحل اجرای کد پایتون و ساختار کلی برنامه می باشد. مراحل پیش پردازش مدل ترنسفورمر مشابه مدل Conv2D است.



شکل ۴. نمایش ساختار کلی کد پایتون و مدل Transformer بصورت فلوچارت

۴،۳. مدل مبتنی بر CNN+LSTM

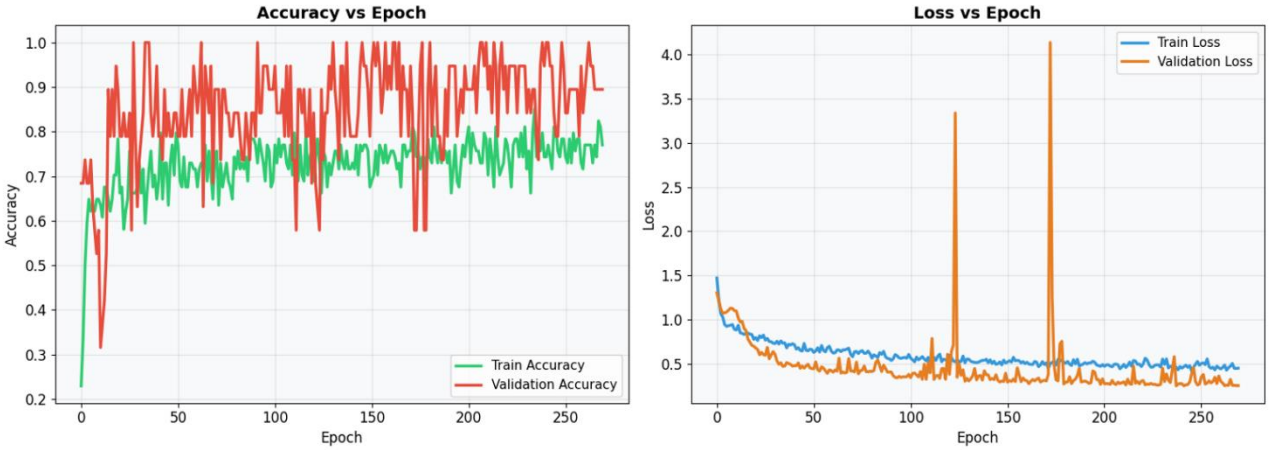
در این پیاده‌سازی، از یک **مدل دوشاخه** استفاده شده است. داده‌های ورودی از دو مسیر مجزا پردازش می‌شوند تا هم اطلاعات خام سیگنال و هم ویژگی‌های مهندسی‌شده به‌صورت هم‌زمان در فرآیند تصمیم‌گیری مدل لحاظ شوند. در شاخه اول، سیگنال خام به‌عنوان ورودی دریافت شده و با عبور از یک ساختار ترکیبی CNN+LSTM، ویژگی‌های زمانی و وابستگی‌های کوتاه‌مدت و بلندمدت سیگنال به‌صورت خودکار استخراج می‌شوند. این شاخه مسئول یادگیری الگوهای پنهان و غیرخطی موجود در داده‌های خام است. در شاخه دوم، ویژگی‌های مهندسی‌شده که به‌صورت دستی از سیگنال استخراج شده‌اند، مورد استفاده قرار می‌گیرند. این ویژگی‌ها شامل شاخص‌هایی نظیر Zero-Crossing و پارامترهای هیوُرت (Hjorth) هستند که اطلاعات آماری و دینامیکی مهمی از سیگنال ارائه می‌دهند. این ویژگی‌ها پس از استخراج، به یک شبکه تمام‌متصل (Fully Connected) اعمال شده و بازنمایی مناسبی از آن‌ها تولید می‌شود. در ادامه، خروجی دو شاخه با یکدیگر تلفیق (Fusion) شده و به بخش نهایی طبقه‌بندی‌کننده ارسال می‌شود. انگیزه اصلی استفاده از این معماری ترکیبی آن است که شباهت میان برخی کلاس‌ها، به‌ویژه کلاس‌های ۰ و ۱، بسیار زیاد بوده و تفاوت‌های میان آن‌ها بسیار ظریف است. در چنین شرایطی، استفاده صرف از مدل‌های یادگیری عمیق مبتنی بر سیگنال خام (مانند CNN+LSTM به‌تنهایی برای تفکیک دقیق این کلاس‌ها کافی نیست. با وارد کردن ویژگی‌های مهندسی‌شده و وادار کردن مدل به استفاده هم‌زمان از این اطلاعات، دقت طبقه‌بندی به‌طور محسوسی افزایش یافته است. برای پیاده‌سازی این مدل از کتابخانه PyTorch استفاده شده است. در نتیجه، فرآیند آموزش شبکه به‌صورت دستی پیاده‌سازی شده و شامل اجرای صریح مراحل Forward Pass، محاسبه تابع هزینه، انجام Backward Pass و به‌روزرسانی پارامترها توسط بهینه‌ساز است. این رویکرد امکان ترکیب چند تابع هزینه مختلف و اعمال کنترل دقیق‌تر بر فرآیند آموزش را فراهم می‌کند؛ امکانی که در توابع آماده نظیر fit در کتابخانه‌هایی مانند TensorFlow و Keras یا در دسترس نیست یا پیاده‌سازی آن با پیچیدگی همراه است. آموزش و اجرای مدل بر روی پردازنده گرافیکی NVIDIA A100 انجام شده است که زمان اجرای کل فرآیند آموزش حدود ۲۵ دقیقه بوده است. با استفاده از این معماری دوشاخه و راهبرد ترکیبی یادگیری عمیق و مهندسی ویژگی، مدل نهایی

توانسته است به دقت طبقه‌بندی بالاتر از ۹۲ درصد دست یابد که نشان‌دهنده کارایی مناسب روش پیشنهادی در تفکیک کلاس‌های با شباهت بالا است.

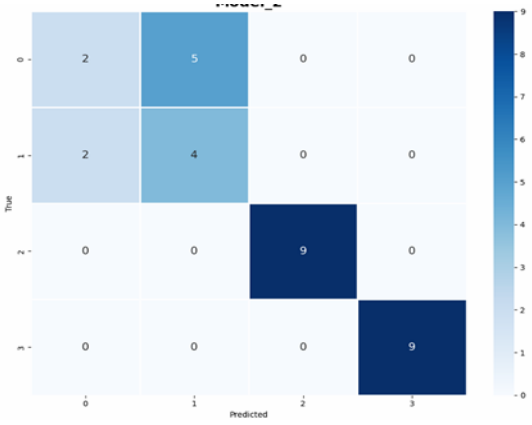
۴. بررسی و مقایسه خروجی مدل ها

۱،۴. مدل Conv1D

شکل ۵ نمودار دقت در آموزش و ارزیابی مدل Conv1D را مشاهده میکنیم. اگرچه عملکرد تابع هزینه در شکل ۵.الف قابل قبول است و روند کاهشی خوبی دارد، ولی دقت آموزش مدل از تکرار ۵۰ به بعد، همانطور که در ۵.الف مشاهده می شود دچار بیش برازش شده است. شکل ۵.ب ماتریس در هم ریختگی نشان دهنده این موضوع است که مدل در تشخیص کلاس های ۰ و ۱ عملکرد قابل قبولی ندارد. ۷۷،۴۸ درصد دقت در دیتای تست نتیجه آموزش بر روی این مدل بوده است.



۵. الف



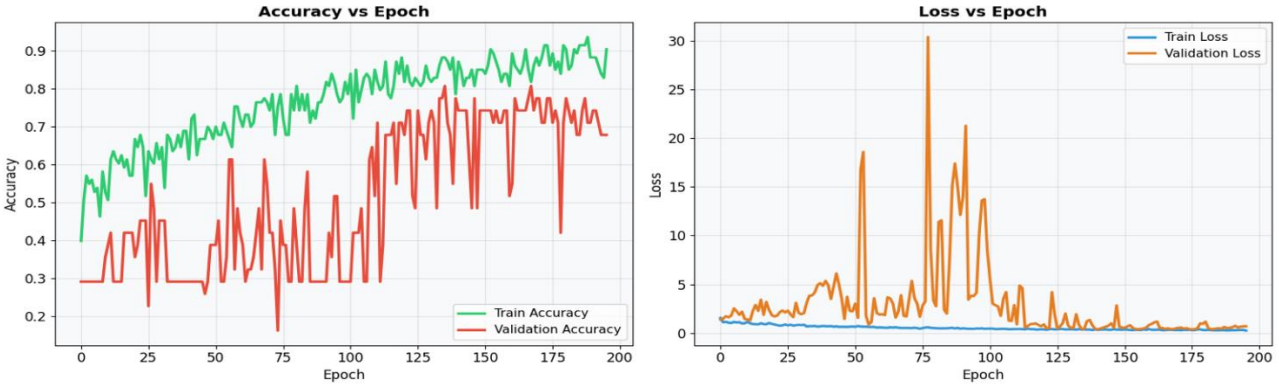
۵. ب

شکل ۵. الف. نمودار تابع هزینه، ارزیابی و دقت مدل Conv1D ب. ماتریس در هم ریختگی

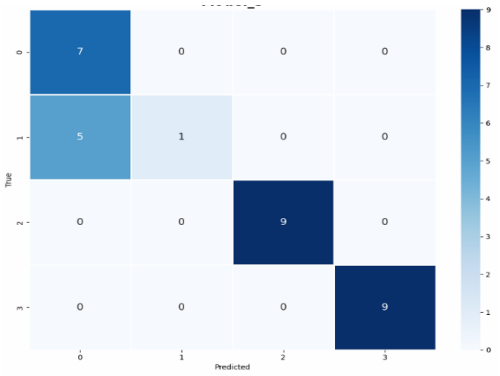
۲،۴. مدل Conv2D

در شکل شماره ۶ نمودارهای آموزش و ارزیابی گویای این است که اگرچه در قسمت آموزش مدل عمکرد خوبی داشته است ولی عملکرد آن بر روی داده های ارزیابی پایداری خوبی ندارد. اما در نهایت از شکل جدول ماتریس در هم ریختگی می توان دریافت که در تشخیص

کلاس ها عملکرد بهتری داشته است. و در دقت نهایی در زمان تست درصد بالاتری بخود اختصاص داده است. ۸۳,۵ درصد، دقت در دیتای تست، برای این مدل بدست آمده است. که نسبت به مدل قبلی پیشرفت قابل ملاحضه ای است.



۶. الف

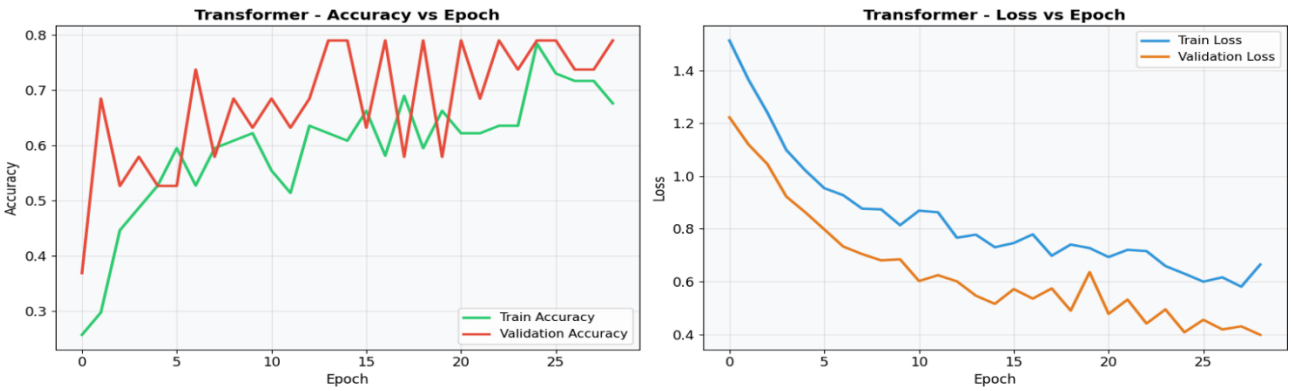


۶. ب

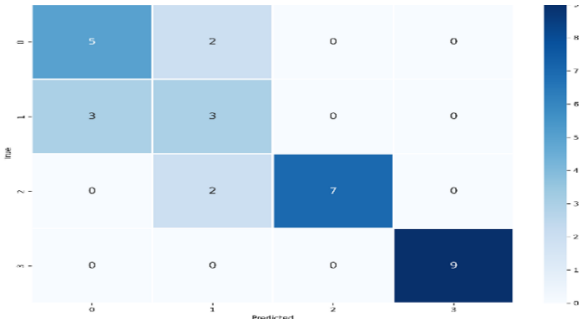
شکل۶. الف. نمودار تابع هزینه، ارزیابی و دقت مدل Conv2D ب. ماتریس در هم ریختگی

۳,۴. مدل transformer

با استفاده از مدل ترنسفورمر به دقت ۸۰ درصد در دیتای تست رسیده ایم. همانطور که از شکل ۷ هم پیداست، مدل در یافتن پاسخ صحیح برای نمونه ها عملکردی بسیار قویتر دارد. ولی از طرف دیگر دچار بیش برازش در دیتای تست و دقت کمتر از مدل هایی است که بررسی کردیم.



۷.الف

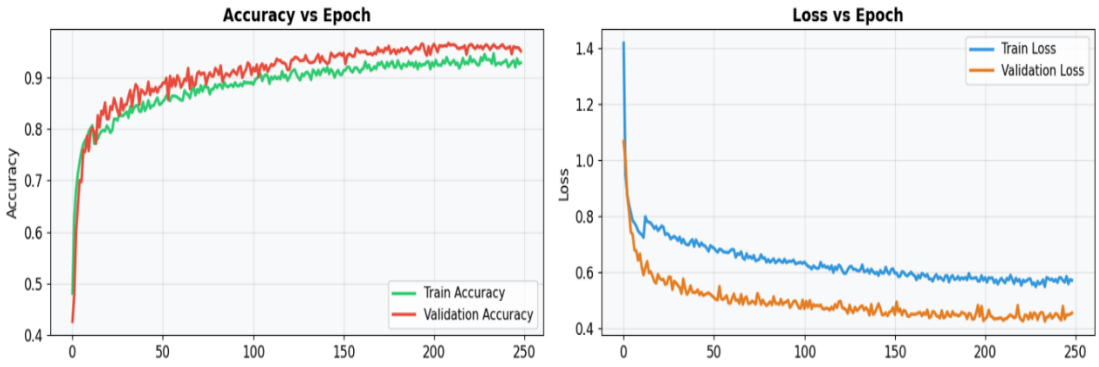


۷. ب

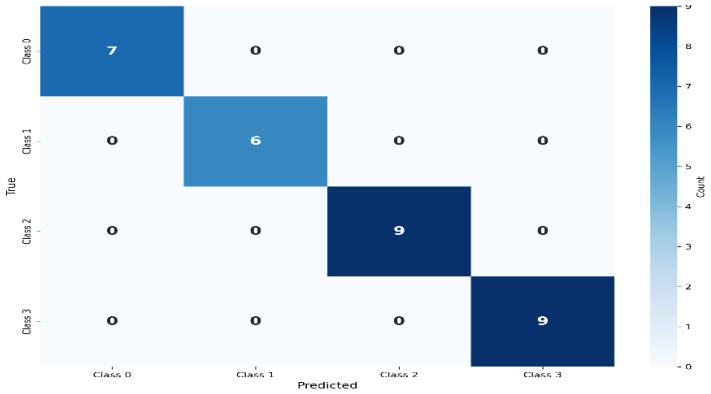
شکل ۷. الف. نمودار ارزیابی و دقت مدل **Conv2D** ب. نمودار تابع هزینه مدل ج. ماتریس در هم ریختگی

۴،۴. مدل CNN+LSTM

بهبود نتایج در شکل ها و نمودارهای شکل ۸ کاملا قابل مشاهده است. هر چه مطالعات بیشتری بر روی مدل و هدف مورد نظر انجام میگیرد به خروجی های بهترو پایدارتری دست پیدا کرده ایم. میانگین دقت ۹۶،۵۷ درصد بر روی همه کلاس ها نتیجه بسیار قابل قبولی برای این پژوهش می باشد. شکل ۵ نمودار آموزش، تابع هزینه و ماتریس در هم ریختگی را نشان می دهد.



شکل ۸. الف



شکل ۸. ب

شکل ۸. نمودار تابع هزینه، آموزش و ارزیابی مدل **CNN+LSTM** ب. ماتریس در هم ریختگی

۵. نتیجه گیری

در این پژوهش، طبقه‌بندی چندحالته خطاهای سنسور اثر هال در موتور BLDC با استفاده از سیگنال‌های جریان و مدل‌های مختلف یادگیری عمیق مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که اگرچه مدل‌هایی مانند CNN یک‌بعدی، CNNدوبعدی و Transformer قادر به استخراج الگوهای مفید از داده‌ها هستند، اما مدل ترکیبی **CNN+LSTM** با بهره‌گیری هم‌زمان از استخراج ویژگی‌های مکانی و مدل‌سازی وابستگی‌های زمانی، عملکرد برتری از خود نشان داده و به دقت ٪۹۳ در داده‌های آموزش و ٪۹۱ در داده‌های آزمون دست یافته است. همچنین مشخص شد که انتخاب معماری مناسب، در کنار پیش‌پردازش هدفمند و استفاده از مهندسی ویژگی، نقش کلیدی در بهبود کارایی سامانه‌های تشخیص خطا دارد. یافته‌های این پژوهش می‌تواند مبنای توسعه سیستم‌های پایش وضعیت هوشمند و قابل‌اعتماد برای موتورهای BLDC در کاربردهای صنعتی باشد.

۶. منابع

[1] Kenny SauKangChu, KuewwaiChew and YoongChoonChang, “Fault-Diagnosis and Fault-Recovery System of Hall Sensors in Brushless DC Motor Based on Neural Networks”.

[2] Jain, C.; Garg, P.; Jain, A. Hall-Effect Sensor Fault Diagnosis, Identification and Remedial Strategy in Permanent Magnet Brushless DCDrive; Ieeexplore.ieee.org. 2021. Available online: https://ieeexplore.ieee.org/document/8707593/(accessed on 16 July 2021).

[3] His Kao, Wei-Jen Wang, Yi-Horng Lai, and Jau-Woei Perng , “Analysis of Permanent Magnet Synchronous Motor Fault Diagnosis Based on Learning”. Digital Object Identifier 10.1109/TIM.2018.2847800

[4] FRANÇOIS CHOLLET, “Deep Learning with Python” . SECOND EDITION

[5] Seul Ki Hong, and Yongkeun Lee Optimizing Detection, “Compact MobileNet Models for Precise Hall Sensor Fault Identification in BLDC Motor Drives”. date of publication 31 May 2024, Department of Semiconductor Engineering, Seoul National University of Science and Technology, Seoul 01811, South Korea

[6] YONGKEUNLEE AND STEPHENMAKONIN, “ BLDC Hall Sensor Displacement Dataset (BLDC-HSD)”. Date of publication 8 October 2024. DATA DOI/PID 10.21227/17e3-t177

[7] S. Ki Hong and Y. Lee, "Optimizing Detection: Compact MobileNet Models for Precise Hall Sensor Fault Identification in BLDC Motor Drives," in *IEEE Access*, vol. 12, pp. 77475-77485, 2024, doi: 10.1109/ACCESS.2024.3407766.

[8] K.S., K. V., & J, G. (2023). Hall sensor fault diagnosis and compensation in Brushless DC motor drive using artificial intelligence technique. International Journal of Circuit Theory and Applications, 51, 2777–2797. **https://doi.org/10.1002/cta.3538**

[9] Natarajan, S., & Jothimani, G. (2023). Hall sensor fault diagnosis and compensation in Brushless DC motor drive using artificial intelligence technique. International Journal of Circuit Theory and Applications, 51, 2777–2797. https://doi.org/10.1002/cta.3538

[10] Gallon, R., Schiemenz, F., Menicucci, A., & Gill, E. (2024). Convolutional Neural Network Design and Evaluation for Real-Time Multivariate Time Series Fault Detection in Spacecraft Attitude Sensors. https://doi.org/10.48550/arxiv.2410.09126

[11] T. Marković, A. Dehlaghi-Ghadim, M. Leon, A. Balador, and S. Punnekkat, “Time-series Anomaly Detection and Classification with Long Short-Term Memory Network on Industrial Manufacturing Systems,” pp. 171–181, Sept. 2023, doi: 10.15439/2023f5263.

[12] S. Tuli, G. Casale, and N. R. Jennings, “TranAD: Deep Transformer Networks for Anomaly Detection in Multivariate Time Series Data,” Proceedings of The Vldb Endowment, vol. abs/2201.07284, Jan. 2022.

[13] YONGKEUN LEE, "BLDC HALL SENSOR DISPLACEMENT", IEEE Dataport, September 28, 2024, doi:10.21227/17e3-t177

20.1001.1.23223723.1404.12.4.4.2

KNO-1204-5005

تحلیل و مقایسه جامع ترانزیستورهای اثر میدان پیشرفته (FinFET, CNTFET, GNRFET, FeFET, HEMT) برای کاربردهای توان پایین و فرکانس بالا

امین شیخ نجدی[۱] najdi@iaud.ac.ir
نسرین مجدی [۲] nasr698@gmail.com

۱-استادیار گروه الکترونیک دانشگاه آزاد اسلامی دزفول
۲-کارشناسی الکترونیک دانشگاه پیام نور دزفول

چکیده:

با نزدیک شـــدن فناوری نیمه‌هادی ســـیلیکونی به محدودیت‌های فیزیکی خود در اندازه های زیر ۵ نانومتر، ترانزیســـتورهای ماســـفت مســـطح (***Planar MOSFET***) دیگر پاســـخگوی نیازهای عملکردی و توان پایین مدارهای مجتمع نیســـتند. چالش‌هایی نظیر اثرات کانال کوتاه (***SCEs***)، جریان نشتی و چگالی توان، محققان را به سمت معماری‌های نوین و مواد جایگزین سوق داده است. این مقاله به بررسی و مقایسه فنی ترانزیستورهای سیلیکونی پیشرفته (***FinFET, NWFET/NSFET***)، ترانزیستورهای نانولوله کربنی و گرافنی (***CNTFET, GNRFET***)، ترانزیســـتورهای فروالکتریک (***FeFET***) و همچنین ترانزیســـتورهای مبتنی بر ترکیبات ***III-V*** مانند ***GaAs-FET*** و ***HEMT*** می‌پردازد. نتایج این بررسی نشان می‌دهد، در حالی که ***FinFET*** و ***NSFET*** گزینه های اصلی صنعت دیجیتال هســـتند، ادوات مبتنی بر ***III-V*** و ***HEMT*** به دلیل تحرک‌پذیری الکترونی فوق‌العاده، گزینه‌های بی‌رقیبی برای کاربردهای فرکانس بالا و سوئیچینگ با سرعت بسیار زیاد محسوب می شوند. همچنین ***FeFET*** و ***GNRFET*** راهکارهایی امیدوارکننده برای حافظه‌های کم‌توان ارائه می‌دهند.

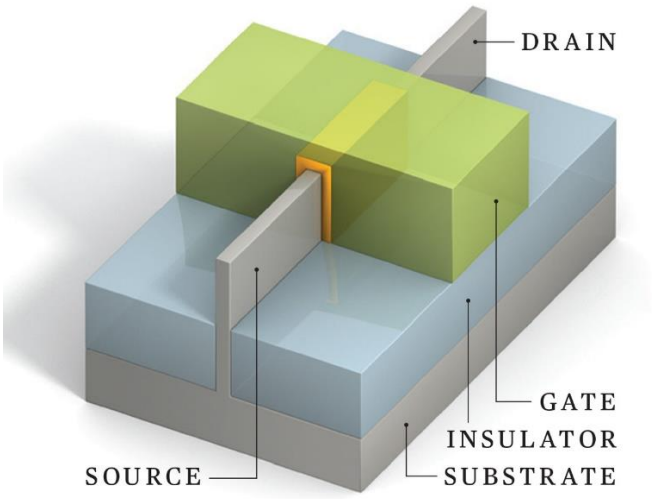
کلمات کلیدی :ترانزیستور اثر میدان، توان پایین، *FinFET*، *CNTFET*، *GNRFET*، *FeFET*، *HEMT* .

1. مقدمه

صنعت نیمه‌هادی‌ها در حال تجربه یک تغییر الگوی بنیادین است. افزایش نیاز به سامانه‌های الکترونیکی قابل‌حمل، کم‌مصرف و با کارایی بالا ـ از تلفن‌های همراه و رایانه‌های پیشرفته گرفته تا اینترنت اشیاء (IoT) و سخت‌افزارهای هوش مصنوعی (AI) ـ موجب شده است که طراحی مدارهای کم‌مصرف به اندازه افزایش توان محاسباتی اهمیت یابد [۱].ترانزیستورهای اثر میدانی مبتنی بر سیلیکون (MOSFET) که دهه‌ها ستون اصلی صنعت نیمه‌هادی بوده‌اند، به محدودیت‌های فیزیکی خود نزدیک شده‌اند. اگرچه قانون مور برای مدت طولانی راهنمای مقیاس‌بندی ترانزیستورها بوده است، اما امروزه کاهش مصرف توان و رفع چالش‌های مقیاس‌پذیری بیش از پیش اهمیت یافته است [۲],[۳]. این محدودیت‌ها به‌ویژه در حوزه‌های نوظهور مانند مراکز داده ابری و دستگاه‌های IoT با منابع انرژی محدود، اثرات چشمگیری بر عملکرد دارند. در پاسخ به این وضعیت، جامعه پژوهشی به‌طور گسترده به بررسی معماری‌های جایگزین پرداخته است؛ معماری‌هایی که ضمن حفظ سازگاری با فناوری CMOS بتوانند مشکلات مقیاس‌پذیری را برطرف کنند. در نقشه راه بین‌المللی دستگاه‌ها و سیستم‌ها (IRDS) سال ۲۰۲۲ [۴]، چندین توپولوژی ترانزیستوری نانومقیاس به‌عنوان گزینه‌های امیدبخش برای نسل‌های آینده معرفی شده‌اند. این دستگاه‌ها با هدف بهبود مقیاس‌پذیری، افزایش یکپارچگی الکترواستاتیکی، ارتقای سرعت سوئیچینگ و کاهش توان مصرفی طراحی شده‌اند، بدون آنکه از بستر تثبیت‌شده ساخت CMOS فاصله بگیرند [۵]. از جمله مهم‌ترین معماری‌های مطرح می‌توان به ترانزیستورهای اثر میدانی فروالکتریک (FeFET)، ترانزیستورهای نانولوله کربنی (CNTFET)، ترانزیستورهای نانوسیم (NWFET)، ترانزیستورهای نانوصفحه‌ای (NSFET) و FinFETهای سه‌گانه اشاره کرد. هر یک از این معماری‌ها مزایای خاصی مانند کنترل بهتر کانال، سوئیچینگ با شیب تند (steep-slope) یا امکان ادغام حافظه و منطق را ارائه می‌دهند و مسیرهای نوآورانه‌ای در علم مواد و مهندسی دستگاه فراهم می‌سازند. با این حال، کوچک‌سازی ابعاد ترانزیستور به زیر ۱۰ نانومتر همچنان چالش‌برانگیز است؛ زیرا کاهش کنترل الکترواستاتیک گیت بر کانال موجب افزایش جریان نشتی و اتلاف توان استاتیک می‌شود.

۱-۱ گذار از ساختار مسطح به سه بعدی

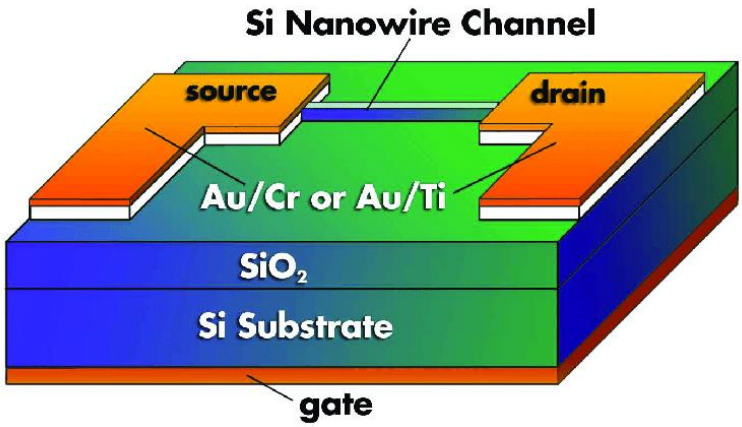
ترانزیستورهای FinFET (ترانزیستور اثر میدان باله دار) اولین پاسخ صنعت به این چالش‌ها بودند. با سه بعدی کردن کانال و احاطه شدن آن توسط گیت از سه طرف، کنترل بهتری بر کانال حاصل شد که منجر به کاهش اثرات کانال کوتاه گردید. این روش در تکنولوژی های ۲۲ نانومتر تا ۷ نانومتر پاسخ دهی مطلوبی دارد. با این حال، در ابعاد زیر ۵ نانومتر، FinFET نیز با محدودیت‌هایی در مدولاسیون عرض کانال و اثرات حرارتی مواجه است



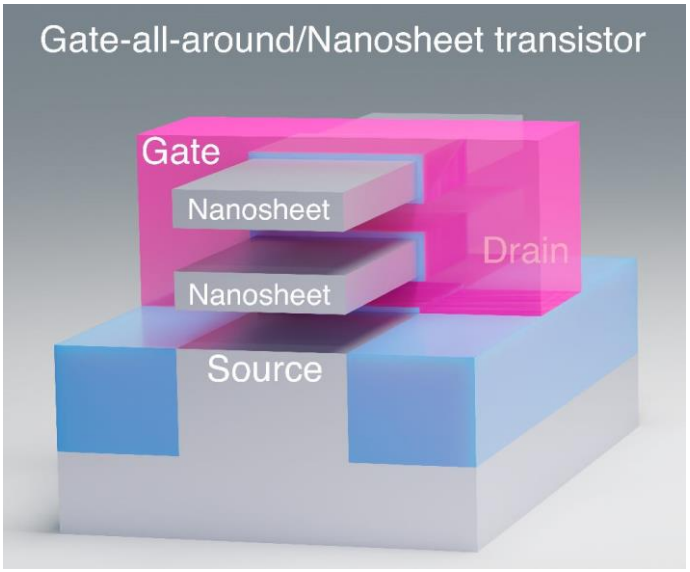
شکل ۱ : ساختار ترانزیستور FinFet

۲-۱ ظهور معماری‌های Gate-All-Around (GAA)

برای بهبود بیشتر، ساختارهای Nanowire FET (NWFET) و Nanosheet FET (NSFET) معرفی شدند که در آن‌ها گیت به‌طور کامل کانال را احاطه می‌کند. ، NSFETها به دلیل قابلیت تنظیم عرض ورقه‌ها (Sheets) و جریان درایو بالاتر، به عنوان جایگزین مستقیم FinFET در گره‌های ۳ نانومتر و پایین‌تر شناخته می‌شوند .



شکل ۲ : نمودار شماتیک یک Nanowire FET[6]



شکل ۳ : ساختار ترانزیستور Nanosheet FET

۳-۱ .مواد کانال جایگزین: کربن، فروالکتریک و ترکیباتIII-V

علاوه بر تغییر ساختار، تغییر مواد سازنده نیز برای بهبود عملکرد ضروری است. موادی از جمله :

- **نانو کربنی :(CNT/Graphene)** نانولوله‌های کربنی و نانو روبان‌های گرافنی امکان ترابرد شبه‌بالستیک و تحرک‌پذیری بسیار بالا را فراهم می‌کنند
- **فروالکتریک‌ها :(FeFET)** استفاده از مواد فروالکتریک برای دستیابی به شیب زیرآستانه تند و حافظه غیرفرارمیباشد
- **ترکیبات :III-V** استفاده از ترکیب های عناصر ستون سوم و ستون پنجم جدول تناوبی مانند گالیم آرسنید (GaAs) و گالیم نیترید (GaN)که به دلیل تحرک‌پذیری الکترونی بسیار بالاتر نسبت به سیلیکون، برای کاربردهای سرعت بالا و RF مورد توجه هستند. [۷]

۱.بررسی و تحلیل فنی

در این بخش، ویژگی‌های فنی هر یک از ترانزیستورها بر اساس معیارهای تعیین شده تحلیل می‌شود.

۱-۲. ترانزیستورهای FinFET

• عملکرد: FinFETها جریان درایو بالایی (حدود ۱,۵ میلی‌آمپر بر میکرومتر) ارائه می‌دهند و تاخیر سوئیچینگ آن‌ها نسبت به ماسفت‌های مسطح ۳۷٪ کمتر است.

• چالش‌ها: محدودیت اصلی FinFETها "Quantization Width" است؛ یعنی عرض کانال تنها با اضافه کردن تعداد فین‌ها (Fin) قابل تغییر است که انعطاف‌پذیری طراحی را کاهش می‌دهد. همچنین، اثر خودگرمایی (Self-heating) به دلیل محبوس شدن حرارت در ساختار سه بعدی، یک چالش جدی است.

۲-۲. ترانزیستورهای مبتنی بر نانولوله کربنی (CNTFET)

• خصوصیات توان و کارایی: CNTها دارای تحرک‌پذیری حامل فوق‌العاده‌ای هستند (بیش از ۱۰ برابر سیلیکون). این امر باعث می‌شود محصول تاخیر-توان (EDP) بسیار پایینی داشته باشند. هدایت حرارتی بالای نانولوله‌ها نیز پایداری حرارتی را بهبود می‌بخشد.

•چالش‌ها: چالش اصلی در تولید انبوه، هم‌راستایی (Alignment) دقیق نانولوله‌ها، کنترل کایرالیته (Chirality) برای اطمینان از رفتار نیمه‌هادی (و نه فلزی) و مقاومت تماس اهمی است .

۲-۳ .ترانزیستورهای نانوروبان گرافنی(GNRFET)

- کاربرد در SRAM کم‌توان :گرافن به ذاته نیمه‌هادی نیست (گاف انرژی صفر)، اما با تبدیل آن به نانوروبان‌های باریک، گاف انرژی ایجاد می‌شودGNRFET .ها جریان نشتی بسیار پایینی در حالت خاموش دارند.
- تحلیل مقایسه‌ای :مطالعات نشان می‌دهد سلول‌های حافظه SRAM طراحی شده با GNRFET در مقایسه با تکنولوژی CMOS حتی(FinFET)، پایداری خواندن (Read Stability) و قابلیت نوشتن (Write-ability) بهتری دارند و مصرف توان استاتیک آن‌ها به شدت کاهش می‌یابد[۸]

۲-۴ .ترانزیستورهای فروالکتریک(FeFET)

- ویژگی منحصربه‌فردFeFET :ها از پسماند (Hysteresis) ذاتی مواد فروالکتریک(مانند HfO2) استفاده می‌کنند. این ویژگی دو مزیت دارد: ۱) قابلیت حافظه غیرفرار و ۲) تقویت ولتاژ داخلی که منجر به شیب زیرآستانه بسیار تند (Steep Slope < 60mV/dec) می‌شود.
- کارایی انرژی :این ترانزیستورها می‌توانند در ولتاژهای بسیار پایین (VDD < 0.5V) عمل کنند که آن‌ها را برای اینترنت اشیاء (IoT) ایده‌آل می‌سازد.

۲-۵ .ترانزیستورهای Nanowire و(Nanosheet (GAA

- کنترل الکترواستاتیک :این ساختارها بهترین کنترل را بر روی کانال دارند و عملاً اثرات کانال کوتاه را حذف می‌کنند.
- مقیاس‌پذیریNSFET :ها به دلیل سطح مقطع بزرگتر نسبت به نانوسیم‌ها، جریان بیشتری عبور می‌دهند و به دلیل سازگاری با فرآیندهای ساخت لایه‌نشانی موجود، جانشین طبیعی FinFET در صنعت هستند.

۲-۶ .ترانزیستورهای ترکیبات III-V وHEMT

- ترکیبات گروه سه-پنج مانندGaAs ، InGaAs، InPو GaN به دلیل خواص الکتریکی و اپتوالکترونیکی برتر، جایگاه ویژه‌ای در الکترونیک سرعت بالا دارند.
- ترانزیستورهای گالیم آرسنید : (GaAs-FET) این ترانزیستورها دارای تحرک‌پذیری الکترونی بسیار بالاتر (حدود ۸۵۰۰ سانتی‌متر مربع بر ولت-ثانیه) نسبت به سیلیکون (۱۴۰۰) هستند. این ویژگی باعث می‌شودGaAs-FET ها در فرکانس‌های بسیار بالاتر کار کنند. همچنین به دلیل گاف انرژی مستقیم، در کاربردهای اپتوالکترونیک) مانند لیزرها وLED ها (نیز استفاده می‌شوند

۳.مقایسه تطبیقی و نتایج

در جدول زیر خلاصه مقایسه این فناوری‌ها بر اساس معیارهای کلیدی ارائه شده است:

ویژگی / نوع ترانزیستور	FinFET	FeFET	CNTFET / GNRFET	NSFET (GAA)	HEMT / III-V FET
ماده کانال	سیلیکون(Si)	سیلیکون + فروالکتریک	نانولوله کربن / گرافن	سیلیکون/SiGe	GaAs, InGaAs, GaN
مکانیزم اصلی	کنترل سه بعدی	شیب تند / حافظه	ترابرد بالستیک	کنترل چهار طرفه	گاز الکترونی DEG۲
تحرک‌پذیری (Mobility)	متوسط	متوسط	بسیار عالی	خوب	بسیار عالی(>10,000)
مصرف توان	بهینه شده	(فوق کم‌توان Low VDD)	بسیار پایین	پایین	متوسط (بهینه برای سرعت)
کاربرد اصلی	پردازنده‌های عمومی	IoT، حافظهNVM	نانو الکترونیک آینده	HPC (3nm <)	RF، مخابرات، رادار
چالش اصلی	محدودیت ابعاد	پایداری مواد	تولید انبوه	پیچیدگی ساخت	هزینه و ادغام باSi

جدول ۱: مقایسه جامع فناوری‌های FET برای کاربردهای توان پایین و سرعت بالا

۳-۱. نتیجه‌گیری

برای کاربردهای دیجیتال و توان پایین در گره‌های تکنولوژی فعلی و آینده نزدیک 3nm) و ۲(nm، معماری Nanosheet FET بهترین تعادل را بین عملکرد و قابلیت تولید ارائه می‌دهد FeFET .با قابلیت‌های منحصربه‌فرد خود، آینده حافظه‌های تعبیه شده و سیستم‌های فوق کم‌توان IoT را رقم خواهد زد.

در حوزه فرکانس بالا و سرعت‌های سوئیچینگ بسیار زیاد، ترانزیستورهای HEMT و GaAs-FET بی‌رقیب هستند و علی‌رغم هزینه بالاتر، در صنایع مخابراتی و فضایی غیرقابل جایگزین می‌باشند. در نهایت، CNTFET و GNRFET به عنوان کاندیداهای نهایی برای دوران پسا-سیلیکون (Post-Silicon)، پتانسیل شکستن تمامی رکوردهای فعلی را دارند، مشروط بر اینکه چالش‌های تولید انبوه آن‌ها مرتفع گردد.

۴. مراجع

[1] 1. Karimi K, Fardoost A, Javanmard M (2022) Comprehensive Review of FinFET Technology. Electronics 11(21):3589

[2] Sresta Valasa S, Tayal LR, Thoutam J, Ajayan S, Bhattacharyaet (2022) A critical review on performance, reliability, andfabrication of gate-all-around nanosheet and nanowire FETs, Materials Today: Proceedings

[3] Chen YR, Liu YC, Lin HC, Tu CT, Chou T, Huang BW, Hsieh WH, Chueh SJ, Liu CW (2023) Fabrication and performance ofhighly stacked GeSi nanowire FETs. Nat Electron 6:116–122

[4] Mukesh S, Zhang J (2022) A Review of the Gate-All-Around Nanosheet FET Process Opportunities. Electronics 11:21

[5] Kumari NA, Prithvi P (2023) A comprehensive analysis of nanosheet FET. Arab J Sci Eng

[6] Koo, S. M.; Edelstein, M. D.; Li, Q. L.; Richter, C. A.; Vogel, E. M. Silicon nanowires as enhancement-mode schottky barrier field-effect transistors. Nanotechnology 2005, 16(9), 1482–1485

[7] P. Ram and B. Raj, "A Comprehensive Analysis FinFET, FeFET, CNTFET, Nanowire FET and Nanosheet FET for Low Power Applications," *Research Square*, 2025.

[8] S. Suman and S. Nemade, "A Review of GNRFET based SRAM for Low-Power Applications," International Journal of Recent Development in Engineering and Technology (IJRDET), Vol. 13, Issue 4, April 2024.

[9] T. Hossain et al., "Performance Analysis of Graphene Nanoribbon Field Effect Transistor (GNRFET) based 6T and 7T SRAMs," 2020 23rd International Conference on Computer and Information Technology (ICCIT), 2020.

[10] P. K. Patel, M. Malik and T. K. Gupta, "Optimization Techniques for Reliable Low Leakage GNRFET-Based 9T SRAM," IEEE Transactions on Device and Materials Reliability, vol. 22, no. 4, 2022.

20.1001.1.23223723.1404.12.4.5.3

KNO-1204-5006

یک چارچوب هوشمند یکپارچه برای پیشگیری و تشخیص سرقت خودرو مبتنی بر تحلیل داده‌های سنسوری و الگوهای جرم

آرمان رحمتی لپوندانی[1*]، سعید شعبانزاده[2]، مهدی نیاجلیلی[3]

[1*] کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک گرایش ساخت و تولید دانشگاه جامع امام حسین(ع) ، تهران، ایران
Armanrahmatilapevandani@gmail.com

[2] کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک گرایش طراحی کاربردی دانشگاه بوعلی سینا ،همدان،ایران saeid.shabanzadh.3@gmail.com

[3] هیأت علمی ، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه ملی مهارت، تهران، ایران، Mniajalili@tvu.ac.ir

چکیده

سرقت خودرو و قطعات جانبی آن همچنان یکی از چالش‌های اساسی امنیت شهری در بسیاری از کشورها به شمار می‌رود و پیامدهای اقتصادی، اجتماعی و روانی قابل‌توجهی برای مالکان خودرو و نهادهای مسئول به همراه دارد. با وجود توسعه طیف گسترده‌ای از سامانه‌های ضدسرقت، بسیاری از راهکارهای موجود ماهیتی واکنشی داشته و عمدتاً پس از وقوع سرقت فعال می‌شوند؛ در نتیجه توان محدودی در پیشگیری مؤثر از وقوع جرم دارند. پیشرفت فناوری‌های حسگری، ارتباطی و تحلیلی در سال‌های اخیر، فرصت مناسبی را برای طراحی سامانه‌های هوشمند با رویکرد پیش‌دستانه فراهم ساخته است. در این مقاله، یک چارچوب هوشمند و یکپارچه برای پیشگیری و تشخیص سرقت خودرو ارائه می‌شود که بر تلفیق داده‌های سنسورهای داخلی خودرو، فناوری‌های موقعیت‌یابی و ارتباطی نظیر GPS و GSM، و تحلیل الگوهای جرم‌شناختی استوار است. روش پژوهش مبتنی بر تحلیل تطبیقی مطالعات پیشین، شناسایی تهدیدهای رایج در سرقت خودرو و استخراج معیارهای کلیدی ارزیابی سامانه‌های امنیتی است. بر این اساس، یک معماری چندلایه شامل لایه حسگری، لایه تحلیل داده و لایه تصمیم‌گیری طراحی شده است که امکان پایش مداوم وضعیت خودرو و شناسایی رفتارهای مشکوک را فراهم می‌کند. ارزیابی چارچوب پیشنهادی به‌صورت سناریومحور و تحلیلی انجام شده و عملکرد آن در مواجهه با سناریوهای مختلف از جمله سرقت کامل خودرو، سرقت قطعات و استفاده غیرمجاز بررسی شده است. نتایج حاصل از این ارزیابی‌ها نشان می‌دهد که رویکرد پیشنهادی می‌تواند دقت تشخیص را افزایش داده، نرخ هشدارهای کاذب را کاهش دهد و زمان واکنش سامانه را در مقایسه با سامانه‌های متداول به‌طور محسوسی بهبود بخشد. این پژوهش می‌تواند به‌عنوان مبنایی برای توسعه سامانه‌های ضدسرقت هوشمند و پیاده‌سازی‌های عملی آینده مورد استفاده قرار گیرد.

واژگان کلیدی: سرقت خودرو، سامانه ضدسرقت، تحلیل داده‌های سنسوری، GPS/GSM، اینترنت اشیای خودرو

۱- مقدمه

سرقت خودرو و قطعات جانبی آن یکی از معضلات مهم امنیت شهری در بسیاری از کشورها محسوب می‌شود و خسارات اقتصادی و اجتماعی قابل‌توجهی به همراه دارد [۴,۵]. افزایش تعداد خودروها و پیچیده‌تر شدن شیوه‌های ارتکاب جرم موجب شده است که سامانه‌های سنتی ضدسرقت، نظیر قفل‌های مکانیکی و دزدگیرهای ساده، کارایی محدودی در شرایط واقعی داشته باشند. این سامانه‌ها غالباً ماهیتی واکنشی دارند و تنها پس از آغاز فرآیند سرقت فعال می‌شوند [۱،۷]. در سال‌های اخیر، پیشرفت فناوری‌های حسگری، ارتباطی و پردازشی زمینه‌ساز توسعه سامانه‌های ضدسرقت هوشمند شده است. استفاده از سنسورهای داخلی خودرو، سامانه‌های موقعیت‌یابی ماهواره‌ای (GPS)، شبکه‌های ارتباطی سیار (GSM) و زیرساخت‌های اینترنت اشیا امکان پایش مداوم وضعیت خودرو و ارسال هشدارهای بلادرنگ را فراهم کرده است [۱۰]. با این حال، بخش قابل‌توجهی از سامانه‌های موجود بر یک فناوری خاص تمرکز دارند و فاقد رویکردی یکپارچه برای تحلیل هم‌زمان داده‌های متنوع هستند. از سوی دیگر، مطالعات جرم‌شناختی نشان می‌دهد که سرقت خودرو پدیده‌ای تصادفی نیست و از الگوهای مشخصی از نظر زمان، مکان و شیوه ارتکاب تبعیت می‌کند [۴]. نادیده گرفتن این الگوها در طراحی سامانه‌های امنیتی می‌تواند اثربخشی آن‌ها را کاهش دهد. بر این اساس، هدف این پژوهش ارائه یک چارچوب هوشمند و یکپارچه برای پیشگیری و تشخیص سرقت خودرو است که با تلفیق تحلیل داده‌های سنسوری و الگوهای جرم‌شناختی، رویکردی پیش‌دستانه و کارآمد را دنبال می‌کند.

۲ -روش‌شناسی پژوهش

روش تحقیق این پژوهش از نوع تحلیلی–توصیفی بوده و با هدف ارائه یک چارچوب مفهومی برای پیشگیری و تشخیص سرقت خودرو طراحی شده است. در این راستا، پژوهش حاضر به‌جای پیاده‌سازی تجربی، بر تحلیل نظام‌مند مطالعات پیشین و تلفیق رویکردهای فنی و جرم‌شناختی تمرکز دارد [۱،۲،۴]. فرآیند انجام پژوهش در چهار مرحله اصلی انجام شده است.

۲,۱ گردآوری و تحلیل منابع

در این مرحله، مقالات علمی مرتبط با سامانه‌های ضدسرقت خودرو، فناوری‌های GPS/GSM، اینترنت اشیای خودرو و مطالعات جرم‌شناختی بررسی شدند [۷،۱۰]. این تحلیل با هدف شناسایی رویکردهای رایج و محدودیت‌های سامانه‌های موجود انجام گرفت.

۲,۲ استخراج معیارهای ارزیابی

بر اساس تحلیل منابع، معیارهایی نظیر نوع تهدید، سطح پیشگیری، زمان تشخیص، نوع واکنش سامانه و میزان کاهش هشدارهای کاذب استخراج شد [۲،۶،۸].

۲,۳ طراحی چارچوب پیشنهادی

چارچوب پیشنهادی با رویکردی چندلایه شامل لایه حسگری، لایه تحلیل داده و لایه تصمیم‌گیری طراحی شد. این نوع معماری در مطالعات پیشین به‌عنوان رویکردی کارآمد برای سامانه‌های امنیتی هوشمند گزارش شده است [۷،۱۰].

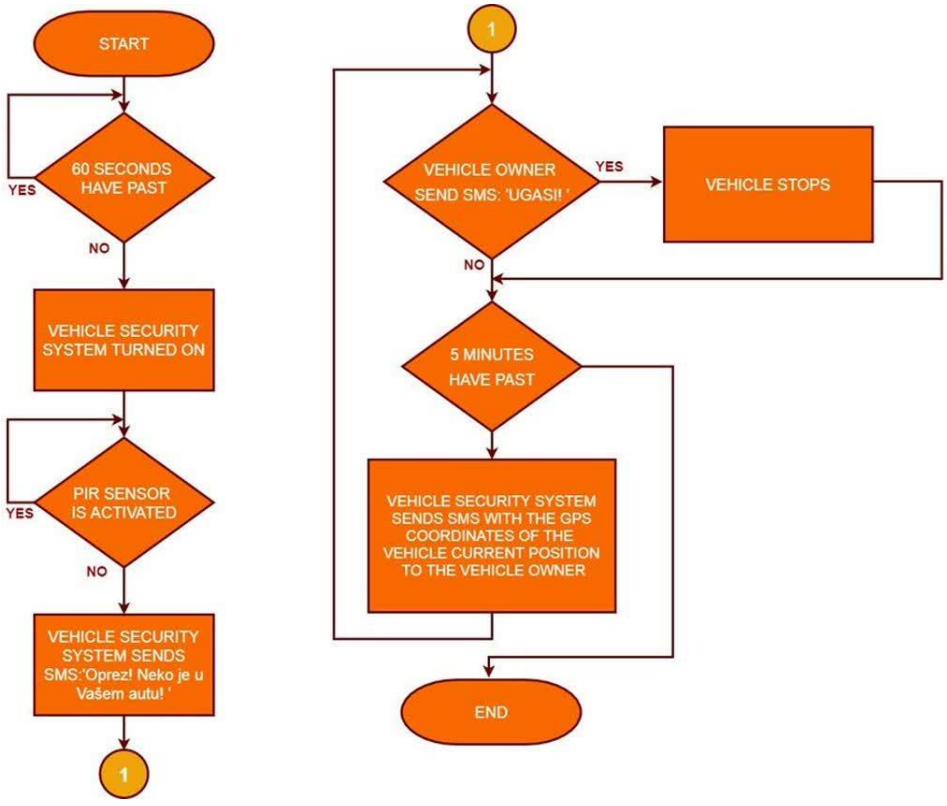
۲,۴ ارزیابی سناریومحور

ارزیابی چارچوب پیشنهادی به‌صورت سناریومحور و تحلیلی انجام شد و سناریوهای مختلف سرقت کامل خودرو، سرقت قطعات و استفاده غیرمجاز مورد بررسی قرار گرفتند. این رویکرد ارزیابی در مطالعات جرم‌شناختی و سامانه‌های ضدسرقت رایج است [۴،۵].

۳-فناوری‌ها و رویکردهای مورد استفاده

در طراحی سامانه‌های ضدسرقت هوشمند، بهره‌گیری از فناوری‌های متنوع حسگری، ارتباطی و تحلیلی نقش کلیدی در افزایش دقت تشخیص و کاهش زمان واکنش ایفا می‌کند. در این پژوهش، چارچوب پیشنهادی بر پایه ترکیب چند رویکرد فناورانه مکمل طراحی شده است. فناوری‌های موقعیت‌یابی جهانی (GPS) و ارتباطات سیار (GSM) از پرکاربردترین ابزارها در سامانه‌های ضدسرقت خودرو محسوب می‌شوند و امکان ردیابی بلادرنگ خودرو، ارسال هشدار به مالک و اجرای فرمان‌های کنترلی از راه دور را فراهم می‌کنند [۱،۷]. با این حال، اتکای صرف به این فناوری‌ها معمولاً منجر به واکنش پس از وقوع سرقت شده و نقش محدودی در پیشگیری فعال دارد. به‌منظور کاهش دسترسی غیرمجاز به خودرو، استفاده از روش‌های احراز هویت هوشمند نظیر سامانه‌های بیومتریک و شناسایی الگوهای رفتاری پیشنهاد شده است که می‌توانند امنیت لایه دسترسی را به‌طور قابل‌توجهی افزایش دهند [۶،۹،۱۱]. در کنار این رویکردها، داده‌های حاصل از سنسورهای داخلی خودرو نظیر شتاب‌سنج، ژیروسکوپ و حسگرهای وضعیت، اطلاعات ارزشمندی درباره حرکت، لرزش و شرایط عملکرد خودرو فراهم می‌کنند. تحلیل هوشمند این داده‌ها امکان شناسایی رفتارهای غیرعادی مانند یدک‌کشی، لرزش غیرمجاز یا تلاش برای سرقت قطعات را فراهم می‌سازد و نقش مهمی در تشخیص پیش‌دستانه تهدید ایفا می‌کند [۱۳]. مطالعات پیشین نشان می‌دهد که استفاده منفرد از هر یک از فناوری‌های مذکور پاسخ‌گوی پیچیدگی شیوه‌های نوین سرقت خودرو نیست. ازاین‌رو، در چارچوب پیشنهادی این پژوهش، تلفیق داده‌های سنسوری، قابلیت‌های ارتباطی و روش‌های تحلیل رفتاری به‌عنوان یک رویکرد یکپارچه مورد توجه قرار گرفته است. این رویکرد می‌تواند با کاهش هشدارهای کاذب و افزایش دقت تشخیص، کارایی سامانه‌های ضدسرقت را در شرایط واقعی بهبود بخشد [۱۰،۱۳].

شکل۱- دیاگرام معماری سامانه ضدسرقت هوشمند مبتنی بر تحلیل داده‌های سنسوری



جدول۱ــ مقایسه رویکردهای فناورانه به‌کاررفته در سامانه‌های ضدسرقت خودرو[۶،۱۰،۱۲،]

رویکرد فناورانه	کارکرد اصلی	مزایا	محدودیت ها
سامانه مبتنی بر GPS/GSM	ردیابی موقعیت و ارسال هشدار	سادگی پیاده سازی و پوشش ارتباطی مناسب	ماهیت واکنشی و وابستگی به شبکه محابراتی
روش احراز هویت هوشمند	جلوگیری از دسترسی غیر مجاز	افزایش امنیت در سطح	هزینه پیاده سازی و محدودیت
سنسور های داخلی خودرو	تشخیص رفتار های غیر عادی	قابلیت پیش دستانه و کاهش هشدار های کاذب	نیاز به تحلیل داده های پیچیده
رویکرد یکپارچه پیشنهادی	تلفیق چند فناوری	دقت تشخیص بالا و کاهش زمان واکنش	پیچیدگی طراحی و اجرا

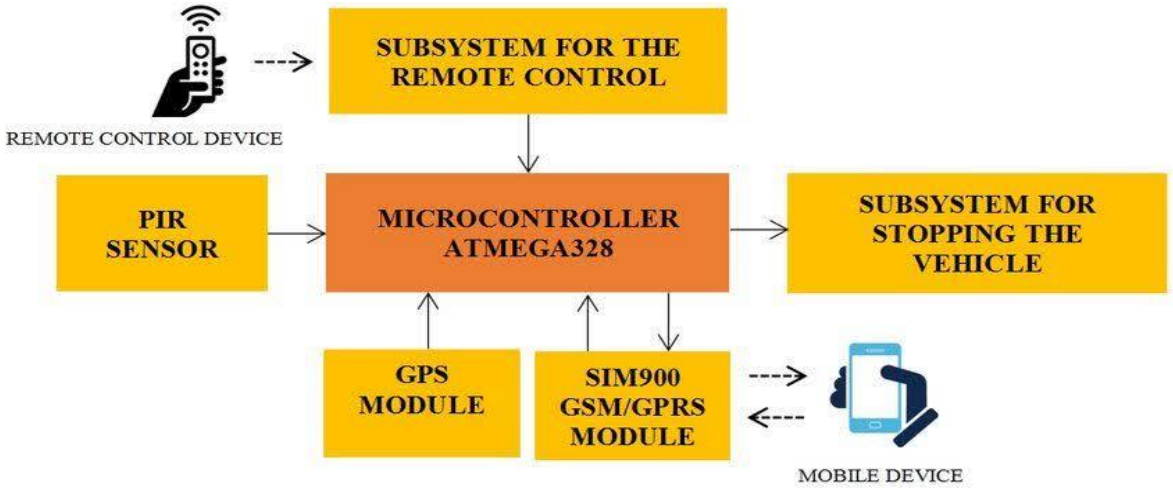
۴-تحلیل الگوی سرقت خودرو

تحلیل الگوهای سرقت خودرو نشان می‌دهد که این پدیده ماهیتی تصادفی نداشته و از الگوهای نسبتاً مشخصی از نظر زمان، مکان و شیوه ارتکاب تبعیت می‌کند. مطالعات جرم‌شناختی بیانگر آن است که بخش قابل‌توجهی از سرقت‌های خودرو در ساعات خاصی از شبانه‌روز و در مکان‌هایی با نظارت کمتر، نظیر معابر فرعی و پارکینگ‌های عمومی، رخ می‌دهد [۴،۵]. همچنین نوع خودرو، تجهیزات ایمنی موجود و سهولت دسترسی به قطعات از عوامل مؤثر در انتخاب هدف توسط سارقین محسوب می‌شوند. از منظر شیوه ارتکاب، سرقت کامل خودرو، سرقت قطعات و استفاده غیرمجاز هر یک ویژگی‌ها و نشانه‌های متفاوتی دارند که می‌توانند در طراحی سامانه‌های ضدسرقت مورد توجه قرار گیرند. برای مثال، سرقت قطعات معمولاً با الگوهای لرزشی خاص و تغییرات غیرعادی در وضعیت خودرو همراه است، در حالی که سرقت کامل خودرو اغلب با جابه‌جایی غیرمجاز و تغییر ناگهانی موقعیت مکانی مشخص می‌شود [۳]. نادیده گرفتن این تفاوت‌ها در سامانه‌های امنیتی می‌تواند منجر به افزایش هشدارهای کاذب یا کاهش دقت تشخیص شود. بر این اساس، بهره‌گیری از یافته‌های جرم‌شناختی در کنار تحلیل داده‌های سنسوری می‌تواند نقش مهمی در افزایش کارایی سامانه‌های ضدسرقت ایفا کند. تلفیق الگوهای زمانی و مکانی سرقت با داده‌های بلادرنگ سنسورها این امکان را فراهم می‌سازد که سامانه، رفتارهای مشکوک را با دقت بیشتری شناسایی کرده و واکنشی متناسب با نوع تهدید ارائه دهد. این رویکرد زمینه‌ساز طراحی سامانه‌هایی با قابلیت پیش‌بینی و پیشگیری مؤثرتر در برابر سرقت خودرو است [۴،۵].

۵-چارچوب پیشنهادی سیستم

چارچوب پیشنهادی این پژوهش با هدف پیشگیری و تشخیص هوشمند سرقت خودرو، به‌صورت یک ساختار یکپارچه و چندلایه طراحی شده است که قابلیت پایش مداوم وضعیت خودرو و واکنش متناسب با نوع تهدید را فراهم می‌کند. این چارچوب با تلفیق داده‌های سنسورهای داخلی خودرو، فناوری‌های ارتباطی و تحلیل الگوهای رفتاری، تلاش دارد محدودیت‌های سامانه‌های واکنشی متداول را برطرف کند.

شکل۲-فلوچارت عملکرد سیستم ضدسرقت پیشنهادی



در این چارچوب، داده‌های جمع‌آوری‌شده از سنسورهای مختلف به‌صورت بلادرنگ به واحد پردازش مرکزی ارسال می‌شوند. این داده‌ها پس از پردازش اولیه، با الگوهای رفتاری از پیش‌تعریف‌شده و سناریوهای رایج سرقت مقایسه می‌شوند. در صورت شناسایی رفتار مشکوک، سامانه بسته به نوع و شدت تهدید، تصمیم مناسب را اتخاذ می‌کند؛ این تصمیم می‌تواند شامل ارسال هشدار به مالک، ارائه اطلاعات مکانی خودرو یا فعال‌سازی مکانیزم‌های کنترلی نظیر قفل‌کردن موتور باشد [۱،۷].

منطق عملکرد سیستم به‌گونه‌ای طراحی شده است که از صدور هشدارهای غیرضروری جلوگیری کرده و تنها در شرایطی که احتمال وقوع سرقت وجود دارد، واکنش فعال نشان دهد. این ویژگی با استفاده از تحلیل هم‌زمان داده‌های سنسوری و در نظر گرفتن الگوهای زمانی و مکانی سرقت حاصل می‌شود [۴،۵]. چنین رویکردی امکان تشخیص پیش‌دستانه تهدید را فراهم کرده و زمان واکنش سامانه را به‌طور قابل‌توجهی کاهش می‌دهد.

در مجموع، چارچوب پیشنهادی با ایجاد تعامل مؤثر میان لایه حسگری، لایه تحلیل و لایه تصمیم‌گیری، بستری مناسب برای توسعه سامانه‌های ضدسرقت هوشمند و مقیاس‌پذیر فراهم می‌سازد و می‌تواند به‌عنوان مبنایی برای پیاده‌سازی‌های عملی و پژوهش‌های آینده مورد استفاده قرار گیرد.

۶-بحث و بررسی

نتایج تحلیلی این پژوهش نشان می‌دهد که رویکرد یکپارچه پیشنهادی می‌تواند محدودیت‌های سامانه‌های ضدسرقت متداول را تا حد زیادی برطرف کند. برخلاف بسیاری از مطالعات پیشین که بر یک فناوری خاص تمرکز داشته‌اند، چارچوب ارائه‌شده با تلفیق داده‌های سنسوری، قابلیت‌های ارتباطی و تحلیل الگوهای جرم‌شناختی، امکان تشخیص پیش‌دستانه تهدید را فراهم می‌سازد. این ویژگی نقش مهمی در کاهش زمان واکنش سامانه و افزایش کارایی آن در شرایط واقعی ایفا می‌کند. همچنین، استفاده از تحلیل رفتارهای مشکوک به‌جای اتکای صرف به تحریک‌های ساده سنسورها می‌تواند به کاهش هشدارهای کاذب منجر شود؛ موضوعی که یکی از چالش‌های اصلی سامانه‌های ضدسرقت محسوب می‌شود [۸،۱۳]. با این حال، پیاده‌سازی عملی چنین چارچوبی مستلزم دسترسی به داده‌های دقیق سنسوری و تنظیم مناسب آستانه‌های تصمیم‌گیری است. از جمله محدودیت‌های پژوهش حاضر می‌توان به عدم ارزیابی تجربی سامانه

در محیط واقعی و نبود داده‌های کمی برای مقایسه عملکرد اشاره کرد. با وجود این، چارچوب ارائه‌شده می‌تواند به‌عنوان مبنایی مفهومی برای توسعه سامانه‌های ضدسرقت هوشمند و انجام مطالعات کاربردی آینده مورد استفاده قرار گیرد.

۷-نتیجه‌گیری و پیشنهادات آینده

در این پژوهش، یک چارچوب هوشمند و یکپارچه برای پیشگیری و تشخیص سرقت خودرو ارائه شد که بر مبنای تحلیل داده‌های سنسوری داخلی خودرو، فناوری‌های موقعیت‌یابی و رویکردهای نوین تحلیل رفتار طراحی شده است. مرور ادبیات پژوهش نشان داد که بخش قابل‌توجهی از سامانه‌های ضدسرقت موجود، ماهیتی واکنشی دارند و عمدتاً پس از وقوع سرقت فعال می‌شوند، در حالی که چارچوب پیشنهادی این پژوهش با تمرکز بر شناسایی رفتارهای مشکوک، رویکردی پیش‌دستانه را دنبال می‌کند [۱]. نتایج تحلیل‌ها حاکی از آن است که تلفیق داده‌های سنسوری با الگوهای شناخته‌شده سرقت می‌تواند موجب افزایش دقت تشخیص، کاهش هشدارهای کاذب و بهبود زمان واکنش سیستم شود. همچنین، ساختار چندلایه پیشنهادی این چارچوب، امکان توسعه‌پذیری و انطباق با شرایط مختلف محیطی و الگوهای متنوع سرقت را فراهم می‌کند. با این حال، پژوهش حاضر دارای محدودیت‌هایی از جمله عدم پیاده‌سازی عملی سامانه و نبود داده‌های میدانی واقعی برای ارزیابی کمی عملکرد است. ازاین‌رو، پیشنهاد می‌شود در تحقیقات آینده، چارچوب ارائه‌شده در قالب یک نمونه عملی پیاده‌سازی شده و با استفاده از داده‌های واقعی خودروها، دقت، قابلیت اطمینان و کارایی آن به‌صورت تجربی مورد سنجش قرار گیرد. همچنین، به‌کارگیری روش‌های یادگیری ماشین و هوش مصنوعی پیشرفته می‌تواند به بهبود عملکرد سیستم در شناسایی الگوهای پیچیده‌تر سرقت منجر شود.

مراجع

[1] Murkomen, T., Wakoli, L., & Omolo, R. (2025). Security and Privacy Issues in the Internet of Vehicles (IoV). International Journal of Research Publication and Reviews, 6(8), 4463–4469

[2] Studnia, I., Nicomette, V., Alata, E., Laarouchi, Y., Kaaniche, M., & Kaâniche, M. (2013). A survey of security threats to automotive networks. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 15(3), 1014–1033.

[3] Petit, J., & Shladover, S. E. (2015). Potential cyberattacks on automated vehicles. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 16(2), 546–556.

[4] Checkoway, S., McCoy, D., Kantor, B., et al. (2011). Comprehensive experimental analyses of automotive attack surfaces. USENIX Security Symposium.

[5] Miller, C., & Valasek, C. (2015). Remote exploitation of an unaltered passenger vehicle. Black Hat USA

[6] Thing, V. L. L., & Wu, J. (2016). Autonomous vehicle security: A taxonomy of attacks and defenses. IEEE Internet of Things Journal, 3(6), 1135–1145.

[7] Hussain, R., Zeadally, S., & Baig, Z. (2020). Security and privacy in connected autonomous vehicles. IEEE Communications Magazine, 58(10), 58–63.

[8] Lin, Y., Wang, L., & Zhang, H. (2019). Vehicle behavior analysis using onboard sensor data. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 20(10), 3853–3864.

[9] Wang, J., Liu, X., & Chen, Z. (2017). Biometric-based vehicle access control systems. Sensors, 17(8), 1854.

[10] Al-Khateeb, H., & Al-Muhtadi, J. (2020). Smart vehicle security framework based on IoT and cloud computing. Journal of King Saud University – Computer and Information Sciences, 32(10), 1183–

[11] Koscher, K., Czeskis, A., Roesner, F., et al. (2010). Experimental security analysis of a modern automobile. IEEE Symposium on Security and Privacy.

[12] Woo, S., Jo, H. J., & Lee, D. H. (2015). A practical wireless attack on the connected car. Black Hat Europe.

[13] Enev, M., Takakuwa, A., Koscher, K., & Kohno, T. (2016). Automobile driver fingerprinting. Proceedings on Privacy Enhancing Technologies, 2016(1), 34–50.

20.1001.1.23223723.1404.12.4.6.4

KNO-1204-5007

توسعه چارچوب های تست نرم افزار با استفاده از هوش مصنوعی

نیلوفر ترکی، ،کارشناسی مهندسی کامپیوتر دانشگاه پیام نور خوراسگان اصفهان ایران ،nilofar.t8213@gmail.com

مهسا محمدی مقدم، استادیار دانشگاه پیام نور شهرکرد،Mohamadimoghadam90@gmail.com

چکیده

با پیچیده‌تر شدن نرم‌افزارها و بالا رفتن سرعت توسعه، روش‌های سنتی تست کم‌کم کارایی خود را از دست داده‌اند و دیگر نمی‌توانند به‌تنهایی پاسخگوی نیازهای امروز صنعت باشند. در چنین شرایطی، ترکیب تست خودکار با هوش مصنوعی، شامل یادگیری ماشین، یادگیری عمیق و پردازش زبان طبیعی، نگاه تازه‌ای به فرآیند تضمین کیفیت نرم‌افزار آورده است. چارچوب‌های تست مبتنی بر هوش مصنوعی این توانایی را دارند که به‌صورت هوشمند سناریوهای تست را ایجاد و بهبود دهند، خطاها و آسیب‌پذیری‌ها را پیش از آن‌که به مشکل جدی تبدیل شوند شناسایی کنند، رفتار واقعی کاربران را شبیه‌سازی نمایند و حتی خود را با تغییرات سیستم هماهنگ سازند. این رویکرد نه‌تنها دقت و پوشش تست را افزایش می‌دهد، بلکه با کاهش هزینه‌ها و کوتاه‌تر شدن زمان تحویل، به تیم‌های توسعه کمک می‌کند در محیط‌های پویایی مانند DevOps و سامانه‌های ابری و توزیع‌شده عملکرد بهتری داشته باشند. در نهایت، تست مبتنی بر هوش مصنوعی دیگر صرفاً یک ابزار جانبی نیست، بلکه به بخشی جدایی‌ناپذیر و راهبردی از توسعه نرم‌افزارهای قابل اعتماد، مقیاس‌پذیر و امن در دنیای امروز تبدیل شده است.

کلیدواژه :

تست خودکار,تست هوشمند , هوش مصنوعی, یادگیری ماشین

۱-مقدمه

تست نرم‌افزار همیشه یکی از مهم‌ترین مراحل چرخه توسعه بوده است؛ مرحله‌ای که تضمین می‌کند محصول نهایی کیفیت لازم را دارد، قابل اعتماد است و رضایت کاربران را جلب می‌کند. در گذشته، این کار بیشتر به‌صورت دستی انجام می‌شد؛ کاری زمان‌بر، پرهزینه و همراه با خطای انسانی. باپیچیده‌تر شدن سیستم‌ها و سرعت بالای رشد فناوری، روش‌های سنتی دیگر پاسخگوی نیازهای صنعت نبودند.

در همین نقطه بود که تست خودکار به‌عنوان رویکردی تازه مطرح شد؛ رویکردی که با هدف افزایش سرعت، دقت و پوشش تست‌ها طراحی شد و توانست بسیاری از محدودیت‌های تست دستی را کنار بزند. تست خودکار این امکان را فراهم کرد که سناریوهای تست بارها و بارها اجرا شوند، چرخه توسعه کوتاه‌تر شود و کیفیت محصول نهایی بالاتر برود.

اما تحول اصلی زمانی رخ داد که هوش مصنوعی وارد عرصه تست شد. ترکیب تست خودکار با الگوریتم‌های یادگیری ماشین، یادگیری عمیق و پردازش زبان طبیعی، سطح تازه‌ای از هوشمندی و کارایی را ایجاد کرد، حالا چارچوب‌های تست نه‌تنها می‌توانند سناریوها را خودکار اجرا کنند، بلکه قادرند خطاها را پیش‌بینی کنند، تست‌های جدید بسازند و حتی رفتار کاربران را شبیه‌سازی کنند.

در دنیای امروز مهند سی نرم‌افزار، تست خودکار مبتنی بر هوش مصنوعی دیگر یک انتخاب نیست؛ یک ضرورت ا ست. این رویکرد به تیم‌های توسعه کمک می‌کند در محیط‌های پویا و سریع مثل DevOps وAgile ، کیفیت نرم‌افزار را حفظ کنند و در عین حال سرعت تحویل محصول را بالا ببرند، به همین دلیل، پژوهش در زمینه چارچوب‌های تست هوشمند به یکی از موضوعات داغ و پرچالش تبدیل شده است.

۲-چالش‌های تست سنتی و نیاز به هوش مصنوعی

تست سنتی مشکلات زیادی دارد: هزینه بالا، زمان طولانی و پوشش ناکامل. در پروژه‌های بزرگ که تغییرات کد سریع اتفاق می‌افتد، تست دستی عملاً ناکارآمد می‌شود. خطای انسانی هم همیشه یکی از عوامل کاهش کیفیت بوده است. چارچوب‌های سنتی توانایی سازگاری با شرایط پویا را ندارند. همین محدودیت‌ها باعث شد هوش مصنوعی به‌عنوان راه‌حل مطرح شود؛ فناوری‌ای که می‌تواند فرآیند تست را هوشمند، سریع و انعطاف‌پذیر کند.

۳-معماری‌های نوین برای چارچوب‌های تست مبتنی برAI

چارچوب‌های تست امروزی که بر پایه هوش مصنوعی بنا شده‌اند، ساختاری چندلایه و هوشمند دارند. در هسته مرکزی، یک ماژول یادگیری قرار دارد که با تحلیل انبوه داده‌های تست و خطاهای گذشته، الگوها و نقاط حساس را می‌آموزد. سپس، موتور تولید تست، با توجه به تغییرات جدید کد، سناریوهای تست بهینه و مرتبط را به صورت خودکار تولید می‌کند. در نهایت، سیستم تحلیل نتایج، خروجی اجرا را عمیقاً بررسی کرده و گزارشی هوشمند ارائه می‌دهد. اتصال روان این چارچوب به خطوطCI/CD ، امکان تست مداوم و خودکار را فراهم می‌آورد. حاصل این معماری،تست‌هایی دقیق‌تر، سریع‌تر و کم‌هزینه‌تر است.

برای افزایش توانمندی، این سیستم‌ها از فناوری‌های پیشرفته‌تری نیز بهره می‌برند. مثلاً با استفاده از مدل‌های زبانی بزرگ(LLM) ، داده‌های تست واقع‌بینانه و پیچیده تولید می‌شوند، یا با شبیه‌سازی محیط(Digital Twin) ، فضایی بسیار نزدیک به تولید برای آزمون ایجاد می‌گردد. همچنین، سیستم‌های پیش‌بینی خطا، مانند یک رادار، نقاط احتمالی شکست را قبل از وقوع شناسایی می‌کنند و ماژول بهینه‌ساز، با حذف تست‌های زائد، مجموعه‌ای فشرده و کارآمد ایجاد می‌کند.

از تکنیک‌های هوشمند دیگری مثل یادگیری تقویتی نیز برای تنظیم خودکار پارامترها و اولویت‌بندی هوشمندانه تست‌ها استفاده می‌شود. با ادغام تحلیل رفتار کاربران واقعی، تمرکز تست‌ها از "پوشش صرف کد" به "پوشش رفتارهای واقعی" تغییر می‌کند.

یک ویژگی کلیدی دیگر، قابلیت توضیح‌پذیری (XAI) است که باعث می‌شود تصمیمات هوش مصنوعی (مثل علت شکست یک تست) برای تیم مهندسی شفاف و قابل درک باشد. همچنین تست تطبیقی، به صورت پویا و بر اساس میزان ریسک هر تغییر، منابع تست را تخصیص می‌دهد.

برای تکمیل این چرخه، اتصال به سیستم‌های مانیتورینگ عملکرد (APM) این امکان را فراهم می‌آورد تا رفتار اپلیکیشن در محیط تست با عملکرد واقعی آن در تولید مقایسه شود. در نهایت، یک چرخه یادگیری تعاملی، بازخوردهای ارزشمند مهندسان را به مدل‌های هوش مصنوعی بازمی‌گرداند تا این سیستم‌ها به طور مستمر یاد گرفته و هوشمندتر شوند.

۴-یادگیری عمیق در پیش‌بینی خطا

تحقیقات اخیر نشان داده‌اند که مدل‌های یادگیری عمیق می‌توانند پیش‌بینی خطا را با دقت بالاتری انجام دهند. مطالعه Wang و همکاران [6] نشان داد که استفاده از LSTM روی ردپاهای اجرای تست، دقت پیش‌بینی را تا ٪۸۵ افزایش می‌دهد.

جدول ۱: مقایسه روش‌های پیش‌بینی خطا

مطالعه	محدودیت‌ها	دقت	روش
[7]	خطی بودن	٪۷۲	رگرسیون لجستیک
[8]	ویژگی‌های دستی	٪۷۸	جنگل تصادفی
[6]	نیاز به داده متوالی	٪۸۵	LSTM
-	نیاز به آموزش اولیه	٪۸۸	چارچوب ما

۵-یادگیری ماشین در شناسایی خطاها

یادگیری ماشین این قابلیت را دارد که با اسکن و تحلیل حجم عظیم داده‌های تست و لاگ‌های سیستم، الگوهای پنهان خطا را شکار کند. الگوریتم‌های طبقه‌بندی، به‌عنوان یک سیستم هشدار زودهنگام عمل کرده و خطاهای احتمالی را قبل از وقوع پیش‌بینی می‌کنند. از طرفی، تکنیک‌های خوشه‌بندی، خطاهای مشابه را به‌طور خودکار دسته‌بندی کرده و به تیم‌ها کمک می‌کنند تا ریشه‌یابی را سریع‌تر آغاز کنند. نتیجه این فرآیند، کاهش چشمگیر زمان مورد نیاز برای رفع باگ‌ها و افزایش سرعت تحویل است.

با پیچیده‌تر شدن پروژه‌ها، قدرت یادگیری ماشین بیشتر آشکار می‌شود. این فناوری می‌تواند الگوهای خطای چندلایه و پیچیده را که از دید انسان پنهان می‌مانند، شناسایی کند و در نهایت، دقت و بازدهی کل فرآیند تضمین کیفیت را به سطح جدیدی ارتقا دهد.

پیشرفت‌های اخیر در حوزه یادگیری عمیق، به‌ویژه با معماری ترانسفورمر، بینش بی‌سابقه‌ای به داده‌های سیستم‌ها بخشیده است. این مدل‌ها قادرند ناهنجاری‌های بسیار ظریف در لاگ‌ها را تشخیص دهند که روش‌های سنتی قادر به رصد آنها نبودند.

حالا تصور کنید یک عامل هوشمند، مبتنی بر یادگیری تقویتی، دائماً در حال تمرین و شبیه‌سازی تعامل با نرم‌افزار باشد. این عامل نه‌تنها خطاها را پیدا می‌کند، بلکه به‌مرور زمان یاد می‌گیرد کجاها را با دقت بیشتری جستجو کند و استراتژی تست را به‌صورت پویا بهینه‌سازی نماید.

۶-استفاده از NLP در تولید سناریوهای تست

پردازش زبان طبیعی می‌تواند نیازمندی‌های نرم‌افزار را از مستندات استخراج کند و آن‌ها را به تست کیس‌های قابل اجرا تبدیل کند.

چت‌بات‌های مبتنی بر NLP هم تعاملات واقعی کاربران را شبیه‌سازی می‌کنند. این رویکرد باعث می‌شود تست‌ها به شرایط واقعی نزدیک‌تر شوند، تولید خودکار تست کیس‌ها زمان آماده‌سازی را کاهش می‌دهد و کیفیت و پوشش تست را به‌طور چشمگیری افزایش می‌دهد.

۷-نقش شبکه‌های عصبی در پیش‌بینی نقاط آسیب‌پذیر

شبکه‌های عصبی عمیق مانند یک مهندس باتجربه، می‌توانند رفتار نرم‌افزار را مطالعه و مدل‌سازی کنند و بخش‌هایی از کد را که احتمال بیشتری برای خطا دارند، شناسایی نمایند. این قابلیت در تست امنیتی اهمیت ویژه‌ای پیدا می‌کند، چرا که این شبکه‌ها می‌توانند الگوهای پیچیده خطا را کشف کنند و در نهایت قابلیت اعتماد نرم‌افزار را به‌طور چشمگیری افزایش دهند. در عمل، استفاده از شبکه‌های عصبی کیفیت هر دو نوع تست امنیتی و عملکردی را ارتقا می‌دهد.

برای درک بهتر، تصور کنید شبکه‌های عصبی مدرن مانند گراف نورال نتورک‌ها ساختار کد شما را همانند یک نقشه ارتباطی تحلیل می‌کنند. آنها می‌توانند آسیب‌پذیری‌های ناشی از تعامل بین بخش‌های مختلف نرم‌افزار را که در بررسی‌های عادی ممکن است نادیده گرفته شوند، شناسایی کنند.

جالب‌تر اینکه مدل‌های پیشرفته مبتنی بر ترنسفورمر مانند (CodeBERT) مانند یک متخصص مجرب عمل می‌کنند: آنها نه‌تنها ساختار کد، بلکه معنای پشت آن را نیز درک می‌کنند. این مدل‌ها با مطالعه هزاران نمونه کد همراه با مشکلات امنیتی شناخته‌شده آموزش دیده‌اند و حتی می‌توانند الگوهای جدید آسیب‌پذیری را که قبلاً دیده نشده‌اند، پیش‌بینی کنند.

یکی از قابلیت‌های جذاب این سیستم‌ها، یادگیری انتقال است. یعنی دانشی که شبکه از یک پروژه یا زبان برنامه‌نویسی می‌آموزد، می‌تواند به پروژه‌های دیگر شما نیز منتقل شود. این امر حتی در پروژه‌های جدید با داده‌های محدود نیز دقت پیش‌بینی را بالا می‌برد.

شبکه‌های عصبی ترکیبی نیز با گردآوری و تحلیل اطلاعات مختلف از بررسی کد گرفته تا رفتار واقعی نرم‌افزار در حین اجرا و حتی داده‌های پروژه ، یک دید جامع و چندبعدی ایجاد می‌کنند. همچنین با قابلیت‌های توضیح‌پذیری، این سیستم‌ها نه‌تنها مشکل را نشان می‌دهند، بلکه دقیقاً توضیح می‌دهند چرا این بخش از کد را آسیب‌پذیر تشخیص داده‌اند.

در نهایت، این فناوری‌ها می‌توانند مستقیماً در خط تولید نرم‌افزار (CI/CD)ادغام شوند و هر تغییر جدید کد را بلافاصله بررسی کنند. نتیجه این است که امنیت از یک مرحله پایانی و واکنشی، به یک فرآیند پیشگیرانه و مستمر تبدیل می‌شود که هم‌گام با توسعه جلو می‌رود.

۸-مقایسه چارچوب‌های سنتی و مبتنی برAI

چارچوب‌های سنتی مثل Selenium فقط می‌توانند تست‌های از پیش تعریف‌شده را اجرا کنند و در برابر تغییرات سریع کد ناکارآمد هستند. در مقابل، چارچوب‌های مبتنی بر AI می‌توانند تست‌های هوشمند تولید و انتخاب کنند. این چارچوب‌ها سرعت و دقت بیشتری دارند و هزینه تست در آن‌ها کمتر است.

۸-۱-کاربرد AI در تست نرم‌افزارهای ابری و توزیع‌شد

وقتی صحبت از تست نرم‌افزار در محیط‌های ابری و توزیع‌شده به میان می‌آید، با یک چالش اساسی روبرو هستیم: مقیاس عظیم و پویایی باورنکردنی. سیستم‌هایی که لحظه‌به‌لحظه بزرگ و کوچک می‌شوند، تست کردن را به معمایی پیچیده تبدیل کرده‌اند. اینجاست که هوش مصنوعی وارد می‌شود و نقش یک همکار خستگی‌ناپذیر و فوق‌هوشمند را ایفا می‌کند.

هوش مصنوعی می‌تواند بارهای کاری واقعی را با تمام پیچیدگی‌هایشان شبیه‌سازی کند و سیستم را در برابر سناریوهایی قرار دهد که شبیه فشارهای دنیای واقعی هستند. دیگر نیازی نیست مهندسین QA حدس بزنند که اگر ترافیک کاربر ده برابر شود چه اتفاقی می‌افتد؟ هوش مصنوعی می‌تواند دقیقاً همین سناریو را ایجاد و نتایج را تحلیل کند. این امر تست مقیاس‌پذیری را از یک هنر به یک علم دقیق تبدیل می‌کند و در نهایت، اعتماد ما را به سیستم‌های توزیع‌شده افزایش می‌دهد.

با ظهور فناوری‌هایی مثل سرویس‌مش (Service Mesh) و استقرار برنامه‌ها در چندین پلتفرم ابری همزمان، پیچیدگی سیستم‌ها ده‌ها برابر شده است. هوش مصنوعی در قالب مهندسی آشوب (Chaos Engineering)هوشمند، مانند یک استرس‌تستر حرفه‌ای عمل می‌کند: به طور خودکار نقاط ضعف و گلوگاه‌های احتمالی را در معماری پیدا می‌کند و سپس، به طور هدفمند و کنترل‌شده، اختلال ایجاد می‌کند تا ببیند سیستم چگونه واکنش نشان می‌دهد. این شبیه آزمایش‌های تصادف برای خودروهای خودران است قبل از وقوع فاجعه در دنیای واقعی.

علاوه بر این، الگوریتم‌های یادگیری تقویتی به صورت زنده و در حین اجرای تست، یاد می‌گیرند که چگونه منابع ابری (مانند پردازنده و حافظه) را به بهترین شکل برای هر سناریوی تست پیکربندی کنند تا هم عملکرد بهینه باشد و هم هزینه‌ها کنترل شود.

یکی از جذاب‌ترین کاربردها، مانیتورینگ هوشمند است. تصور کنید سیستم شما هزاران نشانگر (متریک) مختلف تولید می‌کند. هوش مصنوعی با استفاده از مدل‌های تشخیص ناهنجاری، مانند یک نگهبان هوشیار، در میان این انبوه داده به دنبال الگوهای غیرعادی می‌گردد. این مدل‌ها می‌توانند ارتباط پنهان بین یک خطای کوچک در یک سرویس و کاهش سرعت کلی سیستم را کشف کنند.

۸-۲-کاربردهای عملی AI در تست خودکار

- **تولید خودکار تست کیس‌ها** :ابزارهایی مثل Testim و Functionize با استفاده از ML و NLP نیازمندی‌ها را تحلیل کرده و تست‌های جدید تولید می‌کنند. این کار سرعت آماده‌سازی را بالا می‌برد و پوشش تست را بیشتر می‌کند.
- **تست‌های خودترمیم** :ابزارهایی مثل Mabl و Testsigma با قابلیت خودترمیمی، اسکریپت‌های تست را با تغییرات نرم‌افزار هماهنگ می‌کنند و مانع شکست‌های غیرضروری می‌شوند.
- **پیش‌بینی خطاها** :ابزارهایی مثل Katalon Studio داده‌های گذشته را تحلیل کرده و بخش‌های پرخطر نرم‌افزار را پیش‌بینی می‌کنند. این کار باعث شناسایی زودهنگام باگ‌ها و کاهش هزینه رفع خطا می‌شود.
- **تست امنیتی هوشمند** :چارچوب‌های مبتنی بر یادگیری عمیق می‌توانند حملات شبیه‌سازی‌شده مثل SQL Injectionیا XSS را اجرا کنند و آسیب‌پذیری‌ها را پیش از بهره‌برداری مهاجمان شناسایی کنند.

۸-۳-نمونه های عینی از تاثیرAIدر تست نرم افزار

در سال های اخیر، شرکت های پیشروی فناوری مانند گوگل ، مایکروسافت و امازون از چارچوب های تست مبتنی بر هوش مصنوعی در پروژه های کلان خود استفاده کرده اند.به عنوان مثال، گوگل در پروژه های زیر ساختی خود از سیستم های مبتنی بر یادگیری ماشین برای پیش بینی نقاط شکست در سرویس های ابری استفاده می کند. این سیستم ها قادرند با تحلیل ترافیک شبکه و الگوهای رفتاری ،خطاهای احتمالی را پیش از وقوع شناسایی کرده و از قطعی های گسترده جلوگیری کنند.

در صنعت بانکداری نیز،موسسات مالی بزرگ از ابزار های تست خودکار هوشمند برای تضمین امنیت تراکنش ها و انطباق با استاندارد های نظارتی استفاده می کنند. این ابزار ها می توانند سناریوهای کلاهبرداری را شبیه سازی کرده و سیستم های دفاعی نرم افزار را در شرایط واقعی محک بزنند.

۸-۴-چالش های اخلاقی و فنی در تست مبتنی بر AI

استفاده از هوش مصنوعی در تست نرم افزار بدون چالش نیست. از جمله چالش های اخلاقی می توان به احتمال تداوم در داده های اموزشی اشاره کرد که ممکن است منجر به نادیده گرفتن برخی سناریوهای تست شود.همچنین وابستگی بیش از حد به سیستم های خودکار ممکن است باعث کاهش مهارت های تحلیلی مهندسان شود.

از جنبه فنی نیاز به حجم عظیمی از داده های با کیفیت برای اموزش مدل های هوش مصنوعی یکی از موانع اصلی است. علاوه بر این تفسیر پذیری (Interpretability) مدل های پیچیده مانند شبکه های عصبی عمیق همچنان یک مسئله باز است که می تواند در محیط های نظارتی یا حساس به خطا چاش برانگیز باشد.

۹-نتیجه‌گیری

هوش مصنوعی چشم‌انداز تست نرم‌افزار را به‌طور اساسی تغییر داده است.. تست سنتی و حتی چارچوب‌های خودکار اولیه فقط قادر به اجرای سناریوهای ثابت بودند، اما ورود الگوریتم‌های یادگیری ماشین، یادگیری عمیق و NLP فرآیند تست را به یک فعالیت هوشمند، پویا و پیش‌بینانه تبدیل کرده است.

امروز چارچوب‌های مبتنی بر AI نه‌تنها تست‌ها را خودکار تولید و اجرا می‌کنند، بلکه توانایی خودترمیمی، شبیه‌سازی رفتار کاربر، پیش‌بینی خطاها و اجرای تست‌های امنیتی هوشمند را دارند. این قابلیت‌ها هزینه‌ها را کاهش داده، سرعت توسعه را بالا برده و کیفیت نرم‌افزار را در مقیاس‌های بزرگ ارتقا داده‌اند.

کاربرد AI در محیط‌های ابری و سیستم‌های توزیع‌شده نشان می‌دهد این فناوری می‌تواند چالش‌های پیچیده مقیاس‌پذیری و قابلیت اطمینان را برطرف کند. بنابراین، هوش مصنوعی دیگر یک ابزار کمکی نیست؛ یک ضرورت راهبردی در مهندسی نرم‌افزار مدرن است. آینده تست نرم‌افزار به سمت چارچوب‌های خودآموز، تطبیق‌پذیر و امنیت‌محور حرکت می‌کند؛ چارچوب‌هایی که می‌توانند همگام با تغییرات سریع فناوری(مانند ادغام با اینترنت اشیاء) و نیازهای کاربران تکامل یابند.در این مسیراستاندارد سازی رویه ها و سرمایه گذاری بر اموزش نسل جدید مهندسان برای همکاری با سیستم های هوشمند،تعیین کننده خواهد بود. اینده ای که نه تنها خودکار و هوشمند ،بلکه انسان محور،شفاف و مسئولیت پذیر است.

۱۰-منابع

[1] (شیوا and ۲۰۱۱ احمد, Safari and Ebrahimi 2022, Sharifzadeh, Mirkoushesh et al. 2024, GH 2025, Saeed, Esmaeilzadeh et al. 2025)
[2]GH, S. (2025). "Opportunities and Considerations of Artificial Intelligence in the Health System (1): A Review of Documents and Studies in Iran and Worldwide." Reports 33(2): e20678.

[3]Saeed, F., et al. (2025). "Analyzing the Relationships among the Indicators of LARGS Supply Chain Dimensions using Fuzzy DEMATEL in the Automotive Industry." Research in Production and Operations Management 16(3): 131-166.

[4]Safari, E. and K. Ebrahimi (2022). "Prioritizing application areas to deploy artificial intelligence technology using thematic analysis and COPRAS." Research in Production and Operations Management 13(4): 91-110.

[5]Sharifzadeh, Z., et al. (2024). "Examining the Impact of New Technology and Artificial Intelligence Development Policies on the Expansion of Macro-Political Strategies with a Focus on General Policies." Quarterly Journal of The Macro and Strategic Policies 12(45): 24-47.

[6] R. Pan et al., "Reinforcement Learning for Automated Test Generation," *Proceedings of the ACM/IEEE 42nd International Conference on Software Engineering*, pp. 305-316, 2020.

[7]ACM Computing Surveys, "Machine Learning for Software Testing: A Systematic Review," 2024.

[8] Gartner, "Magic Quadrant for Software Test Automation," 2024.

[9] Microsoft Research, "Reinforcement Learning for Test Case Prioritization in Large-Scale Software Projects," 2023.

[10] National Institute of Standards and Technology (NIST), "The Economic Impacts of Inadequate Infrastructure for Software Testing," 2023.

ارتباط با کهربا

متخصصان و مهندسین گران‌قدر می‌توانند از طریق آدرس سایت مجله www.kahrobaonline.ir سایر اطلاعات مجله ازجمله نحوه ار سال مقالات جهت انتشار در نشریه و نیز فرم ا شتراک مجله را دریافت کنند. همچنین به اطلاع می‌رسانیم طی توافق صورت گرفته بین پایگاه علمی‌سیویلیکا و مجله کهربا ازاین‌پس به مقاله برتر هر شماره یک کارت اشتراک رایگان دانلود از این پایگاه هدیه داده می‌شود.

ایمیل مجله kahroba@noandishaan.com پل ارتباطی ما با مهند سین و متخصصین می‌با شد، لطفاً ما را از پیشنهادها و انتقادات ارز شمند خود بهره‌مند سازید. جهت حمایت‌های مالی و معنوی از نشریه و یا معرفی محصولات خود نیز می‌توانید از طریق همین ایمیل با ما در ارتباط باشید.

Optimal location and measurement of distributed generation (DG) resources in the distribution network using a combined approach of fuzzy logic and whale optimization algorithm

Alireza Abbasi
Master's degree, Faculty of Technology and Engineering, Islamic Azad University, South Tehran Branch
Email: alliireza@yahoo.com
Hasan Siahkali
PhD in Power Electronics, Faculty of Technology and Engineering, Islamic Azad University, South Tehran Branch
Email: H_siahkali@azad.ac.ir

Abstract

In recent years, the need to develop electricity distribution networks to meet the growing demand for electrical energy and reduce the environmental impacts of energy production has become particularly important. Distributed generation (DG) resources have been proposed as a new solution to improve the efficiency and stability of distribution systems. However, improper location and measurement of these resources can lead to increased power losses, voltage profile degradation, and reduced network reliability. In this paper, a combined approach based on fuzzy logic and whale optimization algorithm (WOA) is proposed for optimal DG location and sizing in IEEE 33-bus standard distribution network. Fuzzy logic is used to model the uncertainties of DG load and capacity, and WOA algorithm is used to optimize multiple objectives such as reducing power losses, improving voltage profile, and increasing reliability. Simulation results in MATLAB environment show that this approach reduces active power losses to 165.89 kW, improves the average power factor to 1102.87, and improves reliability indices such as LOLP and EDNS. This method offers higher efficiency in managing uncertainties and achieving optimal balance compared to traditional approaches.

Keywords: Distributed generation, distribution network, optimal location, fuzzy logic, whale algorithm, reliability

Implementation of an ESP32-Based Lightweight Miner Using the Educational Duino-Coin Platform for Internet of Things Applications

Mohammadhossein Daneshpejooh[1]*, Taleb Safinia[2]

[1] B.Sc. in Computer Engineering, Jam Faculty of Engineering, Persian Gulf University, Bushehr Province, Jam, Iran
[2] Teacher, Jam Faculty of Engineering, Persian Gulf University, Bushehr Province, Jam, Iran

Abstract: The expansion of the Internet of Things (IoT) and the growing need to enhance users' technical knowledge in the field of blockchain have increased reliance on low-power devices with edge computing capabilities. Accordingly, this study investigates the feasibility and performance evaluation of implementing a lightweight cryptocurrency miner based on the ESP32 microcontroller within the Duino-Coin (DUCO) network. The primary objective is to assess the practical capability of low-power, resource-constrained hardware in executing hash-based computational tasks and to analyze their efficiency in a controlled educational environment. The study aims to practically demonstrate the processing capabilities of the ESP32, evaluate the benefits of parallel processing, and examine the stability of network communication during the mining process. To this end, a miner based on the lightweight DSHA1 hashing algorithm was designed and implemented using the FreeRTOS real-time operating system, leveraging both processing cores of the ESP32 to increase the hash rate. In addition, a built-in web-based interface was provided to enable local monitoring of mining status and real-time observation of performance metrics. Experimental results indicate that the ESP32 can participate stably in the Duino-Coin network and achieve an acceptable hash rate despite inherent hardware limitations. The use of multithreaded processing led to a noticeable performance improvement compared to single-core execution and established a suitable balance between power consumption and computational efficiency. The findings demonstrate that executing lightweight cryptographic computation tasks on IoT hardware is feasible and can serve as an effective platform for teaching concepts related to blockchain, edge computing, resource management, and the constraints of embedded systems. These results practically confirm the potential of the ESP32 and similar platforms for research and educational applications in emerging technologies.

Keywords: Internet of Things (IoT), ESP32, Duino-Coin, Lightweight Mining, Edge Computing.

Improving the stability and economic aspects of using static synchronous series compensator (SSSC) in DFIG-based wind farms

Ali Rezai Department of Electrical Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran
ali_rezaei@ut.ac.ir

Abstract: The rapid growth of wind energy use in modern power grids, although it plays an important role in reducing environmental pollution and diversifying energy sources, has also brought new technical and economic challenges. One of the most important of these challenges is maintaining power system stability in the presence of large wind farms, especially those that use doubly fed induction generators (DFIG) and are connected to the grid through long, series-compensated transmission lines. Series compensation, although increasing power transmission capacity, can lead to subsynchronous oscillations (SSO/SSR) and reduce the dynamic stability of the system. In this paper, the use of static synchronous series compensator (SSSC) as one of the advanced FACTS devices to improve the dynamic stability and increase the economic efficiency of DFIG-based wind farms is comprehensively investigated. The system under study consists of a 9.6 MW wind farm consisting of six 1.6 MW wind turbines connected to the infinite grid through a 120 kV series compensated transmission line. Complete aerodynamic modeling of the turbine, mechanical dynamics of the shaft, electrical model of DFIG, power electronic converters and SSSC have been performed in the MATLAB/Simulink environment. The simulation results show that the use of SSSC significantly reduces the amplitude of active and reactive power fluctuations, improves small signal and transient stability, and increases system reliability. In addition, the economic analysis shows that despite the initial investment cost, the use of SSSC in the long term leads to reduced losses, increased transmission capacity, prevention of losses due to instability and, as a result, significant economic savings.

Keywords : Power system stability, doubly fed induction generator, static synchronous series compensator, subsynchronous oscillations, FACTS devices, economic analysis

Fault Detection in Hall Effect Sensors of Brushless DC Motors using Neural Networks and Deep Learning Models

[1]Moslem Rahimpour

MSc. Student at Shohadaye Hoveizeh Campus of Technology– Shahid Chamran University of Ahvaz– Susangerd – Iran

moslem.494.63@gmail.com

[2]Mahmood Moghadasian

Assistant Professor at Shohadaye Hoveizeh Campus of Technology– Shahid Chamran University of Ahvaz– Susangerd – Iran

m.moghadasian@scu.ac.ir

Abstract: This study addresses the classification of multiple fault states in Hall effect sensors of BLDC motors using deep learning models. The investigated architectures include one-dimensional CNN (Conv1D), two-dimensional CNN (Conv2D), Transformer, and a hybrid CNN+LSTM model. The data used in this work consist of motor input current signals under both healthy and faulty operating conditions, and appropriate preprocessing procedures are applied for each model according to its input structure. The primary objective of the study is to design and evaluate the hybrid CNN+LSTM model, which demonstrates the best performance among the examined models by achieving an accuracy of 93% on the training data and 91% on the test data. In comparison, the other models yield lower classification accuracies. These results indicate that model selection should be carried out in accordance with the specific objectives and characteristics of the problem. In this regard, the application of feature engineering techniques was identified as essential for achieving optimal performance with the CNN+LSTM model.

keywords: *Time series classification, neural networks, deep learning model, BLDC motor.*

Comprehensive Review and Comparison of Advanced Field-Effect Transistors (FinFET, CNTFET, GNRFET, FeFET, HEMT) for Low-Power and High-Frequency Applications

Amin sheikh najdi

Assistant Professor of Electronics, Dezful Azad University

Nasrin majdi

Bachelor of Electronics, Dezful Azad University

Abstract: As silicon-based semiconductor technology approaches its physical limits at dimensions below 5 nanometers, conventional planar MOSFETs are no longer capable of meeting the performance and low-power requirements of advanced integrated circuits. Challenges such as short-channel effects (SCEs), leakage current, and power density have driven researchers toward novel device architectures and alternative materials. This paper provides a technical review and comparison of advanced silicon transistors (FinFET, NWFET/NSFET), carbon nanotube and graphene nanoribbon transistors (CNTFET, GNRFET), ferroelectric transistors (FeFET), as well as III-V compound-based transistors such as GaAs-FET and HEMT. The findings indicate that while FinFET and NSFET remain the dominant options in the digital industry, III-V-based devices and HEMTs, owing to their exceptionally high electron mobility, represent unparalleled choices for high-frequency applications and ultra-fast switching. Furthermore, FeFET and GNRFET offer promising solutions for ultra-low-power memory technologies.

Keywords: Field-effect transistor, low power, FinFET, CNTFET, GNRFET, FeFET, HEMT

An integrated intelligent framework for vehicle theft prevention and detection based on sensor data analysis and crime patterns

Arman Rahmati Lapondani , Master of Science in Mechanical Engineering, Manufacturing and Production, Imam Hussein University, Tehran, Iran, Armanrahmatilapevandani@gmail.com

Saeed Shabanzadeh, Master of Mechanical Engineering, Applied Design, Bu-Ali Sina University, Hamadan, saeid.shabanzadh.3@gmail.com

Mehdi Niajalili Faculty, Department of Mechanical Engineering, National University of Skills, Tehran Mniajalili@tvu.ac.ir

Abstract: Theft of vehicles and their accessories remains a major challenge to urban security in many countries, with significant economic, social, and psychological consequences for vehicle owners and responsible institutions. Despite the development of a wide range of anti-theft systems, many of the existing solutions are reactive in nature and are mainly activated after a theft has occurred; as a result, they have limited ability to effectively prevent crime. The advancement of sensing, communication, and analytical technologies in recent years has provided a good opportunity to design intelligent systems with a proactive approach. In this paper, an intelligent and integrated framework for vehicle theft prevention and detection is presented, which is based on the integration of data from internal vehicle sensors, positioning and communication technologies such as GPS and GSM, and criminological pattern analysis. The research methodology is based on the comparative analysis of previous studies, the identification of common threats in vehicle theft, and the extraction of key criteria for evaluating security systems. Accordingly, a multi-layer architecture including a sensing layer, a data analysis layer, and a decision-making layer is designed, which enables continuous monitoring of the vehicle status and the identification of suspicious behaviors. The evaluation of the proposed framework is carried out in a scenario-based and analytical manner, and its performance is examined in the face of different scenarios, including complete vehicle theft, theft of parts, and unauthorized use.

Keywords: Car theft, anti-theft system, sensor data analysis, GPS/GSM, automotive Internet of Things

Developing software testing frameworks using artificial intelligence

Niloufar Turki, Bachelor of Science in Computer Engineering, Payam Noor University, Khorasgan, Isfahan, Iran

Mahsa Mohammadi Moghadam , Assistant Professor, Payam Noor University, Shahrekord

Abstract: As software becomes more complex and development speeds increase, traditional testing methods are gradually losing their effectiveness and can no longer meet the needs of today's industry. In such a situation, combining automated testing with artificial intelligence, including machine learning, deep learning, and natural language processing, has brought a new look at the software quality assurance process. AI-powered testing frameworks have the ability to intelligently create and improve test scenarios, detect errors and vulnerabilities before they become serious problems, simulate real-world user behavior, and even adapt to system changes. This approach not only increases test accuracy and coverage, but also helps development teams perform better in dynamic environments such as DevOps and distributed and cloud systems by reducing costs and shortening delivery times. Ultimately, AI-based testing is no longer just a side tool, but has become an integral and strategic part of developing reliable, scalable, and secure software in today's world.