شماره
۵۲
تابستان ۱۴۰۵

kahrobaonline.ir

فصلنامه
تخصصی برق و کامپیوتر

کهربا
KAHROBA MAGAZINE

Journal of Electrical and Computer Engineering

مجله آنلاین کهربا
مرجع تخصصی مهندسی برق و کامپیوتر

بررسی تأثیر فناوری WDR در دوربین‌های مداربسته بر تشخیص چهره در شرایط نور پس‌زمینه شدید

بررسی تأثیر فناوری تصویربرداری حرارتی بر قابلیت شناسایی اشیاء در دوربین‌های مداربسته مستقر در محیط‌های صنعتی دارای دود، گردوغبار و مه

اززیابی شاخص سلامت و سن ظاهری ترانسفورماتورهای قدرت با استفاده از مدل پادگیری ماشین مبتنی بر رگرسیون گرادیان بوستینگ

همگرایی اینترنت اشیا و شبکه هوشمند برق؛ گامی به سوی مدیریت پایدار انرژی

تولید و کاربرد آزمایشی پیکره آموزشی ماشین‌خوان از الگوهای خطاهای دستوری رایج در انگلیسی: پیوند تحلیل خطا، زبان‌شناسی پیکره‌ای و تحلیل مقابله‌ای کاربردی

بهبود تحمل‌پذیری خطای اتصال کوتاه و مدار باز در اینورتر چندسطحی آبشاری با استفاده از راهکار ترکیبی سخت‌افزاری و استراتژی سوئیچینگ

ISC
CIVILICA
magiran
پایگاه مجلات علمی ایران
وابسته به وزارت علوم، تحقیقات و فناوری
موسسه پژوهش و انتشار
سمت دانش
ISSN 2322-3723

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 سیمین خضرایی شولای فر (دکترای مهندسی برق-مخابرات سیستم)-استادیار گروه مهندسی برق دانشگاه آزاد اسلامی واحد کرج

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 ۳

یادداشت مدیرمسئول ۳

سخن سردبیر ۴

مقالات

ارزیابی شاخص سلامت و سن ظاهری ترانسفورماتورهای قدرت با استفاده از مدل یادگیری ماشین مبتنی بر رگرسیون گرادیان بوستینگ ۵

محمدمهدی توکلی ، کارشناسی ارشد، گروه مهندسی برق، دانشگاه تخصصی فناوری های نوین آمل

سید سعید موسوی ، استادیار، گروه انرژی های نو، دانشکده مهندسی، دانشگاه تخصصی فناوری های نوین آمل

همگرایی اینترنت اشیا و شبکه هوشمند برق؛ گامی به سوی مدیریت پایدار انرژی ۱۷

آیلین جهانشاهی[۱] ، سیمین خضرایی شولای فر[۲] (نویسنده مسئول)

[۱و۲] گروه مهندسی برق، واحد کرج، دانشگاه آزاد اسلامی، کرج، ایران

بهبود تحمل‌پذیری خطای اتصال کوتاه و مدار باز در اینورتر چند سطحی آبشاری با استفاده از راهکار ترکیبی سخت افزاری و استراتژی سوئیچینگ ۳۰

شکوفه میزانی، کارشناسی ارشد مهندسی برق -دانشگاه بین المللی امام خمینی قزوین

محمد سروی، عضو هیئت علمی دانشکده مهندسی برق دانشگاه علم و صنعت ایران

تولید و کاربرد آزمایشی پیکره آموزشی ماشین‌خوان از الگوهای خطاهای دستوری رایج در انگلیسی: پیوند تحلیل خطا، زبان‌شناسی پیکره‌ای و تحلیل مقابله‌ای کاربردی ۴۲

محمدرضا فلاحتی قدیمی فومنی،دانشیار گروه پژوهشی زبانشناسی رایانشی موسسه استنادی و پایش علم و فن آوری جهان اسلام (ISC) ، شیراز ، ایران

بررسی تأثیر فناوری تصویربرداری حرارتی بر قابلیت شناسایی اشیاء در دوربین‌های مداربسته مستقر در محیط‌های صنعتی دارای دود، گردوغبار و مه ۵۲

محمدصالح آقاشریفیان،کارشناسی مهندسی کامپیوتر،دانشگاه ملی مهارت شهرکرد، چهارمحال بختیاری،ایران

مصطفی عبدالهیان دهکردی،گروه مهندسی برق و کامپیوتر دانشگاه ملی مهارت ، تهران ، ایران

بررسی تأثیر فناوری wDR در دوربین‌های مداربسته بر تشخیص چهره در شرایط نور پس‌زمینه شدید ۶۱

شهاب ترکی ،کارشناسی مهندسی کامپیوتر ، دانشگاه ملی مهارت شهر کرد، چهارمحال بختیاری،ایران

مصطفی عبدالهیان دهکردی،گروه مهندسی برق و کامپیوتر دانشگاه ملی مهارت ، تهران ، ایران

ارتباط با کهربا ۶۹

چکیده انگلیسی مقالات ۷۰

درباره کهربا

مجله الکترونیکی کهربا، با همت و تلاش جمعی از دانشجویان و مهندسین برق، بخصوص اعضای انجمن علمیو پژوهشی نواندیشان، در سال هزار و سیصد و نود شروع به کارکرد. کهربا از سال ۹۱ با کسب شماره بین‌المللی استاندارد مجلات (ISSN:۲۳۲۲-۳۷۲۳) و ثبت در سازمان اسناد و کتابخانه ملی ایران، به‌عنوان فصلنامه‌ای رسمیو 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 رسانه‌های 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 چهاردهمین بهار فعالیت نشریه کهربا پا گذاشته‌ایم و پنجاه و دومین 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:

به نام خداوند جان و خرد

هر شماره از یک نشریه علمی، روایت کوتاهی از تلاش اندیشه برای شناخت بهتر جهان و یافتن راه‌حل‌هایی نو برای مسائل پیشِ روست. مجله کهربا در این شماره نیز با گردآوری مجموعه‌ای از پژوهش‌های علمی و کاربردی، گوشه‌ای از این تلاش پویا را پیش روی خوانندگان گرامی قرار داده است.

مقالات این شماره، با وجود تنوع موضوعی، در یک محور مشترک به هم می‌رسند: بهره‌گیری از دانش و فناوری‌های نوین برای افزایش دقت، کارایی، پایداری و قابلیت اطمینان سامانه‌ها. از بررسی فناوری WDR و تصویربرداری حرارتی در سامانه‌های نظارت تصویری گرفته تا کاربرد یادگیری ماشین در ارزیابی سلامت ترانسفورماتورها و همگرایی اینترنت اشیا با شبکه هوشمند برق، هر پژوهش بخشی از مسیر حرکت به سوی سامانه‌های هوشمندتر و کارآمدتر را ترسیم می‌کند.

در کنار این موضوعات، پژوهشی در زمینه تولید پیکره آموزشی ماشین‌خوان و پیوند تحلیل خطا، زبان‌شناسی پیکره‌ای و تحلیل مقابله‌ای کاربردی، گستره میان‌رشته‌ای این شماره را نشان می‌دهد. همچنین بررسی راهکارهای افزایش تحمل‌پذیری خطا در اینورترهای چندسطحی آبشاری، بر اهمیت ارتقای تاب‌آوری و قابلیت اطمینان تجهیزات الکترونیک قدرت تأکید دارد.

آنچه این مجموعه را به یکدیگر پیوند می‌دهد، حرکت از شناخت به کاربرد و از مسئله به راه‌حل است؛ مسیری که آینده علم و فناوری را شکل می‌دهد و ضرورت تعامل میان حوزه‌های مختلف دانش را بیش از پیش آشکار می‌سازد.

از نویسندگان، پژوهشگران، داوران و همه همکارانی که در شکل‌گیری این شماره از مجله کهربا نقش داشته‌اند، صمیمانه سپاسگزاریم و امید داریم این مجموعه، گامی در مسیر گسترش دانش، تقویت پژوهش‌های کاربردی و ایجاد افق‌های تازه برای جامعه علمی باشد.

20.1001.1.23223723.1405.13.2.1.2 KNO-1302-5201

ارزیابی شاخص سلامت و سن ظاهری ترانسفورماتورهای قدرت با استفاده از مدل یادگیری ماشین مبتنی بر رگرسیون گرادیان بوستینگ

محمدمهدی توکلی pezhman99t@gmail.com
سید سعید موسوی anchepoli@gmail.com
کارشناسی ارشد، گروه مهندسی برق، دانشگاه تخصصی فناوری های نوین آمل
استادیار، گروه انرژی های نو، دانشکده مهندسی، دانشگاه تخصصی فناوری های نوین آمل

چکیده: ترانسفورماتورهای قدرت از گران‌قیمت‌ترین و حیاتی‌ترین اجزای شبکه‌های انتقال و توزیع انرژی الکتریکی محسوب می شوند و پایش مستمر وضعیت عملکردی آن‌ها به‌منظور جلوگیری از خروج‌های ناگهانی و کاهش هزینه‌های سنگین تعمیرات، از اهمیت بالایی برخوردار است. ارزیابی دقیق وضعیت ناوگان ترانسفورماتورها نیازمند تحلیل جامع و یکپارچه داده‌های حاصل از آزمون‌های تشخیصی شیمیایی، آزمون‌های الکتریکی و همچنین پارامترهای حرارتی و بهره‌برداری است. در این پژوهش، یک سیستم هوشمند و داده‌محور مبتنی بر الگوریتم‌های یادگیری ماشین و یادگیری عمیق، با تمرکز بر الگوریتم پیشنهادی ***GBR***، به‌منظور محاسبه شاخص سلامت ***(Health Index - HI)*** و تخمین سن ظاهری یا امید به زندگی ***(Life Expectancy - LE)*** ترانسفورماتورهای قدرت توسعه داده شده است. مدل پیشنهادی با استفاده از مجموعه‌داده‌های واقعی آموزش داده شده و مراحل پیش‌پردازش، تنظیم پارامترها و ارزیابی عملکرد آن به‌صورت جامع انجام گرفته و در نهایت کارایی روش پیشنهادی در مقایسه با الگوریتم‌های متداول یادگیری ماشین و یادگیری عمیق با استفاده از معیارهای ارزیابی رگرسیون مقایسه شده است. نتایج شبیه سازی نشان می‌دهد که مدل پیشنهادی ***GBR*** به دلیل توانایی بالا در یادگیری روابط غیرخطی، با دستیابی به بیشترین مقدار ضریب تعیین ***(R^2)*** و کمترین میزان خطا عملکرد بهتری نسبت به سایر روش‌ها در تخمین شاخص سلامت و سن ظاهری ترانسفورماتور ارائه می‌دهد. این روش می‌تواند به‌عنوان ابزاری مؤثر در مدیریت بهینه دارایی‌ها، افزایش قابلیت اطمینان شبکه و برنامه‌ریزی تعمیرات پیشگیرانه در صنعت برق مورد استفاده قرار گیرد.

کلید واژه‌ها: *ترانسفورماتورهای قدرت، رگرسیون گرادیان بوستینگ، سن ظاهری، شاخص سلامت، یادگیری عمیق.*

۱. مقدمه

ترانسفورماتورهای قدرت از مهم‌ترین و گران‌قیمت‌ترین تجهیزات شبکه‌های انتقال و توزیع برق هستند و نقش اساسی در تبدیل سطوح ولتاژ و انتقال انرژی الکتریکی ایفا می‌کنند. هزینه بالای خرید، نصب، بهره‌برداری و جایگزینی این تجهیزات، همراه با پیامدهای گسترده خرابی آن‌ها بر عملکرد شبکه و مشترکان، ضرورت پایش وضعیت و مدیریت بهینه دارایی‌های ترانسفورماتور را دوچندان کرده است. اگرچه عمر نامی این تجهیزات معمولاً بین ۲۵ تا ۴۰ سال اعلام می‌شود، شرایط بهره‌برداری، بارگذاری، تنش‌های حرارتی و الکتریکی، عوامل محیطی و کیفیت نگهداری می‌توانند عمر واقعی آن‌ها را به میزان قابل توجهی کاهش دهند [۱-۸].

در این راستا، شاخص سلامت به عنوان ابزاری سریع و کارآمد برای ارزیابی، مقایسه و رتبه‌بندی وضعیت ترانسفورماتورهای یک ناوگان مورد توجه قرار گرفته است. این شاخص با ترکیب داده‌های حاصل از آزمون‌های تشخیصی، اندازه‌گیری‌های بهره‌برداری و سوابق عملکردی، وضعیت کلی تجهیز را در قالب یک امتیاز قابل تفسیر بیان می‌کند و امکان شناسایی ترانسفورماتورهای پرریسک، اولویت‌بندی

اقدامات نگهداری و پیشگیری از خرابی‌های ناگهانی را فراهم می‌سازد. با این حال، دقت و قابلیت اعتماد شاخص سلامت به کیفیت داده‌های ورودی، نحوه پردازش آن‌ها و توانایی مدل در برقراری ارتباط میان پارامترهای اندازه‌گیری‌شده و سازوکارهای خرابی و فرسودگی وابسته است [۹].

پیچیدگی رفتار ترانسفورماتورها، تأثیر هم‌زمان عوامل متعدد بر روند فرسودگی و وجود عدم قطعیت در داده‌های اندازه‌گیری و شرایط بهره‌برداری، از چالش‌های اصلی روش‌های سنتی ارزیابی سلامت به شمار می‌رود. ازاین‌رو، روش‌های مبتنی بر داده و الگوریتم‌های یادگیری ماشین و یادگیری عمیق به دلیل توانایی در استخراج الگوهای پنهان و مدل‌سازی روابط غیرخطی، به طور گسترده در این حوزه به کار گرفته شده‌اند. با وجود این، ارائه یک برآورد نقطه‌ای از شاخص سلامت یا سن ظاهری ترانسفورماتور، بدون در نظر گرفتن عدم قطعیت، ممکن است به تصمیم‌گیری‌های نگهداری و سرمایه‌گذاری کم‌اطمینان منجر شود [۱۰].

بنابراین، توسعه مدل‌های هوشمند و قابل اعتماد که علاوه بر پیش‌بینی شاخص سلامت و سن ظاهری، عدم قطعیت پیش‌بینی‌های خود را نیز کمی‌سازی کنند، از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. چنین مدل‌هایی می‌توانند تصویری واقع‌بینانه‌تر از وضعیت تجهیزات ارائه داده و با پشتیبانی از تصمیم‌های فنی و اقتصادی، به افزایش قابلیت اطمینان شبکه، کاهش هزینه‌های ناشی از خرابی و بهره‌برداری مؤثرتر از دارایی‌های قدرت کمک کنند.

در سال‌های اخیر، مدل‌سازی شاخص سلامت به یکی از روش‌های اصلی ارزیابی وضعیت ترانسفورماتورهای قدرت تبدیل شده است. در این رویکرد، داده‌هایی مانند کیفیت روغن، تحلیل گازهای محلول، وضعیت عایق، شرایط کاغذ عایقی و تنش‌های بهره‌برداری در قالب یک شاخص کلی ترکیب می‌شوند. بدلیل وجود عدم‌قطعیت و ابهام در این داده‌ها، روش‌های فازی و سیستم‌های استنتاج مبتنی بر دانش خبرگان برای تلفیق اطلاعات و ارائه ارزیابی جامع‌تر مورد استفاده قرار گرفته‌اند. همچنین، مدل‌های جدید امکان ترکیب هم‌زمان داده‌های برخط، آزمون‌های دوره‌ای و آمار خرابی را فراهم کرده و زمینه ارتباط شاخص سلامت با مفهوم سن ظاهری را ایجاد کرده‌اند [۱۱].

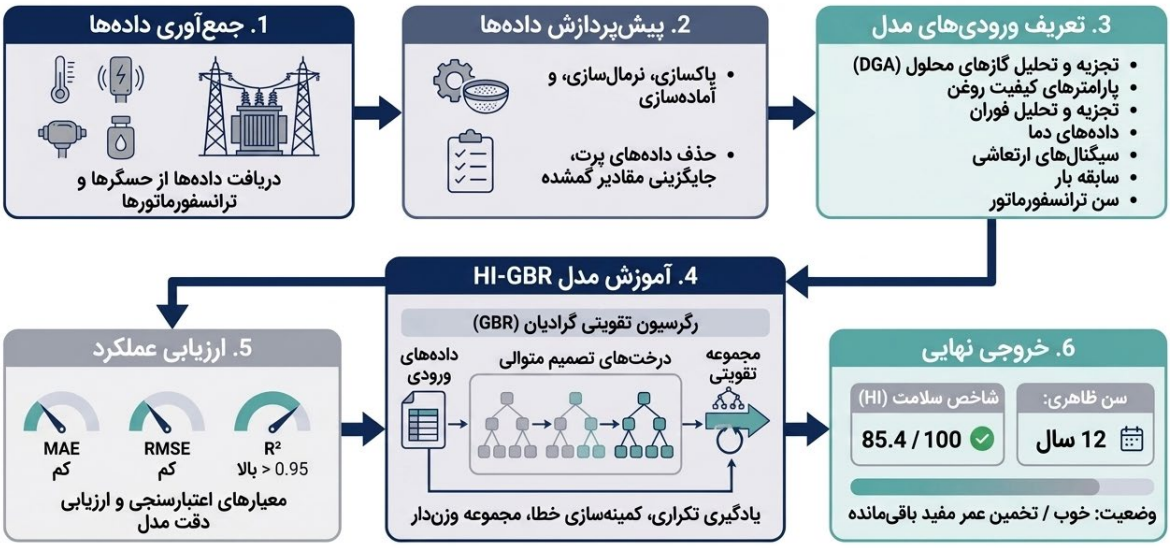
سن ظاهری، برخلاف سن تقویمی، میزان فرسودگی واقعی ترانسفورماتور را نشان می‌دهد و برای رتبه‌بندی تجهیزات و تصمیم‌گیری درباره بازرسی، تعمیر، نوسازی یا جایگزینی آن‌ها اهمیت دارد. در ادامه، مدل‌های سلسله‌مراتبی با هدف سازمان‌دهی عوامل مؤثر بر سلامت و ردیابی تأثیر عیوب موضعی بر وضعیت کلی تجهیز توسعه یافته‌اند. از سوی دیگر، روش‌های یادگیری ماشین با استفاده از داده‌های تاریخی و تشخیصی، توانایی مناسبی در بازتولید شاخص سلامت و پشتیبانی از برآورد سن ظاهری نشان داده‌اند.

در مجموع، روند پژوهش‌ها از روش‌های ساده امتیازدهی ثابت به سمت مدل‌های ترکیبی و هوشمند مبتنی بر منطق فازی، دانش خبرگان، مدل‌های احتمالاتی، ساختارهای سلسله‌مراتبی و یادگیری ماشین حرکت کرده است. هدف این مدل‌ها، ارائه ارزیابی دقیق‌تر و قابل‌تفسیرتر از وضعیت سلامت، امکان رتبه‌بندی تجهیزات و برآورد میزان فرسودگی و عمر واقعی ترانسفورماتورها است[۱۲].

۲. روش پیشنهادی

روش پیشنهادی Gradient Boosting Regression (GBR) یک چارچوب داده‌محور دو مرحله‌ای برای ارزیابی وضعیت ترانسفورماتورهای قدرت است. در این چارچوب، ابتدا مجموعه‌ای از داده‌های تشخیصی، آزمون‌های وضعیت و متغیرهای بهره‌برداری به‌عنوان ورودی مدل در نظر گرفته می‌شوند. سپس با استفاده از این الگوریتم، مقدار شاخص سلامت و سن ظاهری هر ترانسفورماتور برآورد می‌شود تا شدت فرسودگی تجهیز در قالب یک معیار قابل‌فهم‌تر و مناسب‌تر برای تصمیم‌گیری مدیریتی بیان گردد.

منطق اصلی این روش بر این فرض استوار است که وضعیت واقعی ترانسفورماتور تابعی پیچیده و غیرخطی از متغیرهای مختلف شیمیایی، الکتریکی، حرارتی و بهره‌برداری است. ازاین‌رو، استفاده از یک مدل یادگیری ماشین که توانایی استخراج این روابط را داشته باشد، می‌تواند نسبت به روش‌های مبتنی بر امتیازدهی ثابت عملکرد دقیق‌تری ارائه کند. به‌طور کلی، مراحل اجرای روش GBR در شکل ۱ نشان داده شده است.



[1] **شکل ۱. الگوریتم چارتی روش پیشنهادی**

۱،۲. ساختار الگوریتم رگرسیون گرادیان بوستینگ

الگوریتم رگرسیون گرادیان بوستینگ یکی از روش‌های قدرتمند یادگیری تجمعی در مسائل رگرسیونی است که به‌ویژه برای داده‌هایی با روابط پیچیده و غیرخطی کاربرد فراوانی دارد. در این الگوریتم، به‌جای استفاده از یک مدل منفرد، مجموعه‌ای از درخت‌های تصمیم رگرسیونی به‌صورت ترتیبی ساخته می‌شوند. هر درخت جدید به‌گونه‌ای آموزش داده می‌شود که خطاهای باقی‌مانده از درخت‌های قبلی را کاهش دهد.

فرض شود مجموعه داده آموزشی به‌صورت $\{(x_i, y_i)\}_{i=1}^{N}$ در اختیار باشد که در آن x_i بردار ویژگی‌های ورودی و y_i مقدار شاخص سلامت مرجع برای نمونه iام است. هدف الگوریتم، تقریب تابعی است که بتواند نگاشت بین ورودی‌ها و خروجی را با حداقل خطا مدل کند. مدل نهایی در روش گرادیان بوستینگ به‌صورت زیر تعریف می‌شود:

$$F_M(x) = \sum_{m=1}^{M} \gamma_m h_m(x) \qquad (۱)$$

که در آن:

$h_m(x)$ درخت تصمیم ساخته‌شده در مرحله mام است؛

γ_m وزن متناظر با درخت مرحله mام است؛

M تعداد کل درخت‌های مورد استفاده در مدل نهایی است.

در هر مرحله، الگوریتم سعی می‌کند با دنبال کردن گرادیان تابع زیان، مدلی جدید بیافزاید که خطای مدل قبلی را اصلاح کند. در مسائل رگرسیونی، تابع زیان معمولاً بر پایه خطای مربعی تعریف می‌شود. توانایی این الگوریتم در مدل‌سازی روابط غیرخطی، اندرکنش متغیرها و الگوهای پیچیده، آن را به گزینه‌ای مناسب برای برآورد شاخص سلامت ترانسفورماتور تبدیل کرده است.

۲،۲- آموزش مدل GBR

برای ارزیابی صحیح عملکرد مدل و جلوگیری از بیش‌برازش، داده‌ها به مجموعه‌های آموزش، اعتبارسنجی و آزمون تقسیم می‌شوند. مجموعه آموزش برای یادگیری مدل، مجموعه اعتبارسنجی برای تنظیم پارامترها و مجموعه آزمون برای ارزیابی نهایی عملکرد مدل مورد استفاده قرار می‌گیرد. در صورتی که حجم داده محدود باشد، می‌توان از روش اعتبارسنجی متقاطع نیز بهره گرفت.

عملکرد الگوریتم GBR به تنظیم مناسب پارامترهای آن وابسته است. مهم‌ترین پارامترهای مورد استفاده در این پژوهش شامل این موارد هستند: تعداد درخت‌ها[1] نرخ یادگیری[2] عمق بیشینه درخت‌ها[3] حداقل تعداد نمونه لازم برای تقسیم یک گره، حداقل تعداد نمونه در برگ‌ها و تابع هزینه. تنظیم این پارامترها با هدف دستیابی به توازنی مناسب میان دقت پیش‌بینی و توان تعمیم‌پذیری مدل انجام می‌شود. انتخاب نامناسب پارامترها می‌تواند منجر به بیش‌برازش یا کم‌برازش شود. پس از نهایی‌سازی پارامترها، مدل بر روی داده‌های آموزشی اجرا می‌شود. در هر مرحله، یک درخت جدید برای پیش‌بینی خطاهای باقی‌مانده ساخته شده و به مدل افزوده می‌شود. این روند تا زمان رسیدن به معیار توقف یا تکمیل تعداد از پیش تعیین‌شده درخت‌ها ادامه می‌یابد. خروجی نهایی مدل، مقدار پیش‌بینی‌شده شاخص سلامت برای هر ترانسفورماتور است.

روش GBR در مقایسه با روش‌های سنتی مبتنی بر امتیازدهی ثابت، دارای مزایای مهمی است. نخست آن‌که این روش قادر است روابط غیرخطی و پیچیده میان متغیرهای تشخیصی و وضعیت کلی تجهیز را به‌خوبی مدل‌سازی کند. دوم آن‌که وابستگی آن به وزن‌دهی ذهنی و قواعد از پیش تعریف‌شده کمتر است و در نتیجه با ساختار واقعی داده‌ها سازگاری بیشتری دارد. سوم آن‌که امکان تحلیل اهمیت نسبی ویژگی‌ها را فراهم می‌سازد و از این نظر در شناسایی عوامل مؤثر بر سلامت تجهیز مفید است.

با وجود این مزایا، این روش با محدودیت‌هایی نیز همراه است. مهم‌ترین محدودیت آن وابستگی به کیفیت داده‌های ورودی و شاخص سلامت مرجع است. چنانچه داده‌های آموزشی دارای سوگیری، خطا یا کمبود نمایندگی باشند، عملکرد مدل نیز تحت تأثیر قرار خواهد گرفت. افزون بر این، الگوریتم GBR به‌طور ذاتی یک پیش‌بینی نقطه‌ای ارائه می‌دهد و عدم‌قطعیت پیش‌بینی را مستقیماً مدل نمی‌کند. همچنین اگرچه این روش نسبت به برخی مدل‌های بسیار پیچیده شفاف‌تر است، اما همچنان از منظر تفسیرپذیری به سادگی مدل‌های کاملاً قاعده‌محور نیست.

۳. مجموعه‌های داده

برای ارزیابی عملکرد، روش پیشنهادی بر روی دو مجموعه داده واقعی اعمال گردید. داده‌های ورودی از میان شاخص‌هایی انتخاب می‌شوند که در ادبیات موضوع به‌عنوان مهم‌ترین نشانگرهای وضعیت عایقی، شیمیایی و بهره‌برداری ترانسفورماتور شناخته شده‌اند. انتخاب این متغیرها با هدف پوشش ابعاد اصلی فرسودگی تجهیز انجام شده است تا مدل بتواند تصویر واقع‌بینانه‌تری از سلامت کلی ترانسفورماتور ارائه دهد.

۱،۳- مجموعه داده اول

در این پژوهش، یکی از مجموعه‌داده‌های اصلی مورد استفاده، مجموعه‌داده Sample Power Transformers Health Condition Dataset است که از پایگاه Kaggle دریافت شده است [۱۳]. این مجموعه‌داده شامل نمونه‌هایی از نتایج آزمون‌ها و شاخص‌های ارزیابی وضعیت ترانسفورماتورهای قدرت بوده و برای مدل‌سازی رابطه میان پارامترهای تشخیصی و وضعیت سلامت تجهیز به‌کار گرفته شده است. ساختار این مجموعه‌داده به‌گونه‌ای است که برای هر نمونه، مجموعه‌ای از ویژگی‌های مرتبط با گازهای محلول در روغن، ویژگی‌های فیزیکی و الکتریکی روغن عایقی، و نیز شاخص‌های سلامت و عمر تجهیز ثبت شده است.

مجموعه‌داده مذکور شامل ۴۷۰ سطر (نمونه) و ۱۶ ستون است که از این میان، ۱۴ ستون نخست به‌عنوان ویژگی‌های ورودی و ۲ ستون پایانی به‌عنوان خروجی‌های مرتبط با ارزیابی وضعیت تجهیز در نظر گرفته می‌شوند. همچنین ۸۰ درصد داده‌ها (۳۷۶ نمونه) بعنوان داده‌های آموزش و اعتبارسنجی[4] و ۲۰ درصد باقیمانده (۹۴ نمونه) بعنوان داده آزمون[5] در نظر گرفته شده است. ستون‌های ورودی عبارت‌اند از پارامترهای مربوط به گازهای محلول در روغن ترانسفورماتور، شاخص‌های شیمیایی و آلودگی روغن و شاخص‌های

[1] n_estimators
[2] learning_rate
[3] max_depth
[4] Validation
[5] Test

الکتریکی و فیزیکی روغن عایقی. دو ستون خروجی نیز عبارتند از دو شاخص اندیس سلامت Health Index (HI) و عمر تخمینی Life Expectation (LE) ترانسفورماتور. HI بیانگر وضعیت کلی سلامت ترانسفورماتور است و می‌تواند به‌عنوان یک شاخص ترکیبی برای بیان سطح سلامت تجهیز استفاده شود. LE نیز بیانگر تخمین عمر مورد انتظار یا عمر باقیمانده تجهیز است و از منظر برنامه‌ریزی نگهداری، تعمیرات و تصمیم‌گیری بهره‌برداری اهمیت دارد.

۲,۳- مجموعه داده دوم

مجموعه داده دوم مورد استفاده در این پژوهش از پایگاه Mendeley Data دریافت شده است. این مجموعه‌داده در سال ۲۰۲۲ توسط Diego Zaldivar Sanchez منتشر شده و با عنوان A comprehensive methodology for the optimization of condition-based maintenance in power transformer fleets در دسترس قرار گرفته است. این منبع داده در چارچوب یک روش جامع برای بهینه‌سازی نگهداری مبتنی بر وضعیت در ناوگان ترانسفورماتورهای قدرت توسعه یافته است [۱۴].

فایل داده‌ها شامل اطلاعات مربوط به ۵۸ واحد ترانسفورماتور قدرت است و برای محاسبه و تحلیل شاخص سلامت به‌کار گرفته شده است. بررسی ساختار این فایل نشان می‌دهد که داده‌های ثبت‌شده برای هر ترانسفورماتور، مجموعه‌ای از شاخص‌های مرتبط با کیفیت روغن عایقی، وضعیت عایق کاغذی و ارزیابی سلامت تجهیز را در بر می‌گیرد. همانند مجموعه داده نخست، ۸۰ درصد داده‌ها (۴۷ نمونه) بعنوان داده‌های آموزش و اعتبارسنجی و ۲۰ درصد باقیمانده (۱۱ نمونه) بعنوان داده آزمون در نظر گرفته شده است. ساختار این مجموعه‌داده شامل ۱۳ ستون ورودی و یک ستون (متغیر) خروجی است. مجموعه‌داده دوم نسبت به مجموعه‌داده اول، تمرکز بیشتری بر ارزیابی شرایط عایق مایع و جامد دارد و به‌ویژه از منظر تحلیل پیرشدگی کاغذ عایقی و ارتباط آن با سلامت کلی ترانسفورماتور قابل توجه است.

۴. معیارهای ارزیابی عملکرد مدل

برای ارزیابی دقت و کارایی مدل‌های پیش‌بینی، از چندین شاخص آماری استفاده می‌شود که هر یک جنبه‌ای متفاوت از خطای پیش‌بینی را اندازه‌گیری می‌کنند. فرض شود مقدار واقعی برابر با y_i، مقدار پیش‌بینی‌شده برابر با $\hat{y}_i$، و تعداد نمونه‌ها برابر با nباشد.

- میانگین قدرمطلق خطا (MAE)

شاخص میانگین قدرمطلق خطا، متوسط قدرمطلق اختلاف بین مقادیر واقعی و مقادیر پیش‌بینی‌شده را نشان می‌دهد و یکی از ساده‌ترین و قابل‌فهم‌ترین معیارهای ارزیابی خطاست.

$$MAE = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N} | y_i - \hat{y}_i | \quad (۲)$$

این شاخص میانگین فاصله مطلق بین مقادیر واقعی و مقادیر پیش‌بینی‌شده را نشان می‌دهد. هرچه مقدار MAE کوچک‌تر باشد، دقت مدل بیشتر است.

- میانه اندازه خطای نسبی (MDMRE)

معیار MDMRE معمولاً به صورت Median Magnitude of Relative Error برای سنجش خطای نسبی به‌ویژه در مطالعات تخمین و پیش‌بینی کاربرد دارد. تعریف رایج آن بصورت میانه اندازه خطای نسبی است. ابتدا اندازه خطای نسبی برای هر نمونه محاسبه می‌شود:

$$MRE_i = | \frac{y_i - \hat{y}_i}{y_i} | \quad (۳)$$

سپس مقدار MDMRE به صورت زیر به دست می‌آید:

$$MDMRE = \text{median}(MRE_i) \quad (۴)$$

این معیار نسبت به داده‌های پرت حساسیت کمتری نسبت به میانگین دارد.

- ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE)

شاخص ریشه میانگین مربعات خطا، مجذور خطاها را میانگین گرفته و سپس ریشه دوم آن را محاسبه می‌کند. این معیار نسبت به خطاهای بزرگ حساس‌تر است و در سنجش پایداری و دقت کلی مدل اهمیت دارد. مقادیر کمتر RMSE نشان‌دهنده عملکرد بهتر مدل است.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}(y_i - \hat{y}_i)^2} \quad (۵)$$

- ضریب تعیین ($\boldsymbol{R^2}$)

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{N}(y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^{N}(y_i - \bar{y})^2} \quad (۶)$$

این شاخص بیان می‌کند که چه سهمی از تغییرات شاخص سلامت توسط مدل توضیح داده می‌شود. هرچه مقدار R^2به یک نزدیک‌تر باشد، عملکرد مدل مطلوب‌تر است. علاوه بر معیارهای فوق، برای تحلیل عمیق‌تر می‌توان از نمودار مقایسه مقادیر واقعی و پیش‌بینی‌شده، نمودار باقیمانده‌ها و تحلیل اهمیت ویژگی‌ها نیز استفاده کرد.

- میانگین درصد قدرمطلق خطا (MAPE)

شاخص میانگین درصد قدرمطلق خطا، خطای پیش‌بینی را به صورت درصدی نسبت به مقدار واقعی بیان می‌کند و برای مقایسه خطا در مقیاس‌های مختلف مفید است.

$$MAPE = \frac{100}{n}\sum_{i=1}^{n}\left|\frac{y_i - \hat{y}_i}{y_i}\right| \quad (۷)$$

هرچه MAPE کمتر باشد، مدل از دقت بیشتری برخوردار است. لازم به ذکر است که این معیار در حالتی که $y_i = 0$باشد، قابل استفاده نیست یا نیازمند اصلاح است.

- میانگین قدرمطلق خطای مقیاس‌شده (MASE)

شاخص میانگین قدرمطلق خطای مقیاس‌شده، MAE مدل را نسبت به خطای یک روش مبنا (Naive Forecast) مقیاس‌بندی می‌کند. این معیار برای مقایسه عملکرد مدل‌ها در مجموعه‌داده‌های مختلف بسیار مناسب است.

$$MASE = \frac{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}|y_i - \hat{y}_i|}{\frac{1}{n-m}\sum_{t=m+1}^{n}|y_t - y_{t-m}|} \quad (۸)$$

که در آن، mنشان‌دهنده فاصله زمانی یا دوره فصلی است. در داده‌های غیرفصلی معمولاً $m = 1$ در نظر گرفته می‌شود. هرچه مقدار $MASE < 1$ باشد، مدل عملکرد بهتری دارد.

- شاخص میانگین (MF)

شاخص MF یا Mean Factor میانگین نسبت مقادیر پیش‌بینی‌شده به مقادیر واقعی را محاسبه می‌کند. این معیار میزان تمایل کلی مدل به بیش‌برآوردی یا کم‌برآوردی را نشان می‌دهد. مقدار $MF = 1$بیانگر آن است که پیش‌بینی‌های مدل به طور متوسط با مقادیر واقعی منطبق هستند. اگر $MF > 1$باشد، مدل به طور کلی تمایل به بیش‌برآوردی دارد، در حالی که $MF < 1$ نشان‌دهنده تمایل مدل به کم‌برآوردی است.

$$MF = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\frac{\hat{y}_i}{y_i} \quad (۹)$$

۵. نتایج شبیه‌سازی

برای آن‌که نتایج ارائه‌شده از اعتبار علمی و تحلیلی کافی برخوردار باشند، عملکرد روش پیشنهادی تنها به‌صورت مستقل گزارش نمی‌شود، بلکه با چهار الگوریتم دیگر نیز مقایسه خواهد شد. این الگوریتم‌ها به‌گونه‌ای انتخاب شده‌اند که هم شامل روش‌های کلاسیک و شناخته‌شده یادگیری ماشین باشند و هم یک روش مبتنی بر یادگیری عمیق را در بر گیرند تا امکان تحلیل جامع‌تری از نقاط قوت و ضعف مدل پیشنهادی فراهم شود. الگوریتم‌های انتخاب‌شده برای مقایسه عبارت‌اند از:

- رگرسیون بردار پشتیبان (SVR)

الگوریتم رگرسیون بردار پشتیبان (SVR) به عنوان یکی از روش‌های شناخته‌شده و پرکاربرد در مسائل رگرسیونی، در این پژوهش به عنوان یکی از مدل‌های مبنا برای مقایسه با روش پیشنهادی مورد استفاده قرار گرفته است. این الگوریتم در واقع نسخه رگرسیونی ماشین بردار پشتیبان است و هدف آن یافتن تابعی است که بتواند با حفظ ساختار ساده و قابلیت تعمیم مناسب، رابطه بین متغیرهای ورودی و خروجی را با کمترین خطای ممکن مدل‌سازی کند. برخلاف بسیاری از روش‌های رگرسیونی که مستقیماً به دنبال کمینه‌سازی مجموع خطاها هستند، SVR بر این مبنا عمل می‌کند که خطاهای کوچک در یک بازه مشخص قابل اغماض باشند و تنها انحراف‌هایی که از این بازه فراتر می‌روند در تابع هزینه وارد شوند. این ویژگی سبب می‌شود که مدل در برابر نوسانات جزئی و نویزهای محدود از پایداری بیشتری برخوردار باشد.

- جنگل تصادفی

الگوریتم جنگل تصادفی نیز در این پژوهش به عنوان یکی از روش‌های مقایسه‌ای اصلی برای ارزیابی عملکرد مدل پیشنهادی مورد استفاده قرار گرفته است. این الگوریتم یکی از روش‌های یادگیری جمعی است که بر مبنای ترکیب تعداد زیادی درخت تصمیم عمل می‌کند و تلاش دارد با تجمیع خروجی چندین مدل ساده‌تر، دقت پیش‌بینی و پایداری نهایی مدل را افزایش دهد. ایده اصلی در جنگل تصادفی آن است که به جای اتکا به یک درخت تصمیم منفرد، مجموعه‌ای از درخت‌ها بر روی نمونه‌ها و زیرمجموعه‌های متفاوتی از ویژگی‌ها آموزش داده شوند و سپس خروجی نهایی از طریق تجمیع نتایج این درخت‌ها به دست آید. این سازوکار موجب می‌شود که مدل نسبت به نوسانات داده و بیش‌برازش حساسیت کمتری داشته باشد و در عین حال بتواند روابط غیرخطی میان متغیرهای ورودی و خروجی را نیز به خوبی یاد بگیرد.

- شبکه عصبی پرسپترون چندلایه (MLP)

الگوریتم پرسپترون چندلایه یا MLP یکی دیگر از روش‌های مقایسه‌ای مورد استفاده در این پژوهش است که در رده شبکه‌های عصبی مصنوعی پیش‌خور قرار می‌گیرد. این مدل به دلیل توانایی در تقریب توابع غیرخطی، در بسیاری از مسائل رگرسیونی و طبقه‌بندی کاربرد گسترده‌ای یافته است. ایده اصلی در MLP آن است که با استفاده از چند لایه پردازشی متوالی، رابطه‌ای میان متغیرهای ورودی و خروجی ایجاد شود که بتواند الگوهای پنهان موجود در داده‌ها را استخراج کند. برخلاف مدل‌های خطی که معمولاً به یک تابع نگاشت ساده محدود می‌شوند، MLP قادر است برهم‌کنش‌های پیچیده‌تر میان متغیرها را بیاموزد و از این رو در مسائل مهندسی با روابط غیرخطی، گزینه‌ای قابل توجه به شمار می‌رود.

- مدل LSTM

الگوریتم LSTM یا حافظه بلندمدت-کوتاه‌مدت نیز در این پژوهش به عنوان یکی از روش‌های مقایسه‌ای مورد استفاده قرار گرفته است. این الگوریتم نوعی شبکه عصبی بازگشتی است که با هدف رفع محدودیت شبکه‌های بازگشتی متداول در یادگیری وابستگی‌های بلندمدت طراحی شده است. در مسائل مهندسی، به‌ویژه در شرایطی که داده‌ها دارای الگوهای وابسته، روندهای تدریجی یا ارتباطات غیرخطی پیچیده باشند، LSTM می‌تواند ابزار مناسبی برای مدل‌سازی رفتار سیستم باشد. اگرچه این مدل بیشتر در داده‌های زمانی و ترتیبی شناخته می‌شود، در برخی مسائل پیش‌بینی نیز به عنوان یک روش مقایسه‌ای قدرتمند به کار می‌رود تا توانایی مدل پیشنهادی در برابر ساختارهای عمیق‌تر ارزیابی شود.

در جدول ۱، عملکرد چهار الگوریتم مطرح شده و روش پیشنهادی مبتنی بر GBR بر روی مجموعه‌داده‌های اول و دوم مورد ارزیابی و مقایسه قرار گرفته است. هدف از این مقایسه، بررسی توانایی هر الگوریتم در تخمین شاخص سلامت ترانسفورماتور و سن ظاهری یا عمر مورد انتظار تجهیز بر اساس مجموعه‌ای از داده‌های وضعیت، روغن و گازهای محلول است.

جدول ۱. نتایج شبیه سازی

شاخص	SVR		Random Forest		MLP		LSTM		الگوریتم پیشنهادی GBR	
	مجموعه ۱ HI LE	مجموعه ۲ HI	مجموعه ۱ HI LE	مجموعه ۲ HI	مجموعه ۱ HI LE	مجموعه ۲ HI	مجموعه ۱ HI LE	مجموعه ۲ HI	مجموعه ۱ HI LE	مجموعه ۲ HI
MAE	۱۵.۶۶ ۶.۴۵	۰,۰۷	۶,۰۲ ۴,۹۹	۰,۰۶۳	۹,۵۴ ۷,۱۳	۰,۱۲	۷,۷۷ ۶,۴۸	۰,۰۵۴	۵,۵۱ ۴,۹۸	۰,۰۳
MDMRE	۱.۰۶ ۰.۰۶۶	۰,۱۷	۰,۱۴ ۰,۰۷	۰,۱۵	۰,۲۹ ۰,۰۹	۰,۲۳	۰,۱۹ ۰,۱۰	۰,۰۹۶	۰,۱۵ ۰,۰۸	۰,۰۵
RMSE	۱۸.۰۱ ۱۰.۲۷	۰,۰۹	۹,۶۷ ۸,۶۰	۰,۰۷	۱۲,۷۰ ۱۰,۶۴	۰,۱۸	۱۱,۶۶ ۹,۶۱	۰,۰۷	۸,۹۷ ۸,۵۲	۰,۰۴
R2	-۰.۰۱۲۱ ۰.۶۶	۰,۸۳	۰,۷۱ ۰,۷۶	۰,۹۰	۰,۵۰ ۰,۶۴	۰,۳۵	۰,۵۸ ۰,۷۰	۰,۹۰	۰,۷۵ ۰,۷۷	۰,۹۷
MAPE (%)	۷۹.۸۰ ۴۴.۴۱	۲۳,۹۶	۲۴,۶۴ ۳۷,۵۳	۱۷,۴۱	۴۳,۷۶ ۵۲,۵۵	۳۱,۲۰	۳۳,۴۴ ۴۶,۱۳	۱۳,۵۶	۲۲,۴۴ ۳۳,۰۱	۸,۶۰
MASE	۸۱.۴۳ ۰.۸۱	۰,۳۷	۳۱,۳۱ ۰,۶۳	۰,۳۴	۴۹,۶۴ ۰,۹۰	۰,۶۳	۴۰,۴۳ ۰,۸۱	۰,۲۹	۲۸,۶۳ ۰,۶۲۵	۰,۱۶
MF	۱.۵۵ ۱.۲۷	۱,۱	۱,۰۹ ۱,۲۶	۱,۰۲	۱,۲۴ ۱,۴۱	۰,۹۹	۱,۱۲ ۱,۳۱	۱,۰۵	۱,۰۷ ۱,۲۰	۰,۹۵
Time (sec)	۳.۳۳ ۳.۴۱	۴,۰۱	۰,۶۱ ۰,۵۰	۱۰۲,۴۹	۳,۹۱ ۴,۲۰	۰,۱	۱۰,۸۲ ۱۰,۱۸	۱,۷	۸۵,۰۵ ۱۲۳,۹۱	۱۴۴.۴۶

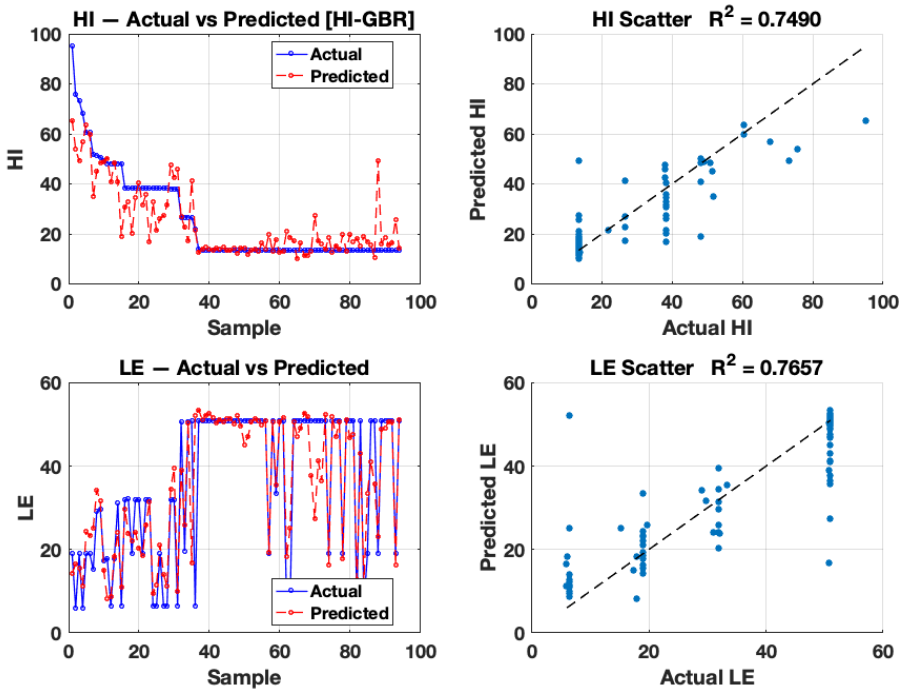
برآیند نتایج به‌دست‌آمده از مجموعه‌داده اول نشان می‌دهد که روش پیشنهادی GBR در هر دو مسئله تخمین شاخص سلامت و سن ظاهری، بهترین عملکرد را در میان پنج الگوریتم مورد بررسی ارائه کرده است. این روش در اکثر معیارهای کلیدی شامل MAE ، RMSE ، R^2 ، MAPE ، MASE و MF برتر از سایر مدل‌ها بوده و توانسته است تخمین دقیق‌تر، پایدارتر و قابل‌اعتمادتری از

وضعیت ترانسفورماتور به دست دهد. پس از روش پیشنهادی، جنگل تصادفی به‌عنوان نزدیک‌ترین رقیب ظاهر شده است و نتایج آن نشان می‌دهد که مدل‌های درختی برای داده‌های این حوزه از کارایی بالایی برخوردارند. در مقابل، LSTM با وجود قدرت تئوریک بالا، تنها عملکردی متوسط ارائه کرده و SVR و به‌ویژه MLP نتوانسته‌اند به سطح دقت دو روش برتر برسند.

در مجموع، بر اساس نتایج تخمین شاخص سلامت (HI) و سن ظاهری (LE) ترانسفورماتور، رتبه‌بندی کلی الگوریتم‌ها را می‌توان به‌صورت زیر در نظر گرفت:

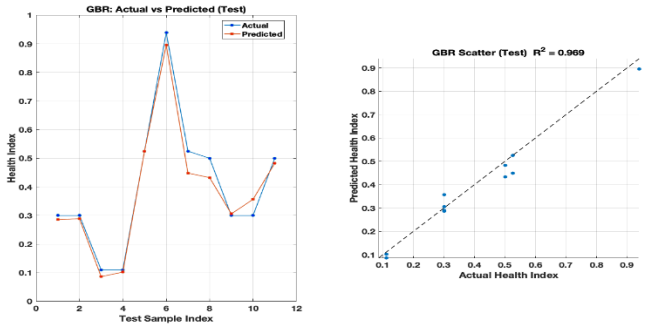
GBR > Random Forest > LSTM > SVR > MLP

نمودارهای بدست آمده از اعمال الگوریتم GBR بر روی داده‌های تست مجموعه داده نخست در شکل ۲ نشان داده شده است.



شکل ۲. نتایج حاصل از اعمال الگوریتم پیشنهادی بر روی داده‌های تست مجموعه اول [2]

در مجموعه‌داده دوم، برآیند نتایج نشان می‌دهد که روش پیشنهادی GBR باز هم بهترین عملکرد را در تخمین شاخص سلامت ترانسفورماتور ارائه کرده است. پس از روش پیشنهادی، LSTM بهترین عملکرد را داشته و سپس جنگل تصادفی، SVR و MLP در رتبه‌های بعدی قرار گرفته‌اند. نتایج نشان می‌دهد که مدل‌های توانمند در یادگیری روابط غیرخطی، به‌ویژه مدل‌های مبتنی بر تقویت گرادیانی، برای تخمین شاخص سلامت ترانسفورماتور مناسب‌تر هستند. همچنین ضعف MLP در داده‌های آزمون نشان می‌دهد که استفاده از شبکه‌های عصبی ساده در مجموعه‌داده‌های کوچک، بدون راهکارهای کنترلی کافی، می‌تواند منجر به بیش‌برازش و کاهش قابلیت تعمیم شود. نمودارهای بدست آمده از اعمال GBR بر روی داده‌های تست مجموعه داده دوم در شکل ۳ نشان داده شده است.



[3] شکل ۳. نتایج حاصل از اعمال الگوریتم پیشنهادی بر روی داده‌های تست مجموعه دوم

در مجموع، نتایج مجموعه‌داده دوم تأیید می‌کند که روش پیشنهادی GBR قادر است با بهره‌گیری از ساختار تقویت گرادیانی و بهینه‌سازی فراپارامترها، تخمین دقیق‌تر و پایدارتری از شاخص سلامت ترانسفورماتور ارائه دهد. این یافته، در کنار نتایج مجموعه‌داده اول، نشان‌دهنده قابلیت اعتماد و کارایی روش پیشنهادی برای کاربردهای پایش وضعیت، برنامه‌ریزی تعمیرات و مدیریت دارایی ترانسفورماتورهای قدرت است.

۶. نتیجه‌گیری

در این پژوهش، یک چارچوب مبتنی بر Gradient Boosting Regression برای تخمین شاخص سلامت و سن ظاهری ترانسفورماتورهای قدرت ارائه شد. هدف اصلی این تحقیق، توسعه مدلی بود که بتواند با بهره‌گیری از داده‌های وضعیت ترانسفورماتور، رابطه میان ویژگی‌های مؤثر بر سلامت تجهیز و خروجی‌های موردنظر را با دقت مناسب شناسایی کند. برای این منظور، دو مجموعه‌داده مستقل مورد استفاده قرار گرفت که یکی شامل شاخص‌های مبتنی بر آزمون‌های روغن و گازهای محلول در روغن بود و دیگری بر داده‌های مرتبط با محصولات فرعی تخریب عایق و شاخص سلامت متمرکز بود. استفاده از این دو مجموعه‌داده امکان ارزیابی مدل پیشنهادی را در دو سناریوی متفاوت فراهم ساخت و موجب شد عملکرد آن از جنبه‌های مختلف بررسی شود.

نتایج به‌دست‌آمده نشان داد که مدل پیشنهادی GBR در مقایسه با روش‌های مبنا شامل SVR، Random Forest، MLP و □□□□ عملکرد برتری داشته است. این برتری هم در معیارهای دقت نظیر MAE، RMSE، MAPE، R^2 و هم در شاخص‌های خطای نسبی و پایداری پیش‌بینی مشاهده شد. در هر دو مجموعه‌داده، مدل پیشنهادی توانست خطای پیش‌بینی را کاهش دهد و هم‌زمان مقدار ضریب تعیین را در سطح بالاتری حفظ کند. این موضوع نشان می‌دهد که الگوریتم پیشنهادی قادر است روابط غیرخطی و پیچیده میان ورودی‌ها و شاخص سلامت ترانسفورماتور را به‌خوبی مدل‌سازی کند.

منابع

[1] Aeggegn, D. B., Akumu, A. O., & Nnachi, A. F., “AI-driven predictive maintenance for enhanced reliability of power transformers: Systematic review”. Next Energy, 13, 100822, 2026.

[2] M. Badawi, S. A. Ibrahim, D. A. Mansour, A. A. El-Faraskoury, S. A. Ward, K. Mahmoud, M. Lehtonen, and M. M. F. Darwish, ‘‘Reliable estimation for health index of transformer oil based on novel combined predictive maintenance techniques,’’ IEEE Access, vol. 10, pp. 25954–25972, 2022.

[3] آرمان آذرخش، سید محمدتقی بطحایی، محاسبه تلفات ترانسفورماتور قدرت با استفاده از روش اجزای محدود، مجله کهربا، شماره ۲٤، تابستان ۹۸، ص ۳۸-۳۱.

[4] R. A. Prasojo, H. Gumilang, Suwarno, N. U. Maulidevi, and B. A. Soedjarno, ‘‘A fuzzy logic model for power transformer faults’ severity determination based on gas level, gas rate, and dissolved gas analysis interpretation,’’ Energies, vol. 13, no. 4, p. 1009, Feb. 2020.

[5] S. Padmanaban, M. Khalili, M. A. Nasab, M. Zand, A. G. Shamim, and B. Khan, ‘‘Determination of power transformers health index using parameters affecting the transformer’s life,’’ IETE J. Res., vol. 69, no. 11, pp. 8467–8488, Nov. 2023.

[6] Bazi, S., Nhaila, H., & El Khaili, M., “Data-driven machine learning for enhancing predictive maintenance of distribution transformers”, E-Prime – Nexus of Electrical, Electronic, and Intelligent Engineering, 17, 201164, 2026.

[7] D. Paul and A. K. Goswami, ‘‘Determination of health index of insulating oil of in-service transformer & reactors based on IFT predicted by multigene symbolic regression,’’ IEEE Trans. Ind. Appl., vol. 58, no. 5, pp. 5935–5943, Sep. 2022.

[8] Syamsiana, I. N., Febriani, N. A., Sumari, A. D. W., & Sutjipto, R., “Revolutionizing predictive maintenance: Remaining useful life forecasting based on cognitive artificial intelligence using knowledge growing system”, Ain Shams Engineering Journal, 17(1), 103880, 2026.

[9] Zhang, S., Cheng, W., Wang, W., Ahmad, H., Zhang, L., Liu, H., Nie, Z., & Chen, X., “Deep learning-based health monitoring and prognostics for nuclear power plants: a systematic review”, Applied Energy, 421, 128252, 2026.

[10] I. B. M. Taha, ‘‘Power transformers health index enhancement based on convolutional neural network after applying imbalanced-data oversampling,’’ Electronics, vol. 12, no. 11, p. 2405, May 2023.

[11] H. Zeinoddini-Meymand, S. Kamel, and B. Khan, ‘‘An efficient approach with application of linear and nonlinear models for evaluation of power transformer health index,’’ IEEE Access, vol. 9, pp. 150172–150186, 2021.

[12] A. M. Abdullah, R. Ali, S. B. Yaacob, K. Ananda-Rao, and N. A. Uloom, ‘‘Transformer health index by prediction artificial neural networks diagnostic techniques,’’ J. Phys., Conf. Ser., vol. 2312, no. 1, Aug. 2022, Art. no. 012002.

[13] https://www.kaggle.com/datasets/shashwatwork/failure-analysis-in-power-transformers-dataset

[14] https://data.mendeley.com/datasets/hcyg643sym/1

20.1001.1.23223723.1405.13.2.2.3 KNO-1302-5202

همگرایی اینترنت اشیا و شبکه هوشمند برق؛ گامی به سوی مدیریت پایدار انرژی

آیلین جهانشاهی [۱] aylin.jahanshahi@iau.ir

سیمین خضرایی شولای فر [۲] (نویسنده مسئول) si.khazraei@iau.ac.ir

[۱و۲] گروه مهندسی برق، واحد کرج، دانشگاه آزاد اسلامی، کرج، ایران

چکیده: با افزایش مصرف انرژی، گسترش منابع انرژی تجدیدپذیر و نیاز روزافزون به هوشمندسازی شبکه‌های برق، استفاده از فناوری‌های نوین در سیستم‌های قدرت اهمیت زیادی پیدا کرده است. شبکه هوشمند برق به‌عنوان نسل جدید شبکه‌های برق، با بهره‌گیری از فناوری اطلاعات و ارتباطات، امکان پایش، کنترل و مدیریت بهینه تولید، انتقال، توزیع و مصرف انرژی را فراهم می‌کند. در این میان، اینترنت اشیا با ایجاد ارتباط میان تجهیزات و دستگاه‌های مختلف، امکان جمع‌آوری، انتقال و پردازش داده‌ها را به‌صورت لحظه‌ای فراهم می‌سازد. در این مقاله کاربرد اینترنت اشیا در شبکه هوشمند برق، معماری و اجزای آن، تجهیزات و فناوری‌های مورد استفاده، کاربردهای مختلف، مزایا و چالش‌های پیاده‌سازی بررسی شده است. همچنین نقش فناوری‌هایی مانند هوش مصنوعی، شبکه‌های ارتباطی پیشرفته، رایانش لبه‌ای و دوقلوی دیجیتال در توسعه آینده شبکه‌های هوشمند مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج نشان می‌دهد که استفاده از اینترنت اشیا می‌تواند با بهبود پایش و مدیریت شبکه، کاهش تلفات و افزایش قابلیت اطمینان، نقش مهمی در توسعه شبکه‌های برق هوشمند ایفا کند.

کلمات کلیدی: *اینترنت اشیا ، انرژی های تجدیدپذیر، شبکه هوشمند برق، مدیریت انرژی، هوش مصنوعی*

۱. مقدمه

با افزایش جمعیت، رشد صنایع و افزایش وابستگی جوامع به انرژی الکتریکی، مدیریت بهینه و پایدار شبکه‌های برق به یکی از چالش‌های مهم صنعت انرژی تبدیل شده است. شبکه‌های برق سنتی که عمدتاً بر تولید متمرکز و انتقال یک‌طرفه انرژی متکی هستند، در برابر نیازهای جدید مانند افزایش مصرف، ورود منابع انرژی تجدیدپذیر، کاهش تلفات و افزایش قابلیت اطمینان، با محدودیت‌هایی مواجه شده‌اند. به همین دلیل، حرکت به سمت شبکه‌های هوشمند برق[۶] به عنوان یک راهکار اساسی برای توسعه سیستم‌های قدرت آینده مورد توجه قرار گرفته است[1-4]. شبکه هوشمند برق با ترکیب زیرساخت‌های سنتی قدرت و فناوری‌های نوین اطلاعات و ارتباطات، امکان پایش، کنترل و مدیریت بهتر جریان انرژی را فراهم می‌کند. در این ساختار، تبادل اطلاعات میان تولیدکنندگان، تجهیزات شبکه و مصرف‌کنندگان نقش مهمی در افزایش بهره‌وری و انعطاف‌پذیری سیستم دارد. برای تحقق این هدف، استفاده از فناوری‌هایی مانند اینترنت اشیا[۷](IoT)، هوش مصنوعی، رایانش ابری و شبکه‌های ارتباطی پیشرفته ضروری است [5]. اینترنت اشیا یکی از مهم‌ترین فناوری‌های مورد استفاده در شبکه‌های هوشمند برق است که با ایجاد ارتباط میان تجهیزات مختلف، امکان جمع‌آوری، انتقال و تحلیل داده‌ها را به صورت لحظه‌ای فراهم می‌کند [6]. تجهیزات مبتنی بر IoT مانند حسگرهای هوشمند، کنتورهای هوشمند

[6] Smart grids
[7] Internet of Things

و سامانه‌های پایش شبکه، اطلاعات ارزشمندی درباره وضعیت تولید، انتقال، توزیع و مصرف انرژی در اختیار بهره‌برداران قرار می‌دهند [7]. این اطلاعات می‌تواند برای مدیریت مصرف، تشخیص خطا، نگهداری پیش‌بینانه تجهیزات و بهینه‌سازی عملکرد شبکه مورد استفاده قرار گیرد [8]. با وجود مزایای فراوان، استفاده گسترده از اینترنت اشیا در شبکه هوشمند برق با چالش‌هایی مانند امنیت سایبری، حفاظت از داده‌ها، استانداردسازی ارتباطات و هزینه‌های پیاده‌سازی روبه‌رو است. بنابراین بررسی فرصت‌ها و محدودیت‌های این فناوری برای توسعه شبکه‌های برق آینده اهمیت زیادی دارد. هدف این مقاله، بررسی کاربردهای اینترنت اشیا در شبکه هوشمند برق، معرفی معماری و تجهیزات مورد استفاده، بررسی مزایا و چالش‌های پیاده‌سازی و همچنین بررسی مسیرهای توسعه آینده این فناوری است. نتایج این بررسی نشان می‌دهد که IoT می‌تواند نقش مهمی در افزایش بهره‌وری، پایداری و هوشمندسازی سیستم‌های قدرت ایفا کند.

۲. معماری و اجزای IOT در شبکه هوشمند برق

استفاده از اینترنت اشیا در شبکه هوشمند برق نیازمند یک معماری منظم برای جمع‌آوری، انتقال، پردازش و استفاده از داده‌ها است. معماری IoT در شبکه هوشمند معمولاً شامل چندین لایه اصلی است که هرکدام وظیفه مشخصی در فرآیند ارتباط و مدیریت اطلاعات دارند. این معماری باعث می‌شود تجهیزات مختلف شبکه برق بتوانند با یکدیگر ارتباط برقرار کرده و اطلاعات مورد نیاز برای کنترل و تصمیم‌گیری هوشمند را فراهم کنند.

۲-۱. لایه تجهیزات و جمع‌آوری داده[8]

این لایه شامل تجهیزات فیزیکی مانند حسگرها، تجهیزات اندازه‌گیری هوشمند، کنتورهای هوشمند و تجهیزات پایش شبکه است. وظیفه اصلی این بخش، جمع‌آوری اطلاعات از وضعیت شبکه برق است. برای مثال، حسگرها می‌توانند پارامترهایی مانند ولتاژ، جریان، توان مصرفی، دما و وضعیت تجهیزات را اندازه‌گیری کنند. در شبکه هوشمند برق، این تجهیزات امکان مشاهده لحظه‌ای شرایط شبکه را فراهم می‌کنند. داده‌های جمع‌آوری شده از این مرحله برای تشخیص مشکلات، مدیریت مصرف انرژی و بهینه‌سازی عملکرد شبکه مورد استفاده قرار می‌گیرند.

۲-۲. لایه ارتباط و انتقال داده[9]

پس از جمع‌آوری اطلاعات، داده‌ها باید به مراکز پردازش و کنترل منتقل شوند. این وظیفه بر عهده لایه ارتباطی است. فناوری‌هایی مانند شبکه‌های بی‌سیم، فیبر نوری، شبکه‌های سلولی، ZigBee ، Wi-Fi و ارتباطات مبتنی بر اینترنت در این بخش استفاده می‌شوند. انتخاب روش ارتباطی مناسب به عواملی مانند سرعت انتقال داده، میزان تأخیر، هزینه، امنیت و شرایط محیطی بستگی دارد. در شبکه هوشمند برق، ارتباط پایدار و امن اهمیت زیادی دارد، زیرا هرگونه اختلال در انتقال اطلاعات می‌تواند عملکرد شبکه را تحت تأثیر قرار دهد.

۲-۳. لایه پردازش و مدیریت داده[10]

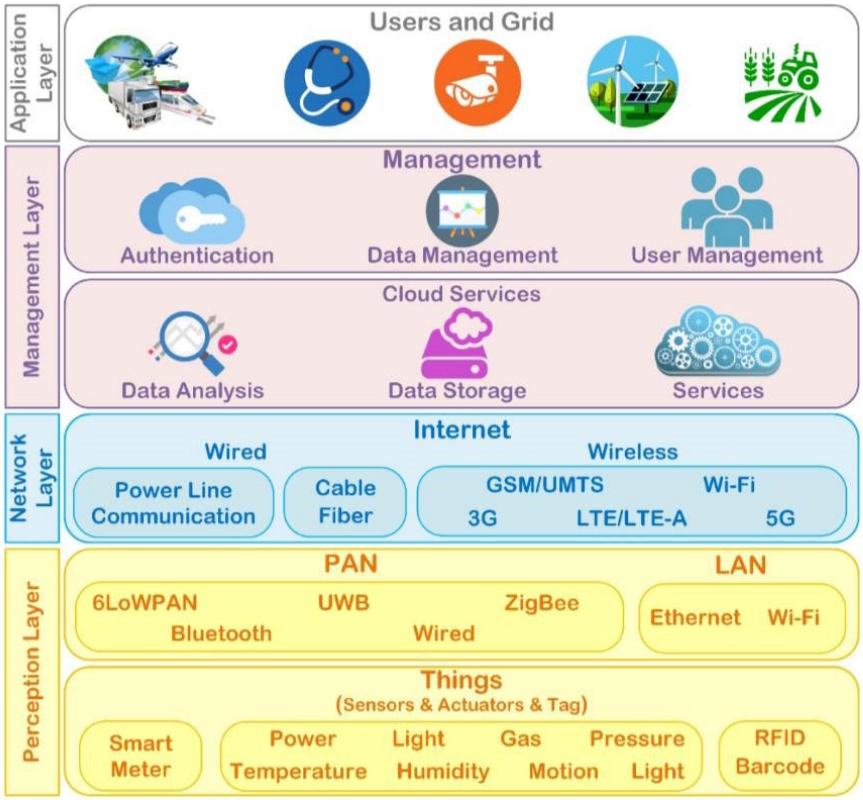
در این لایه، داده‌های دریافت شده از تجهیزات مختلف ذخیره، پردازش و تحلیل می‌شوند. با توجه به حجم زیاد اطلاعات تولیدشده توسط تجهیزاتIoT ، استفاده از فناوری‌هایی مانند رایانش ابری[11]،پردازش لبه‌ای[12]و الگوریتم‌های هوش مصنوعی اهمیت زیادی پیدا

[8] Perception Layer
[9] Communication Layer
[1]0 Data Processing Layer
[1]1 Cloud Computing
[1]2 Edge Computing

کرده است. تحلیل این داده‌ها می‌تواند به شناسایی الگوهای مصرف، پیش‌بینی خرابی تجهیزات، مدیریت بار شبکه و تصمیم‌گیری سریع‌تر کمک کند.

۴-۴. لایه کاربرد و کنترل[۱۳]

این لایه شامل سامانه‌هایی است که از اطلاعات پردازش‌شده برای ارائه خدمات هوشمند استفاده می‌کنند. برخی از کاربردهای این بخش شامل مدیریت انرژی، پایش وضعیت شبکه، کنترل تجهیزات از راه دور، تشخیص خطا و مدیریت منابع انرژی تجدیدپذیر است. در واقع، این لایه همان بخشی است که نتایج استفاده از IoT را در شبکه برق قابل مشاهده می‌کند و باعث بهبود عملکرد شرکت‌های برق و تجربه بهتر مصرف‌کنندگان می‌شود. معماری اینترنت اشیا در شبکه هوشمند برق از مجموعه‌ای از تجهیزات اندازه‌گیری، شبکه‌های ارتباطی، سامانه‌های پردازشی و برنامه‌های کاربردی تشکیل شده است. هماهنگی میان این اجزا باعث می‌شود شبکه برق بتواند به صورت هوشمند وضعیت خود را پایش کرده، مشکلات را سریع‌تر شناسایی کند و مصرف انرژی را بهینه نماید. به همین دلیل، IoT یکی از فناوری‌های کلیدی برای توسعه شبکه‌های برق آینده محسوب می‌شود. معماری لایه ای اینترنت اشیا در شکل ۱ نشان داده شده است.



شکل ۱. معماریی لایه ای اینترنت اشیا [1]

[1] Application Layer

۳. تجهیزات و فناوری‌های مورد استفاده در شبکه هوشمند برق

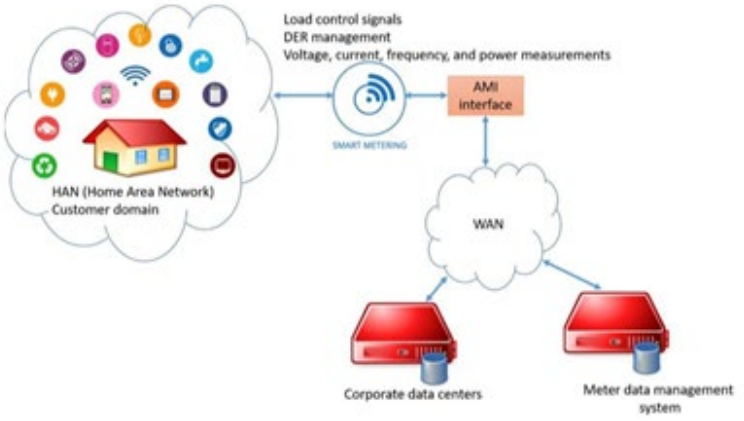
پیاده‌سازی شبکه هوشمند برق نیازمند استفاده از مجموعه‌ای از تجهیزات و فناوری‌های پیشرفته است که امکان جمع‌آوری اطلاعات، برقراری ارتباط، تحلیل داده‌ها و کنترل هوشمند شبکه را فراهم می‌کنند. در این میان، اینترنت اشیا نقش مهمی در اتصال تجهیزات مختلف و ایجاد هماهنگی میان بخش‌های مختلف سیستم قدرت دارد. تجهیزات مبتنی بر IoT باعث می‌شوند شبکه برق بتواند اطلاعات دقیق و لحظه‌ای از وضعیت خود دریافت کرده و عملکرد خود را بهینه کند.

۳-۱. حسگرها و تجهیزات اندازه‌گیری هوشمند

حسگرها یکی از مهمترین اجزای اینترنت اشیا در شبکه هوشمند برق هستند. این تجهیزات وظیفه اندازه‌گیری پارامترهای مختلف شبکه مانند ولتاژ، جریان، توان، فرکانس، دما و شرایط عملکرد تجهیزات را بر عهده دارند. اطلاعات جمع‌آوری‌شده توسط حسگرها به مراکز کنترل ارسال شده و برای پایش وضعیت شبکه و تصمیم‌گیری استفاده می‌شود. استفاده از حسگرهای هوشمند امکان پایش لحظه‌ای شبکه را فراهم می‌کند. برای مثال، حسگرهای نصب‌شده روی تجهیزات انتقال و توزیع می‌توانند تغییرات غیرعادی را شناسایی کرده و قبل از وقوع خرابی جدی، هشدار لازم را ارسال کنند. این قابلیت باعث کاهش زمان خاموشی‌ها و افزایش قابلیت اطمینان شبکه برق می‌شود.

۳-۲. کنتورهای هوشمند[۱۴]

کنتورهای هوشمند یکی از شناخته‌شده‌ترین کاربردهای اینترنت اشیا در شبکه برق هستند. برخلاف کنتورهای سنتی که تنها میزان مصرف انرژی را ثبت می‌کنند، کنتورهای هوشمند قابلیت اندازه‌گیری و ارسال اطلاعات مصرف برق به صورت دوطرفه را دارند. این تجهیزات می‌توانند اطلاعاتی مانند میزان مصرف، زمان مصرف و الگوی استفاده از انرژی را به شرکت‌های برق ارسال کنند. همچنین مصرف‌کنندگان نیز می‌توانند از طریق این اطلاعات، آگاهی بیشتری نسبت به مصرف خود پیدا کرده و مصرف انرژی را مدیریت کنند. نحوه عملکرد و ارتباط کنتور هوشمند با شبکه برق و سامانه های ارتباطی در شکل ۲ نشان داد شده است [1].



شکل ۲. معماری زیر ساخت اندازه گیری پیشرفته(AMI) [1]

[1] Smart meters[4]

۳-۳. شبکه‌های ارتباطی و انتقال داده

شبکه‌های ارتباطی، بخش مهمی از زیرساخت IoT در شبکه هوشمند برق هستند زیرا انتقال سریع و امن اطلاعات میان تجهیزات مختلف را امکان‌پذیر می‌کنند. فناوری‌هایی مانند فیبر نوری، شبکه‌های بی‌سیم، اینترنت، شبکه‌های سلولی و پروتکل‌های ارتباطی مخصوص تجهیزات هوشمند در این بخش مورد استفاده قرار می‌گیرند. یک شبکه ارتباطی مناسب باید ویژگی‌هایی مانند سرعت بالا، تأخیر کم، امنیت مناسب و قابلیت پشتیبانی از تعداد زیادی دستگاه متصل را داشته باشد. با توسعه فناوری‌هایی مانند 5G، امکان اتصال تعداد بیشتری از تجهیزات هوشمند و انتقال سریع‌تر داده‌ها در شبکه‌های برق آینده فراهم خواهد شد.

۳-۴. سامانه‌های مدیریت انرژی[۱۵]

سامانه‌های مدیریت انرژی وظیفه تحلیل اطلاعات دریافت‌شده از تجهیزات مختلف و استفاده از آنها برای بهینه‌سازی عملکرد شبکه را بر عهده دارند. این سامانه‌ها با کمک فناوری‌هایی مانند هوش مصنوعی و تحلیل داده‌ها می‌توانند الگوی مصرف انرژی را بررسی کرده، بار شبکه را مدیریت کنند و تصمیم‌های مناسب برای بهره‌برداری بهتر از منابع انرژی اتخاذ نمایند[2]. در شبکه‌های هوشمند، این سامانه‌ها به مدیریت منابع انرژی تجدیدپذیر، کاهش تلفات، پیش‌بینی مصرف و افزایش بهره‌وری کمک می‌کنند. ترکیب این سامانه‌ها با اینترنت اشیا باعث ایجاد یک محیط هوشمند می‌شود که در آن تجهیزات مختلف قادر به تبادل اطلاعات و همکاری برای عملکرد بهتر شبکه هستند[2]. تجهیزاتی مانند حسگرهای هوشمند، کنتورهای هوشمند، شبکه‌های ارتباطی و سامانه‌های مدیریت انرژی، پایه‌های اصلی استفاده از اینترنت اشیا در شبکه هوشمند برق هستند.

۴. کاربردهای اینترنت اشیا در شبکه هوشمند برق

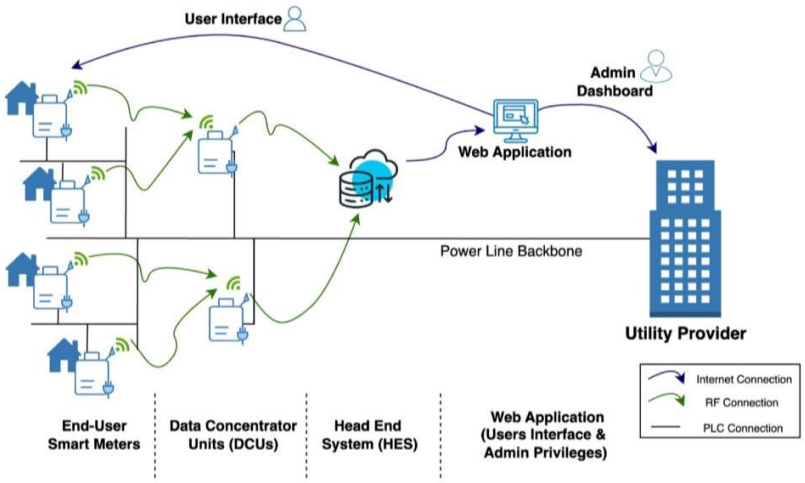
اینترنت اشیا یکی از فناوری‌های کلیدی در توسعه شبکه‌های هوشمند برق است و امکان تبدیل شبکه‌های سنتی به سیستم‌هایی پویا، خودکار و داده‌محور را فراهم می‌کند. با استفاده از تجهیزات متصل به شبکه، اطلاعات مربوط به تولید، انتقال، توزیع و مصرف انرژی به صورت لحظه‌ای جمع‌آوری شده و برای کنترل و بهینه‌سازی عملکرد شبکه مورد استفاده قرار می‌گیرد. کاربردهای IoT در شبکه هوشمند برق باعث افزایش قابلیت اطمینان، کاهش تلفات انرژی، بهبود مدیریت مصرف و افزایش بهره‌وری سیستم قدرت می‌شود[3].

۴-۱. پایش و اندازه‌گیری هوشمند

یکی از مهمترین کاربردهای اینترنت اشیا در شبکه هوشمند برق، پایش و اندازه‌گیری هوشمند وضعیت شبکه است. در شبکه‌های برق سنتی، اطلاعات محدودی از شرایط لحظه‌ای تجهیزات وجود دارد و بسیاری از فرآیندهای بررسی وضعیت شبکه به صورت دوره‌ای انجام می‌شوند. این روش باعث می‌شود برخی مشکلات قبل از شناسایی، به خرابی یا قطعی گسترده منجر شوند[3]. با استفاده از فناوری IoT، تعداد زیادی حسگر و تجهیزات اندازه‌گیری هوشمند در بخش‌های مختلف شبکه مانند نیروگاه‌ها، خطوط انتقال، پست‌های برق و شبکه توزیع نصب می‌شوند. این تجهیزات می‌توانند پارامترهایی مانند ولتاژ، جریان، توان، فرکانس، دما و وضعیت عملکرد تجهیزات را به صورت لحظه‌ای اندازه‌گیری و ارسال کنند. داده‌های جمع‌آوری‌شده توسط این تجهیزات، پس از انتقال به مراکز پردازش، برای تحلیل وضعیت شبکه و تصمیم‌گیری استفاده می‌شوند (شکل ۳).

به عنوان مثال، تغییرات غیرعادی در پارامترهای الکتریکی می‌تواند نشانه وجود مشکل در یک بخش از شبکه باشد و سیستم می‌تواند قبل از ایجاد خرابی جدی، هشدار لازم را صادر کند.

[1] Energy Management Systems



شکل ۳. معماری ارتباطی کنتور های هوشمند و سامانه پایش[3]

یکی از نمونه‌های مهم این کاربرد، استفاده از واحدهای اندازه‌گیری فازوری[۶](PMU) و تجهیزات اندازه‌گیری پیشرفته است. این تجهیزات با ثبت دقیق وضعیت شبکه و ارسال اطلاعات با سرعت بالا، به اپراتورها کمک می‌کنند تا رفتار شبکه را بهتر تحلیل کرده و پایداری سیستم قدرت را افزایش دهند. همچنین کنتورهای هوشمند به عنوان یکی از رایج‌ترین تجهیزات اندازه‌گیری مبتنی برIoT ، امکان ثبت و ارسال اطلاعات مصرف انرژی مشترکان را فراهم می‌کنند. این اطلاعات علاوه بر صدور صورتحساب دقیق‌تر، به شرکت‌های برق در شناخت الگوی مصرف، مدیریت بار و اجرای برنامه‌های کاهش مصرف در ساعات اوج کمک می‌کند .به طور کلی، پایش و اندازه‌گیری هوشمند با کمک اینترنت اشیا باعث افزایش دیدپذیری شبکه برق، کاهش زمان تشخیص مشکلات و فراهم شدن امکان مدیریت دقیق‌تر سیستم قدرت می‌شود. این قابلیت یکی از پایه‌های اصلی ایجاد یک شبکه برق هوشمند و قابل اعتماد در آینده است.

۲-۴. مدیریت مصرف انرژی

یکی از مهمترین اهداف شبکه هوشمند برق، مدیریت بهینه مصرف انرژی و ایجاد تعادل میان تولید و مصرف برق است. افزایش مصرف انرژی، تغییر الگوهای مصرف و محدودیت منابع تولید باعث شده است که روش‌های سنتی مدیریت شبکه پاسخگوی نیازهای آینده نباشند. اینترنت اشیا با فراهم کردن امکان جمع‌آوری اطلاعات دقیق از رفتار مصرف‌کنندگان و تجهیزات، نقش مهمی در مدیریت هوشمند انرژی ایفا می‌کند. در شبکه‌های هوشمند، کنتورهای هوشمند و تجهیزات متصل به اینترنت اشیا می‌توانند اطلاعات مصرف انرژی را در بازه‌های زمانی مختلف ثبت و به مراکز مدیریت انرژی ارسال کنند. این اطلاعات به شرکت‌های برق اجازه می‌دهد الگوهای مصرف را تحلیل کرده و برنامه‌های مناسبی برای کاهش مصرف در زمان‌های اوج بار طراحی کنند. یکی از روش‌های مهم در این زمینه، پاسخگویی تقاضا[۷]است. در این روش، مصرف‌کنندگان با دریافت اطلاعات مربوط به وضعیت شبکه و قیمت انرژی، می‌توانند زمان مصرف برخی تجهیزات خود را تغییر دهند. برای مثال، در ساعات اوج مصرف، سیستم‌های هوشمند می‌توانند پیشنهاد کاهش مصرف یا انتقال مصرف به ساعات کم‌بار را ارائه دهند. این فرآیند باعث کاهش فشار بر شبکه و افزایش پایداری سیستم برق می‌شود[1].

اینترنت اشیا همچنین امکان کنترل هوشمند تجهیزات خانگی و صنعتی را فراهم می‌کند. در ساختمان‌های هوشمند، تجهیزات مصرف‌کننده مانند سیستم‌های سرمایش و گرمایش، روشنایی و وسایل الکتریکی می‌توانند بر اساس شرایط شبکه و نیاز واقعی کاربران تنظیم شوند. این فرآیند باعث کاهش فشار بر شبکه و افزایش پایداری سیستم برق می‌شود.اینترنت اشیا همچنین امکان کنترل هوشمند تجهیزات خانگی و صنعتی را فراهم می‌کند. در ساختمان‌های هوشمند، تجهیزات مصرف‌کننده مانند سیستم‌های سرمایش و گرمایش،

[1] Phasor Measurement Unit
[1] Demand Response

روشنایی و وسایل الکتریکی می‌توانند بر اساس شرایط شبکه و نیاز واقعی کاربران تنظیم شوند. این موضوع علاوه بر کاهش مصرف انرژی، موجب افزایش راحتی و کاهش هزینه‌های مصرف‌کنندگان خواهد شد. از طرف دیگر، تحلیل داده‌های بزرگ[۱۸]تولیدشده توسط تجهیزات IoT می‌تواند برای پیش‌بینی میزان مصرف آینده استفاده شود. ترکیب این داده‌ها با الگوریتم‌های هوش مصنوعی، امکان پیش‌بینی بار شبکه و برنامه‌ریزی دقیق‌تر تولید و توزیع انرژی را فراهم می‌کند[3]. در مجموع، اینترنت اشیا با ایجاد ارتباط میان مصرف‌کنندگان، تجهیزات اندازه‌گیری و سامانه‌های مدیریت انرژی، زمینه را برای مصرف بهینه‌تر برق، کاهش تلفات و بهره‌برداری اقتصادی‌تر از شبکه هوشمند فراهم می‌کند.

۳-۴. مدیریت انرژی های تجدیدپذیر

گسترش استفاده از منابع انرژی تجدیدپذیر مانند انرژی خورشیدی و بادی یکی از اهداف اصلی توسعه شبکه‌های هوشمند برق است[4]. با این حال، تولید انرژی از این منابع به دلیل وابستگی به شرایط محیطی مانند میزان تابش خورشید و سرعت باد، دارای تغییرات و نوسانات زیادی است. به همین دلیل، مدیریت و هماهنگسازی این منابع با شبکه برق نیازمند استفاده از فناوریهای پیشرفته مانند اینترنت اشیا است. اینترنت اشیا با ایجاد ارتباط میان تجهیزات تولید انرژی، سیستمهای ذخیرهسازی، شبکه انتقال و مراکز کنترل، امکان پایش لحظهای عملکرد منابع تجدیدپذیر را فراهم میکند[4]. برای مثال، حسگرهای هوشمند نصبشده در نیروگاههای خورشیدی و بادی میتوانند اطلاعاتی مانند میزان تولید، شرایط تجهیزات و وضعیت محیطی را جمعآوری کرده و برای تحلیل و کنترل به سامانه های مدیریت انرژی ارسال کنند.

یکی از چالشهای اصلی انرژیهای تجدیدپذیر، عدم تطابق همیشگی میان زمان تولید و زمان مصرف انرژی است. فناوریهای مبتنی بر IoT میتوانند با مدیریت هوشمند تولید، مصرف و ذخیرهسازی انرژی، این مشکل را کاهش دهند. به عنوان مثال، در شبکههایی که دارای باتری‌های ذخیره‌سازی انرژی هستند، سیستم هوشمند می‌تواند بر اساس وضعیت شبکه تصمیم بگیرد که چه زمانی انرژی ذخیره یا به شبکه تزریق شود. همچنین اینترنت اشیا امکان مدیریت منابع انرژی پراکنده[۱۹]را فراهم می‌کند. در شبکه‌های مدرن، تعداد زیادی از مصرف‌کنندگان ممکن است خود تولیدکننده انرژی نیز باشند؛ برای مثال ساختمان‌هایی که دارای پنل خورشیدی هستند.IoT با ایجاد ارتباط میان این منابع کوچک و مرکز مدیریت شبکه، امکان هماهنگی بهتر و استفاده مؤثرتر از انرژی تولیدشده را فراهم می‌سازد. ترکیب اینترنت اشیا با فناوری‌هایی مانند هوش مصنوعی و تحلیل داده‌ها نیز می‌تواند به پیش‌بینی میزان تولید انرژی تجدیدپذیر کمک کند. این پیش‌بینی‌ها به بهره‌برداران شبکه اجازه می‌دهد برنامه‌ریزی دقیق‌تری برای تولید، توزیع و ذخیره انرژی داشته باشند و پایداری شبکه افزایش یابد. در نتیجه، اینترنت اشیا نقش مهمی در افزایش قابلیت اطمینان و بهره‌وری منابع انرژی تجدیدپذیر دارد و یکی از فناوری‌های ضروری برای حرکت به سمت شبکه‌های برق پایدار و هوشمند در آینده محسوب می‌شود.

۴-۴. تشخیص خطا و نگهداری پیش‌بینانه

یکی از کاربردهای مهم اینترنت اشیا در شبکه هوشمند برق، تشخیص سریع خطاها و انجام نگهداری پیش‌بینانه تجهیزات است. در شبکه‌های برق سنتی، بسیاری از فعالیت‌های تعمیر و نگهداری براساس زمان‌بندی مشخص انجام می‌شوند؛ یعنی تجهیزات در دوره‌های مشخص بررسی می‌شوند، حتی اگر نشانه‌ای از خرابی وجود نداشته باشد. این روش علاوه بر هزینه‌بر بودن، ممکن است باعث شود برخی خرابی‌ها قبل از زمان بررسی دوره‌ای رخ دهند و موجب قطعی یا کاهش کیفیت برق شوند. فناوری اینترنت اشیا با استفاده از حسگرهای هوشمند و تجهیزات پایش آنلاین، امکان مشاهده مداوم وضعیت تجهیزات شبکه را فراهم می‌کند. این حسگرها می‌توانند اطلاعاتی مانند

[1] Big Data [8]
[1] Distributed Energy Resources [9]

دما، ارتعاش، جریان، ولتاژ و شرایط عملکرد تجهیزات مختلف مانند ترانسفورماتورها، خطوط انتقال و تجهیزات پست‌های برق را اندازه‌گیری کنند. داده‌های جمع‌آوری‌شده پس از تحلیل، می‌توانند نشانه‌های اولیه خرابی را شناسایی کنند. این روش باعث کاهش هزینه‌های تعمیرات، افزایش طول عمر تجهیزات و کاهش زمان خاموشی شبکه می‌شود. به عنوان مثال، در یک ترانسفورماتور قدرت، افزایش غیرعادی دما یا تغییر در شرایط کاری می‌تواند نشانه وجود مشکل باشد. سیستم‌های مبتنی بر IoT با دریافت این اطلاعات و تحلیل آن‌ها می‌توانند قبل از وقوع خرابی جدی، هشدار لازم را به مرکز کنترل ارسال کنند[8]. همچنین اینترنت اشیا در تشخیص و مکان‌یابی خطا در شبکه توزیع کاربرد زیادی دارد. تجهیزات هوشمند می‌توانند محل تقریبی وقوع خطا را مشخص کرده و اطلاعات لازم را برای انجام اقدامات اصلاحی در اختیار اپراتورها قرار دهند. این قابلیت باعث کاهش زمان رفع خاموشی و افزایش رضایت مصرف‌کنندگان می‌شود[3].

ترکیب IoT با فناوری‌هایی مانند هوش مصنوعی و یادگیری ماشین، توانایی سیستم‌های تشخیص خطا را افزایش داده است. الگوریتم‌های هوشمند می‌توانند حجم زیادی از داده‌های شبکه را تحلیل کرده و الگوهایی را شناسایی کنند که تشخیص آن‌ها با روش‌های سنتی دشوار است[5]. در مجموع، استفاده از اینترنت اشیا برای تشخیص خطا و نگهداری پیش‌بینانه، یکی از عوامل مهم افزایش قابلیت اطمینان شبکه هوشمند برق است. این فناوری با کاهش خرابی‌های ناگهانی، کاهش هزینه‌های بهره‌برداری و افزایش سرعت واکنش به مشکلات، نقش مهمی در ایجاد شبکه‌های برق پایدارتر دارد.

۵. مزایا و دستاوردهای استفاده از IoT در شبکه هوشمند برق

استفاده از اینترنت اشیا در شبکه هوشمند برق، تغییرات مهمی در نحوه تولید، انتقال، توزیع و مصرف انرژی ایجاد کرده است. اتصال تجهیزات مختلف شبکه به یکدیگر و امکان جمع‌آوری و تحلیل داده‌ها به صورت لحظه‌ای، باعث شده است شبکه برق عملکرد هوشمندتر و انعطاف‌پذیرتری داشته باشد. مهم‌ترین مزایای استفاده از IoT در شبکه هوشمند برق عبارت‌اند از:

- **افزایش قابلیت اطمینان و پایداری شبکه: یکی از مهمترین دستاوردهایIoT ، افزایش قابلیت اطمینان شبکه برق است. با استفاده از حسگرها و تجهیزات پایش هوشمند، وضعیت تجهیزات شبکه به صورت مداوم بررسی میشود و مشکلات احتمالی میتوانند قبل از ایجاد خرابی گسترده شناسایی شوند. این قابلیت باعث کاهش زمان خاموشی، افزایش سرعت واکنش به خطاها و بهبود عملکرد سیستم قدرت میشود. همچنین اپراتورها می توانند با داشتن اطلاعات دقیق تر، تصمیم های سریع تر و مناسب تری برای کنترل شبکه اتخاذ کنند.**
- **کاهش تلفات انرژی و افزایش بهره وری: یکی از مشکلات شبکه های برق سنتی، وجود تلفات در بخش های مختلف انتقال و توزیع انرژی است. فناوری IoT با فراهم کردن اطلاعات دقیق درباره وضعیت مصرف، تولید و انتقال انرژی، امکان شناسایی نقاط دارای اتلاف و بهینه سازی عملکرد شبکه را فراهم میکند. برای مثال، تحلیل داده های حاصل از کنتورهای هوشمند میتواند الگوهای غیرضروری مصرف را مشخص کرده و به اجرای برنامه های مدیریت انرژی کمک کند. این موضوع باعث کاهش مصرف اضافی و استفاده بهینه تر از منابع انرژی میشود.**
- **بهبود مدیریت انرژی و کاهش هزینه‌ها: اینترنت اشیا با ایجاد ارتباط میان تجهیزات تولید، شبکه توزیع و مصرف کنندگان، امکان مدیریت دقیقتر انرژی را فراهم میکند. شرکتهای برق میتوانند با استفاده از اطلاعات لحظهای، تولید و توزیع انرژی را بهتر برنامهریزی کنند و هزینههای بهرهبرداری را کاهش دهند. همچنین مصرفکنندگان با دسترسی به اطلاعات دقیقتر درباره میزان مصرف خود، میتوانند رفتار مصرفی خود را اصلاح کرده و هزینههای انرژی را کاهش دهند.**

- **پشتیبانی از انرژی های تجدیدپذیر: یکی از چالشهای اصلی انرژی های تجدیدپذیر، نوسان در میزان تولید آنها است. اینترنت اشیا با فراهم کردن امکان پایش و کنترل لحظ های منابع انرژی مانند نیروگاه های خورشیدی و بادی، به مدیریت بهتر این منابع کمک میکند. این فناوری باعث میشود منابع انرژی پراکنده بهتر با شبکه هماهنگ شوند و امکان استفاده گسترده تر از انرژی های پاک فراهم شود.**
- **افزایش مشارکت مصرف کنندگان: در شبکه های هوشمند، مصرف کننده تنها دریافت کننده انرژی نیست، بلکه می تواند در مدیریت شبکه نقش فعال داشته باشد.کنتورهای هوشمند و سامانه های مدیریت انرژی به کاربران امکان میدهند مصرف خود را مشاهده و کنترل کنند. این مشارکت میتواند باعث کاهش مصرف در ساعات اوج، افزایش بهره وری و ایجاد تعامل بهتر میان شرکت های برق و مشترکان شود.**

به طور کلی، اینترنت اشیا با ایجاد ارتباط هوشمند میان تجهیزات مختلف شبکه برق، موجب افزایش قابلیت اطمینان، کاهش هزینه ها، بهینه سازی مصرف انرژی و فراهم شدن زمینه توسعه انرژی های تجدیدپذیر میشود. به همین دلیل، IoT یکی از فناوری های اساسی در مسیر تبدیل شبکه های برق سنتی به شبکه های هوشمند آینده محسوب میشود.

۶. چالش‌ها و محدودیت‌های استفاده از IoT در شبکه هوشمند برق

با وجود مزایای فراوان اینترنت اشیا در توسعه شبکه های هوشمند برق، پیاده سازی گسترده این فناوری با چالش ها و محدودیت هایی نیز همراه است. شبکه برق یکی از زیرساخت های حیاتی هر کشور محسوب میشود و اتصال تعداد زیادی تجهیزات هوشمند به آن، علاوه بر افزایش قابلیت ها، مسائل جدیدی مانند امنیت، مدیریت داده ها و هماهنگی بین فناوری های مختلف را ایجاد میکند.

۶-۱. امنیت و حریم خصوصی

یکی از مهمترین چالش های استفاده از اینترنت اشیا در شبکه هوشمند برق، مسئله امنیت سایبری است. افزایش تعداد تجهیزات متصل به شبکه، مسیرهای بیشتری برای حملات سایبری ایجاد میکند. تجهیزاتی مانند کنتورهای هوشمند، حسگرها و سامانه های کنترل از راه دور، در صورت ضعف امنیتی میتوانند هدف حملات قرار گیرند. حملات سایبری ممکن است باعث دستکاری اطلاعات مصرف، اختلال در عملکرد تجهیزات، افشای اطلاعات کاربران یا حتی ایجاد اختلال در عملکرد شبکه برق شوند. بنابراین استفاده از روش های رمزنگاری، احراز هویت تجهیزات، کنترل دسترسی و بهروزرسانی مداوم نرمافزارها برای افزایش امنیت ضروری است[6]. علاوه بر امنیت، حریم خصوصی مصرف کنندگان نیز اهمیت زیادی دارد. کنتورهای هوشمند اطلاعات دقیقی درباره الگوی مصرف کاربران جمع آوری میکنند و در صورت مدیریت نادرست این دادهها، ممکن است اطلاعات شخصی افراد در معرض سوءاستفاده قرار گیرد. بنابراین قوانین و سیاست های مناسب برای حفاظت از دادههای کاربران باید در طراحی شبکه های هوشمند در نظر گرفته شود[6].

۶-۲. مدیریت حجم بالای داده ها

تجهیزات IoT در شبکه هوشمند برق حجم بسیار زیادی از داده ها را در زمان کوتاه تولید می کنند. مدیریت، ذخیره سازی و تحلیل این حجم از اطلاعات یکی از چالش های مهم این فناوری است. برای استفاده مؤثر از این داده ها، نیاز به فناوری هایی مانند رایانش ابری، پردازش لبه ای و الگوریتم های تحلیل داده وجود دارد. این فناوری ها کمک میکنند اطلاعات مهم سریع تر پردازش شده و تصمیم های مناسب در زمان کوتاه اتخاذ شوند[6].

۶-۳. استانداردها و ارتباطات

یکی دیگر از محدودیت های مهم در شبکه های هوشمند مبتنی برIoT ، وجود تجهیزات و فناوری های مختلف با استانداردهای متفاوت است. برای اینکه تجهیزات تولیدکنندگان مختلف بتوانند با یکدیگر ارتباط برقرار کنند، وجود استانداردهای مشترک ضروری است. نبود هماهنگی کافی میان پروتکل های ارتباطی می تواند باعث افزایش هزینه، کاهش سازگاری تجهیزات و دشواری در توسعه شبکه شود. همچنین شبکه ارتباطی باید دارای ویژگی هایی مانند تأخیر کم، قابلیت اطمینان بالا و امنیت مناسب باشد تا بتواند نیازهای شبکه برق را برآورده کند[6].

۶-۴. هزینه پیاده سازی و نگهداری

پیاده سازی شبکه هوشمند مبتنی بر IoT نیازمند سرمایه گذاری قابل توجه در زمینه تجهیزات، زیرساخت های ارتباطی، سامانه های پردازشی و آموزش نیروی انسانی است. در برخی کشورها یا مناطق، هزینه اولیه بالا می تواند مانعی برای توسعه سریع این فناوری باشد. با این حال، در بلند مدت کاهش هزینه های بهره برداری، کاهش خاموشی ها و افزایش بهره وری انرژی می تواند هزینه های اولیه را جبران کند. اگرچه اینترنت اشیا نقش مهمی در هوشمندسازی شبکه برق دارد، اما موفقیت کامل آن نیازمند حل چالش هایی مانند امنیت سایبری، مدیریت داده، استانداردسازی ارتباطات و کاهش هزینه های پیاده سازی است. توجه به این مسائل باعث می شود شبکه های هوشمند آینده علاوه بر هوشمندی، از پایداری و امنیت کافی نیز برخوردار باشند[6].

۷. فناوری‌های آینده و مسیرهای توسعه اینترنت اشیا در شبکه هوشمند برق

با افزایش نیاز به انرژی، توسعه منابع تجدیدپذیر و پیچیده تر شدن شبکه های قدرت، نسل آینده شبکه های هوشمند برق به فناوری های پیشرفته تری نیاز خواهد داشت. اینترنت اشیا به عنوان یکی از پایه های اصلی Smart Grid، در سال های آینده با ترکیب شدن با فناوری هایی مانند هوش مصنوعی، شبکه های ارتباطی نسل جدید، رایانش لب های و دوقلوی دیجیتال، نقش گسترده تری در مدیریت سیستم های انرژی ایفا خواهد کرد.

۷-۱. نقش هوش مصنوعی و یادگیری ماشین

یکی از مهمترین مسیرهای توسعه شبکه های هوشمند، ترکیب اینترنت اشیا با هوش مصنوعی[2] و یادگیری ماشین[3] است. تجهیزات IoT حجم زیادی از داده های مربوط به تولید، انتقال و مصرف انرژی را تولید می کنند. تحلیل این داده ها با روش های سنتی دشوار است، اما الگوریتم های هوش مصنوعی می توانند الگوهای پنهان را شناسایی کرده و تصمیم های هوشمندانه تری ارائه دهند. از کاربردهای هوش مصنوعی در شبکه هوشمند میتوان به پیش بینی بار مصرفی، تشخیص خطا، پیش بینی خرابی تجهیزات، بهینه سازی تولید انرژی و مدیریت منابع تجدیدپذیر اشاره کرد. ترکیب AI و IoT باعث میشود شبکه برق از یک سیستم صرفاً پایش کننده به یک سیستم تصمیم گیرنده و خودکار تبدیل شود[5].

۷-۲. استفاده از شبکه های ارتباطی نسل جدید مانند 5G

شبکه های ارتباطی یکی از بخشهای حیاتی در عملکرد اینترنت اشیا هستند. با افزایش تعداد تجهیزات متصل به شبکه برق، فناوری های ارتباطی قدیمی ممکن است پاسخگوی نیازهای آینده نباشند. فناوری 5G با ویژگی هایی مانند سرعت بالا، تأخیر کم و قابلیت اتصال تعداد زیادی دستگاه، می تواند نقش مهمی در توسعه شبکه های هوشمند ایفا کند. استفاده از 5G امکان ارتباط سریع تر میان

[2] Artificial Intelligence
[3] Machine Learning

تجهیزات مختلف شبکه، کنترل لحظه ای تجهیزات و اجرای برنامه های پیشرفته مانند مدیریت خودکار شبکه را فراهم میکند. این موضوع به خصوص در سیستم هایی که نیاز به واکنش سریع دارند، مانند تشخیص خطا و کنترل تجهیزات حیاتی، اهمیت زیادی دارد[5].

۳-۷. رایانش لبه ای

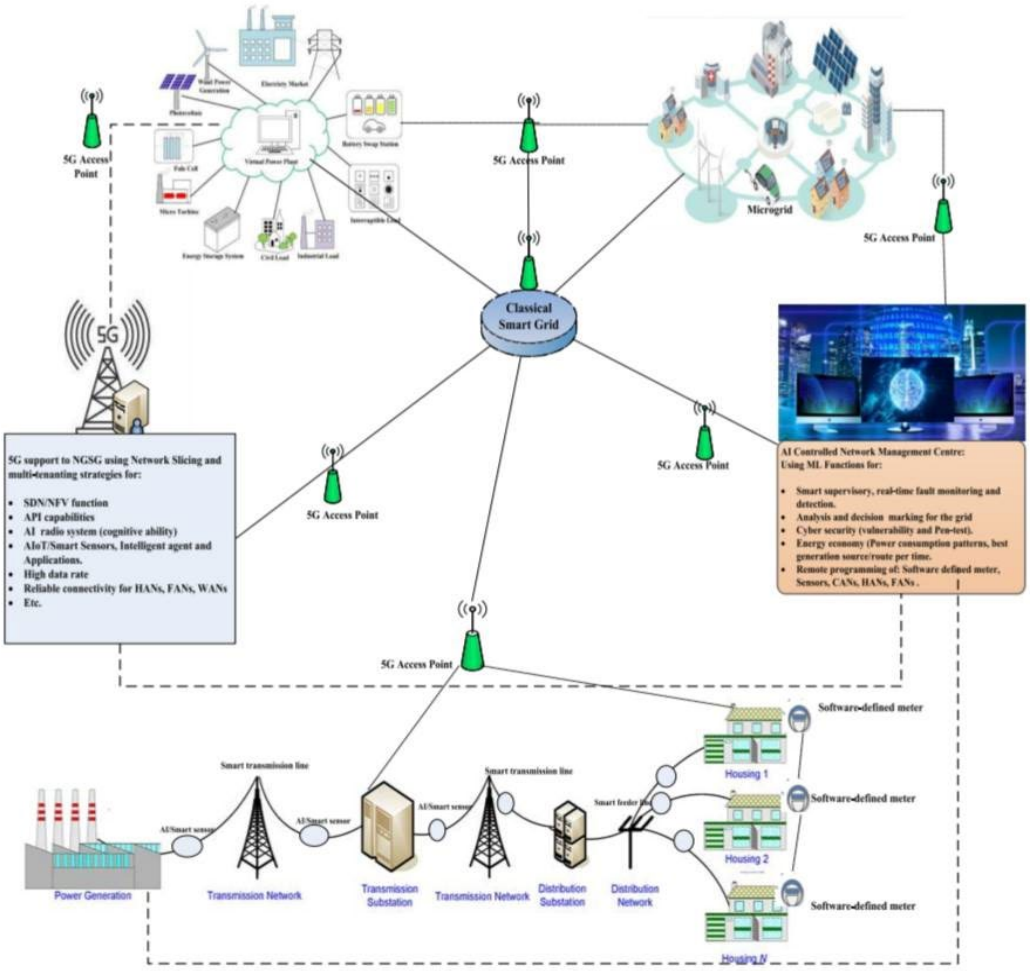
با افزایش تعداد تجهیزاتIoT ، ارسال تمام داده ها به مراکز پردازش ابری می تواند باعث افزایش تأخیر و مصرف پهنای باند شود. رایانش لبه ای راهکاری است که در آن بخشی از پردازش داده ها نزدیک به محل تولید اطلاعات انجام میشود. در شبکه هوشمند برق، Edge Computing میتواند داده های حسگرها و تجهیزات اندازه گیری را در نزدیک ترین نقطه پردازش کرده و امکان تصمیم گیری سریع تر را فراهم کند. این فناوری برای کاربردهایی مانند تشخیص سریع خطا، کنترل بلادرنگ تجهیزات و مدیریت شبکه توزیع اهمیت زیادی دارد.

۴-۹. دوقلوی دیجیتال[۲۲]

یکی از فناوری های نوظهور در صنعت برق، استفاده از دوقلوی دیجیتال است. در این روش، یک مدل دیجیتالی از تجهیزات یا بخش های مختلف شبکه برق ایجاد میشود که با دریافت اطلاعات لحظه ای از تجهیزات واقعی، وضعیت آنها را شبیه سازی و تحلیل میکند. ترکیب Digital Twin با اینترنت اشیا می تواند به بهره برداران شبکه کمک کند تا عملکرد تجهیزات را بررسی کنند، مشکلات احتمالی را پیش بینی کنند و قبل از اجرای تغییرات واقعی، نتایج آن را در محیط مجازی ارزیابی نمایند.

آینده شبکه های هوشمند برق به سمت سیستم هایی حرکت میکند که علاوه بر پایش وضعیت، توانایی تحلیل، پیشبینی و تصمیم گیری خودکار دارند. ترکیب اینترنت اشیا با فناوری هایی مانند هوش مصنوعی، 5G، رایانش لبه ای و دوقلوی دیجیتال، زمینه ایجاد شبکه هایی پایدارتر، امن تر و کارآمدتر را فراهم خواهد کرد. معماری شبکه هوشمند نسل آینده مبتنی بر ترکیب فناوری‌های هوش مصنوعی، اینترنت اشیا و ارتباطات ۵G در شکل ۴ نشان داده شده است.

[2] Digital Twin[2]



شکل ۴. معماری شبکه هوشمند نسل آینده[5]

۱۰. نتایج و جمع بندی

شبکه های هوشمند برق به عنوان یکی از مهمترین راهکارها برای پاسخگویی به نیازهای آینده صنعت انرژی، نیازمند استفاده از فناوری های پیشرفته برای افزایش بهره وری، پایداری و قابلیت اطمینان هستند. در این میان، اینترنت اشیا با فراهم کردن امکان ارتباط میان تجهیزات مختلف شبکه، نقش مهمی در تبدیل شبکه های برق سنتی به سیستم هایی هوشمند و داده محور ایفا میکند. در این مقاله، کاربردهای اصلی اینترنت اشیا در شبکه هوشمند برق بررسی شد. نتایج نشان می دهد که استفاده از تجهیزات متصل به شبکه مانند حسگرهای هوشمند، کنتورهای هوشمند و سامانه های مدیریت انرژی، امکان پایش لحظه ای وضعیت شبکه، مدیریت بهتر مصرف انرژی، تشخیص سریع خطاها و بهینه سازی عملکرد تجهیزات را فراهم میکند. همچنین IoT نقش مهمی در مدیریت منابع انرژی تجدیدپذیر و هماهنگ سازی تولید پراکنده با شبکه برق دارد.

با وجود مزایای فراوان، توسعه شبکه های هوشمند مبتنی بر اینترنت اشیا با چالش هایی مانند امنیت سایبری، حفظ حریم خصوصی، مدیریت حجم بالای داده ها، استانداردسازی ارتباطات و هزینه های اولیه پیاده سازی مواجه است. بنابراین، موفقیت این فناوری نیازمند طراحی معماری های امن، استفاده از پروتکل های ارتباطی مناسب و توسعه راهکارهای پیشرفته پردازش داده است. در آینده، ترکیب اینترنت اشیا با فناوری هایی مانند هوش مصنوعی، شبکه های 5G، رایانش لبه ای و دوقلوی دیجیتال، زمینه ایجاد شبکه های برق خودکارتر و هوشمندتر را فراهم خواهد کرد. این فناوری ها می توانند به پیشبینی بهتر مصرف، کاهش هزینه ها، افزایش استفاده از

انرژی های پاک و بهبود پایداری سیستم قدرت کمک کنند. در مجموع، اینترنت اشیا یکی از فناوری های کلیدی در مسیر تحول صنعت برق محسوب میشود و استفاده صحیح از آن می تواند نقش مهمی در ایجاد شبکه های انرژی کارآمد، پایدار و پاسخگو به نیازهای آینده داشته باشد.

مراجع

[1] Ghasempour, A., “Internet of Things in Smart Grid: Architecture, Applications, Services, Key Technologies, and Challenges,” Inventions, vol. 4, no. 1, p. 22, 2019, doi: 10.3390/inventions4010022.
[2] Kabalci, Y., Kabalci, E., Padmanaban, S., Holm-Nielsen, J. B., and Blaabjerg, F., “Internet of Things Applications as Energy Internet in Smart Grids and Smart Environments,” Electronics, vol. 8, no. 9, p. 972, 2019, doi: 10.3390/electronics8090972.
[3] Y. Saleem et al., “Internet of things-aided smart grid: Technologies, architectures, applications, prototypes, and future research directions,” IEEE Access, vol. 7, pp. 62962–63003, 2019, doi: 10.1109/ACCESS.2019.2913984.
[4] Jia, L., Li, Z., and Hu, Z., “Applications of the Internet of Things in Renewable Power Systems: A Survey,” Energies, vol. 17, no. 16, p. 4160, 2024, doi: 10.3390/en17164160.
[5] Esenogho, E., Djouani, K., and Kurien, A. M., “Integrating artificial intelligence Internet of Things and 5G for next-generation smartgrid: A survey of trends challenges and prospect,” IEEE Access, vol. 10, pp. 4794–4818, 2022, doi: 10.1109/ACCESS.2022.3140595.
[6] C. Matta et al., “A survey on IoT-based smart electrical systems: An analysis of standards, security, and applications,” Energies, vol. 19, p. 965, 2026, doi: 10.3390/en19040965.
[7] Mehdi Aref Khiabani, “Smart grid: Technologies, pros. and con”s., Quarterly journal of Electrical and computer Engineering-Kahroba, NO. 46, 2024.
[8] S. Zarifi, S. Khazraei Shoulaifar, “Artificial Intelligence: An Effective Approach for Monitoring and Predictive Maintenance in Power Distribution Systems”, Quarterly journal of Electrical and computer Engineering-Kahroba, NO. 51, 2026.

20.1001.1.23223723.1405.13.2.3.4 KNO-1302-5203

بهبود تحمل‌پذیری خطای اتصال کوتاه و مدار باز در اینورتر چندسطحی آبشاری با استفاده از راهکار ترکیبی سخت‌افزاری و استراتژی سوئیچینگ

شکوفه میزانی shokoufeh.mizani@icloud.com

کارشناسی ارشد مهندسی برق – الکترونیک قدرت و ماشین‌های الکتریکی-دانشگاه بین المللی امام خمینی قزوین

دکتر محمد سروی msarvi@iust.ac.ir

عضو هیئت علمی دانشکده مهندسی برق دانشگاه علم و صنعت ایران

چکیده

مبدل‌های چند سطحی به دلیل کیفیت مناسب ولتاژ خروجی، اعوجاج هارمونیکی کمتر و قابلیت کاربرد در سطوح توان متوسط و بالا، در سال‌های اخیر در سامانه‌های انرژی تجدیدپذیر، درایوهای صنعتی و شبکه‌های الکتریکی مورد توجه قرار گرفته‌اند. با این حال، افزایش تعداد ادوات نیمه‌هادی و اجزای جانبی، احتمال وقوع خطا و کاهش قابلیت اطمینان را افزایش می‌دهد. در میان توپولوژی‌های مختلف، اینورتر چندسطحی آبشاری پل H به دلیل ساختار ماژولار، توسعه‌پذیری و امکان استفاده از منابع DC مجزا، گزینه‌ای مناسب برای کاربردهای فتوولتائیک و درایوهای توان بالا محسوب می شود. هدف این پژوهش ارائه راهکاری برای بهبود بهره‌برداری تحمل‌پذیر خطا در یک اینورتر آبشاری سه‌فاز پنج‌سطحی است. در روش پیشنهادی، اصلاح پیکربندی سخت‌افزاری و راهبرد سوئیچینگ/کنترل به‌صورت مکمل به کار گرفته شده‌اند تا اثر خطاهای مدار باز و اتصال کوتاه در سلول‌ها و پل‌های مبدل کاهش یابد. عملکرد سامانه در شش سناریوی شبیه سازی در محیط MATLAB/Simulink بررسی شده است. نتایج نشان می‌دهد که در شرایط وقوع خطا، استفاده از مدولاسیون بردار فضایی و سازوکار جبرانی مبتنی بر مدار دوبرابرکننده ولتاژ می‌تواند ضمن کاهش افت کیفیت خروجی، جریان سه‌فاز متعادل‌تری را به بار تحویل دهد. در سناریوی خطای مدار باز همراه با روش پیشنهادی، مقادیر THD گزارش شده برای جریان و ولتاژ خروجی به‌ترتیب حدود ۳۸/۱۱ و ۸۹/۱۱ درصد بوده است. بنابراین، راهکار ترکیبی ارائه‌شده قابلیت افزایش تداوم سرویس و بهبود کیفیت توان پس از وقوع خطا را دارد.

واژگان کلیدی: اینورتر چندسطحی، پل H آبشاری، تحمل‌پذیری خطا، خطای مدار باز، خطای اتصال کوتاه، مدولاسیون بردار فضایی، فتوولتائیک.

۱. مقدمه

گسترش کاربرد سامانه‌های الکترونیک قدرت در درایو موتورها، انرژی‌های تجدیدپذیر، انتقال HVDC، جبران‌سازی کیفیت توان وخودروهای الکتریکی، نیاز به مبدل‌هایی با توان نامی بالاتر و کیفیت خروجی بهتر را افزایش داده است. مبدل‌های چندسطحی با تولید ولتاژ خروجی پله‌ای با تعداد سطوح بیشتر، امکان کاهش محتوای هارمونیکی و تنش ولتاژ روی ادوات نیمه‌هادی را فراهم می‌کنند. در مقابل، افزایش تعداد کلیدها، درایورها، منابع DC و اجزای ذخیره‌کننده انرژی موجب افزایش مسیرهای بالقوه خرابی می‌شود. ازاین‌رو قابلیت اطمینان و تحمل‌پذیری خطا به یکی از شاخص‌های مهم طراحی مبدل‌های چندسطحی تبدیل شده است.

سه خانواده کلاسیک مبدل‌های چندسطحی شامل مبدل مهار دیودی، خازن شناور و آبشاری پل H هستند. ساختار CHB به دلیل ماژولار بودن، امکان افزایش آسان تعداد سطوح و استفاده از منابع DC مستقل، در کاربردهای مبتنی بر منابع تجدیدپذیر مزیت ویژه‌ای دارد. با این وجود، از کار افتادن یک سلول یا یک کلید می‌تواند تعداد سطوح ولتاژ در دسترس را کاهش دهد و موجب عدم تعادل ولتاژهای فازی، افزایش هارمونیک و کاهش توان قابل تحویل شود.

پژوهش حاضر بر این مسئله تمرکز دارد که چگونه می‌توان پس از وقوع خطا، بدون توقف کامل سامانه، عملکرد قابل قبولی برای بار حفظ کرد. ایده اصلی، ترکیب قابلیت تغییر ساختار سخت‌افزاری با اصلاح روش سوئیچینگ و کنترل است. چنین رویکردی در مقایسه با روش‌های صرفاً سخت‌افزاری یا صرفاً نرم‌افزاری، امکان پوشش طیف وسیع‌تری از حالات خطا را فراهم می‌کند.

۲. پیشینه پژوهش و مبانی تحمل‌پذیری خطا

خطاهای کلیدهای قدرت عموماً به دو گروه مدار باز و اتصال کوتاه تقسیم می‌شوند. در خطای مدار باز، مسیر هدایت مورد انتظار قطع می‌شود و در خطای اتصال کوتاه، کلید در وضعیت هدایت باقی می‌ماند. هر دو نوع خطا می‌توانند توالی کلیدزنی را مختل کنند. در CHB، در صورت غیرقابل استفاده شدن یک سلول، معمولاً نخست باید سلول معیوب از مسیر توان جدا یا بای‌پس شود و سپس الگوریتم مدولاسیون برای استفاده مؤثر از سلول‌های سالم اصلاح گردد.

روش‌های تحمل خطا را می‌توان به چهار گروه کلیدمحور، ساق‌محور، ماژول‌محور و سیستم‌محور تقسیم کرد. در راهکارهای کلیدمحور از کلیدهای کمکی سری یا موازی و حالات کلیدزنی افزونه استفاده می‌شود. در روش‌های ساق‌محور، ساق سالم یا افزونه جایگزین بخش معیوب می‌شود. در راهکارهای ماژول‌محور، سلول معیوب از مدار کنار گذاشته و با تغییر دامنه، فاز یا نقطه خنثی، ولتاژهای خط به خط بازتنظیم می‌شوند. روش‌های سیستم‌محور نیز از افزونگی در سطح کل مبدل یا مبدل کمکی استفاده می‌کنند.

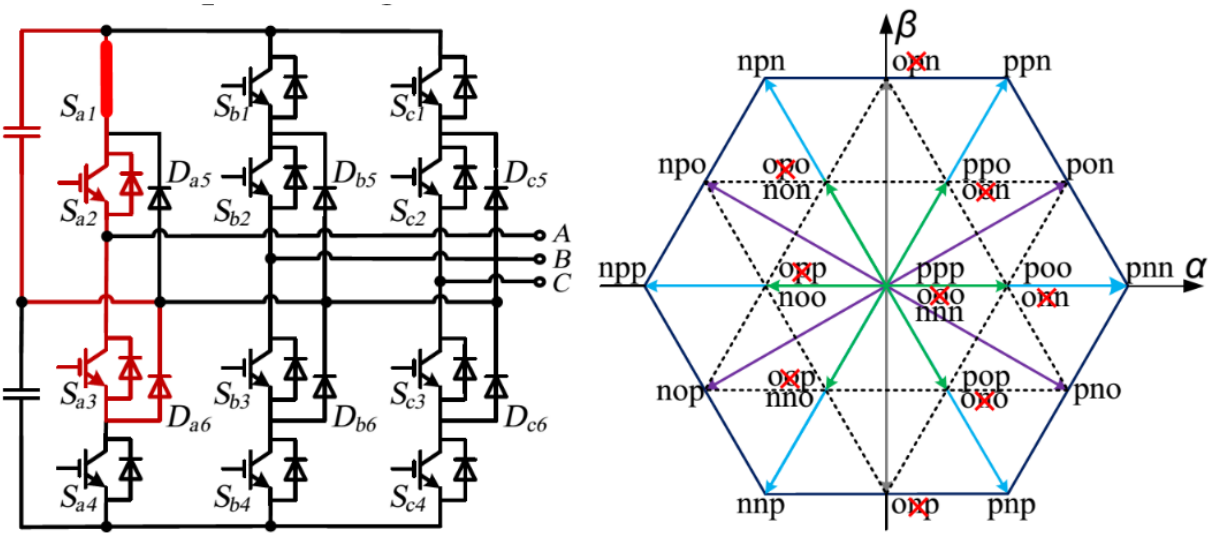
مرورهای جدید نشان می‌دهند که کنترل جبرانی برای سلول‌های معیوب CHB عمدتاً بر تزریق مولفه هموپلار، جابه‌جایی نقطه خنثی، جبران فاز و تغییر شاخص مدولاسیون استوار است. با وجود این، انتخاب راهکار به نوع بار، سطح ولتاژ DC و امکان افزایش ولتاژ سلول‌های سالم وابسته است. در کاربردهای فتوولتائیک که ولتاژ منابع DC مستقل و تابع شرایط تابش است، افزایش ساده ولتاژ لینک DC همیشه امکان‌پذیر نیست؛ بنابراین، استفاده از ترکیب اصلاح سخت‌افزاری و کنترل جبرانی اهمیت بیشتری پیدا می‌کند.

۳. ساختار سامانه مورد مطالعه

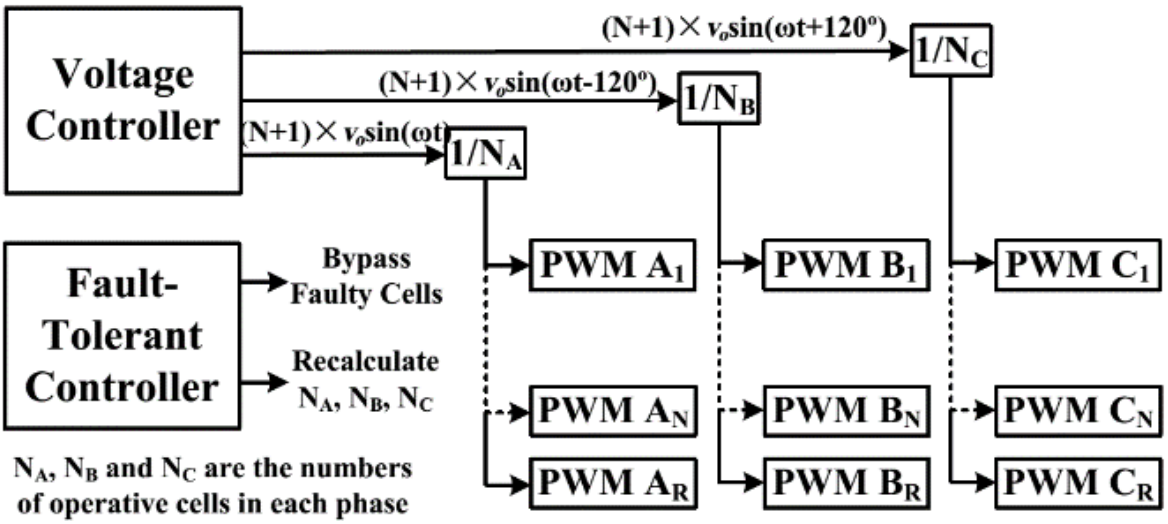
سامانه مورد بررسی یک اینورتر آبشاری سه‌فاز پنج‌سطحی است که هر فاز از دو سلول پل H تشکیل می‌شود. هر سلول به یک منبع DC مستقل متصل است و مجموع ولتاژ سلول‌ها شکل موج چندسطحی را ایجاد می‌کند. در حالت عادی، با انتخاب مناسب حالات کلیدزنی، سطوح ولتاژ مثبت، صفر و منفی در خروجی هر فاز تولید می‌شود. استفاده از منابع مستقل باعث می‌شود این ساختار برای اتصال مستقیم یا غیرمستقیم سامانه‌های فتوولتائیک مناسب باشد.

در مدل شبیه‌سازی، مجموعه پنل‌های خورشیدی، مبدل‌های DC-DC و اینورتر CHB به‌صورت یک سامانه یکپارچه مدل شده‌اند. بخش کنترل وظیفه تولید سیگنال‌های کلیدزنی و تنظیم عملکرد اینورتر را بر عهده دارد. وقوع خطا در یک یا چند پل، موجب کاهش

تعداد سطوح قابل تولید می‌شود؛ بنابراین سازوکار پیشنهادی باید با بای‌پس بخش معیوب و بازتوزیع نقش سلول‌های سالم، کیفیت توان قابل قبول را حفظ کند.



شکل ۳. ساختار نمونه اینورتر چندسطحی آبشاری و فضای بردارهای کلیدزنی.



شکل ۴. ساختار کنترلی و منطق تشخیص/مدیریت خطا در سامانه پیشنهادی.

۴. روش پیشنهادی برای بهره‌برداری تحمل‌پذیر خطا

۴-۱. جداسازی و بای‌پس بخش معیوب

نخستین مرحله پس از تشخیص خطا، جلوگیری از گسترش اثر آن به سایر اجزا است. در خطای یک کلید، بسته به نوع خرابی می‌توان از کلیدهای سالم همان ساق برای ایجاد مسیر ایمن استفاده کرد؛ اما در خطاهای چندکلیدی یا زمانی که یک پل به‌طور کامل غیرقابل استفاده است، بای‌پس مستقل پل ضروری‌تر خواهد بود. در ساختار مورد مطالعه، سلول یا پل معیوب از مسیر تولید ولتاژ کنار گذاشته می‌شود تا از آسیب بیشتر و ایجاد مسیرهای نامطلوب جریان جلوگیری شود.

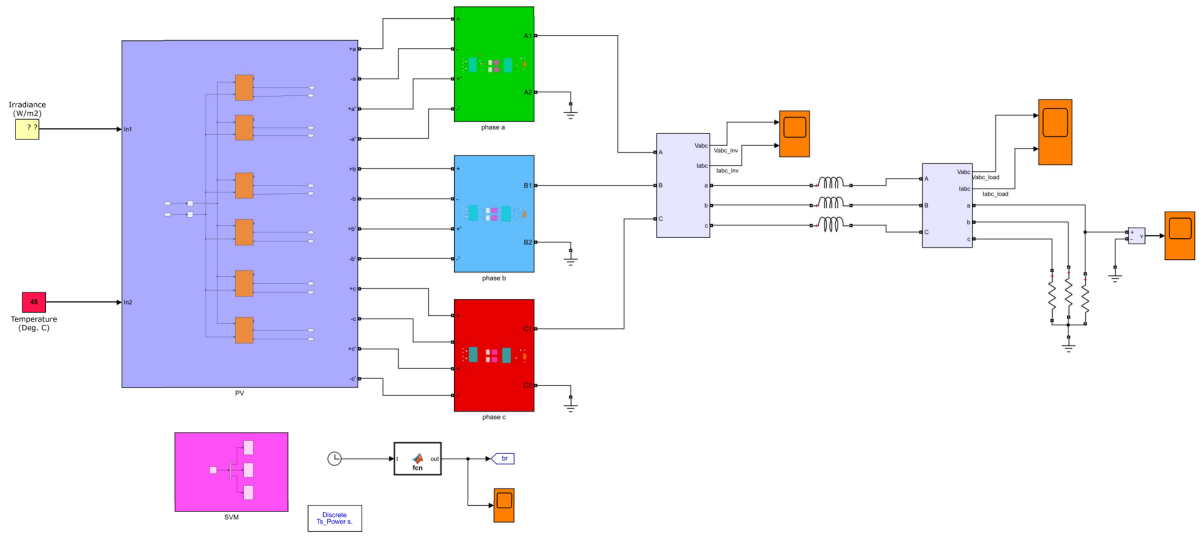
۴-۲. جبران نرم‌افزاری با مدولاسیون بردار فضایی

پس از حذف سلول معیوب، ظرفیت تولید ولتاژ فازها یکسان نخواهد بود. استفاده مستقیم از الگوی کلیدزنی قبل از خطا موجب عدم تعادل خواهد شد. در این پژوهش از راهبرد مبتنی بر مدولاسیون بردار فضایی برای اصلاح مرجع و استفاده بهتر از بردارهای ولتاژ موجود استفاده شده است.

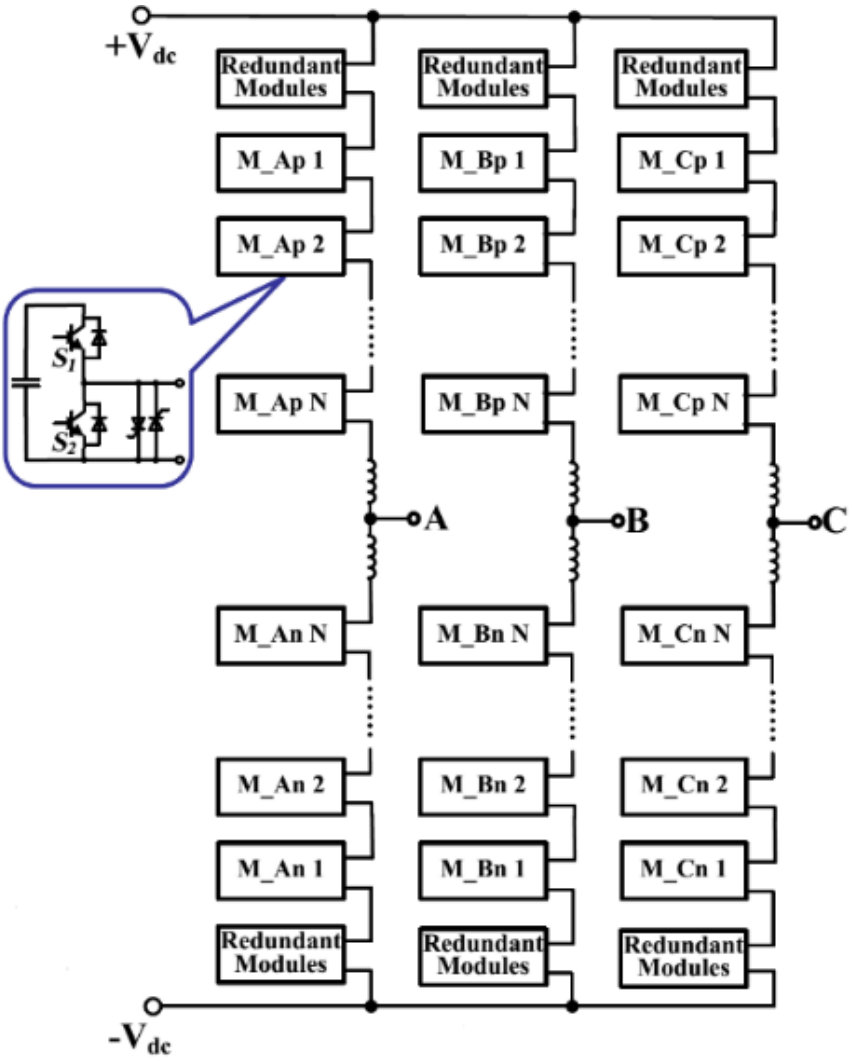
هدف کنترل، حفظ رفتار مناسب جریان بار و کاهش اثر عدم تقارن ولتاژ فازی است. روش SVM به دلیل انعطاف در انتخاب بردارهای نزدیک و امکان تنظیم مولفه‌های مرجع، برای بازآرایی عملکرد پس از خطا مناسب است.

۴-۳. نقش اصلاح سخت‌افزاری و مدار دوبرابرکننده ولتاژ

برای کاهش اثر افت ولتاژ ناشی از خارج شدن سلول‌ها، یک راهکار سخت‌افزاری مکمل مبتنی بر تغییر آرایش مبدل و مدار دوبرابرکننده ولتاژ در نظر گرفته شده است. هدف این بخش، فراهم کردن ظرفیت جبرانی در مسیر تامین انرژی است تا افت سطح ولتاژ و اعوجاج خروجی کاهش یابد. ترکیب این سازوکار با کنترل مناسب باعث می‌شود روش پیشنهادی صرفاً وابسته به افزایش شاخص مدولاسیون نباشد و در شرایطی که ولتاژ منابع مستقل محدود است نیز قابلیت بهتری ارائه دهد.



شکل ۵. پیاده‌سازی شبیه‌سازی سامانه در MATLAB/Simulink.



شکل ۶. منطق اجرایی کنترل و مسیر تصمیم‌گیری در شرایط خطا.

۵. مدل‌سازی و سناریوهای شبیه‌سازی

ارزیابی عملکرد در MATLAB/Simulink و بر مبنای مدل اینورتر CHB سه‌فاز پنج‌سطحی انجام شده است. بار و منبع فتوولتائیک مطابق ساختار پایان‌نامه مدل‌سازی شده‌اند. هدف از طراحی سناریوها، مقایسه رفتار سامانه در حالت سالم، حالت خطا بدون کنترل جبرانی و حالت خطا همراه با راهکارهای پیشنهادی است.

سناریوی اول: عملکرد عادی

در این حالت سامانه بدون وقوع خطا و بدون نیاز به راهکار تحمل‌پذیر خطا ارزیابی می‌شود. این سناریو مبنای مقایسه سایر حالات است و نشان می‌دهد اینورتر در شرایط عادی قادر به تولید ولتاژ پنج‌سطحی و تامین جریان مورد نیاز بار است.

سناریوی دوم: وقوع خطا بدون کنترل پیشنهادی

در این حالت یک وضعیت خطا در پل‌های اینورتر اعمال می‌شود، اما کنترل جبرانی پیشنهادی فعال نیست. هدف، مشاهده مستقیم اثر خطا بر ولتاژ و جریان خروجی است. نتایج این سناریو کاهش کیفیت شکل موج و افزایش عدم تعادل را نشان می‌دهد.

سناریوی سوم: خطا همراه با کنترل SVM

پس از بای‌پس بخش معیوب، کنترل مبتنی بر SVM فعال می‌شود. نتایج نشان می‌دهد با وجود کاهش ظرفیت ولتاژ در یک بخش، کنترل‌کننده قادر است جریان متعادل‌تری به بار تحویل دهد و اثر خطا بر عملکرد کلی سامانه را کاهش دهد.

سناریوی چهارم: استفاده از مدار دوبرابرکننده ولتاژ

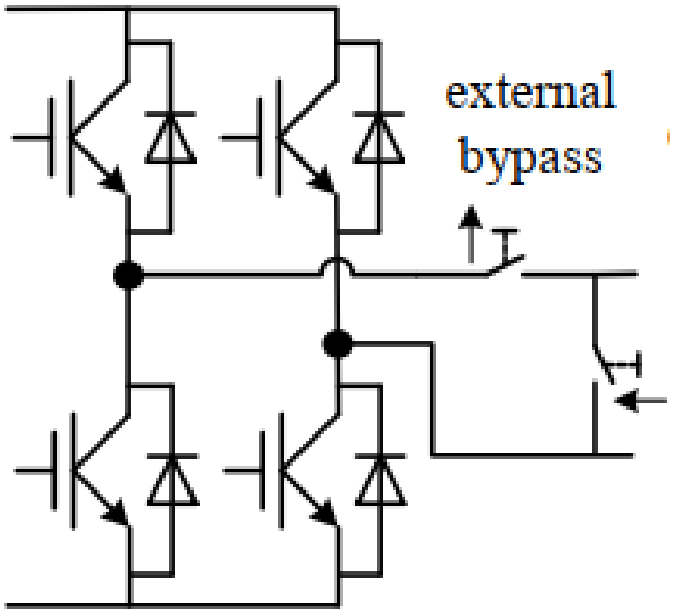
در این سناریو، راهکار سخت‌افزاری جبرانی در کنار کنترل اعمال می‌شود. هدف، جبران بخشی از افت ولتاژ و بهبود کیفیت خروجی است. نتایج گزارش‌شده در پایان‌نامه نشان‌دهنده بهبود عملکرد نسبت به حالت خطای بدون جبران است.

سناریوی پنجم: خطای مدار باز بدون جبران سخت‌افزاری

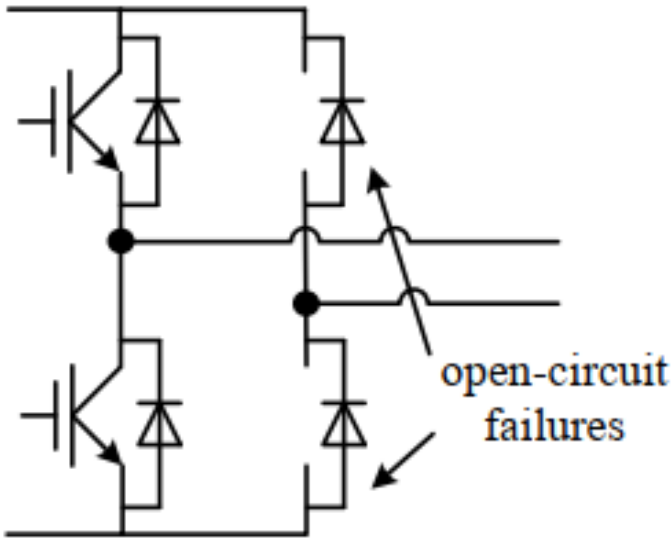
خطای مدار باز روی پل‌های مورد نظر اعمال می‌شود و سامانه بدون مدار دوبرابرکننده ولتاژ بررسی می‌گردد. خروجی در این وضعیت دارای اعوجاج محسوس و کاهش سطح ولتاژ است و نقش ضرورت راهکار جبرانی را آشکار می‌سازد.

سناریوی ششم: خطای مدار باز همراه با راهکار پیشنهادی

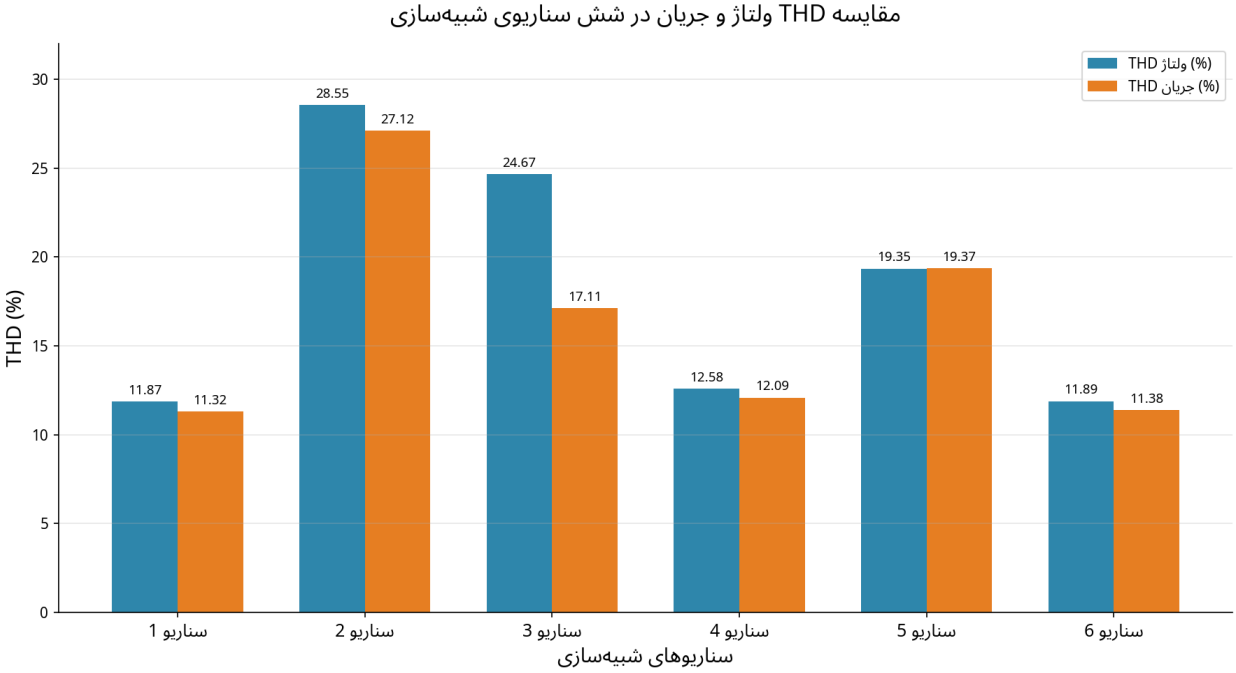
شرایط خطای مدار باز مشابه سناریوی پنجم است، اما سازوکار دوبرابرکننده ولتاژ و کنترل پیشنهادی فعال می‌شود. مطابق نتایج ، با وجود کاهش سطح ولتاژ فاز معیوب، جریان خروجی رفتار متعادل‌تری دارد و THD جریان و ولتاژ به‌ترتیب حدود ۳۸/۱۱ و ۸۹/۱۱ درصد گزارش شده است.



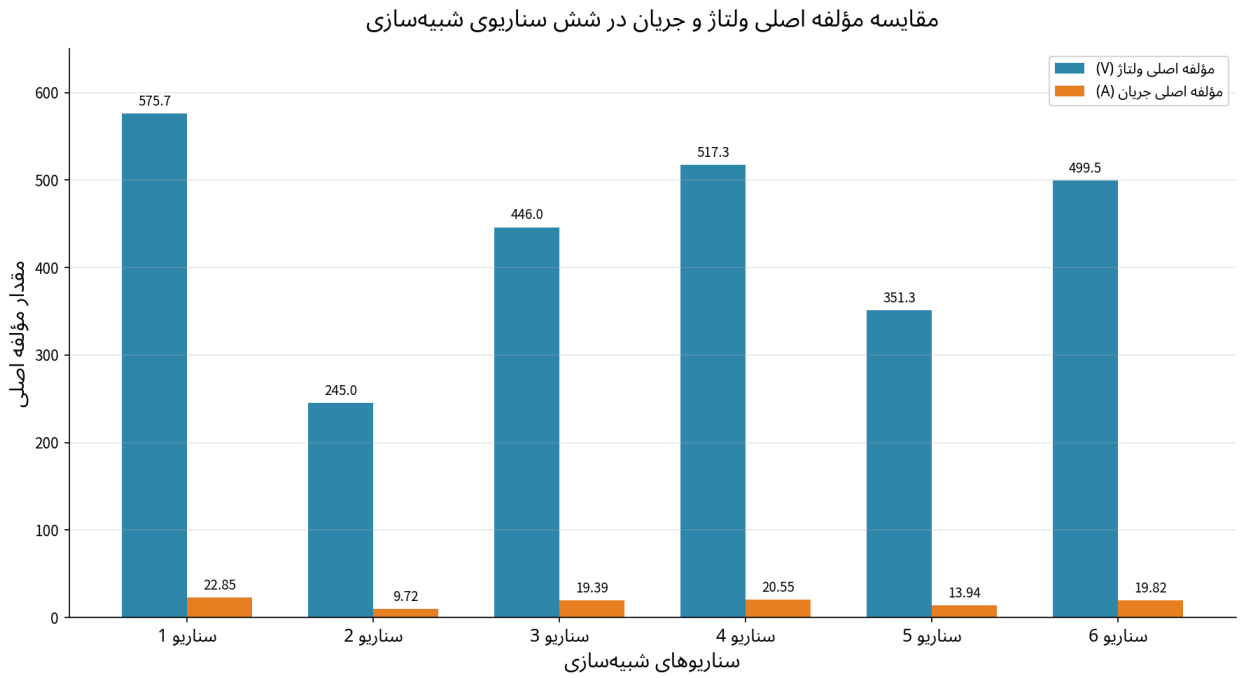
شکل ۷. نمونه بای‌پس سخت‌افزاری پل معیوب.



شکل ۸. نمایش نمونه خطای مدار باز و مسیر بای‌پس.



شکل ۹. مقایسه THD ولتاژ و جریان در شش سناریوی شبیه‌سازی.



شکل ۱۰. مقایسه مولفه اصلی ولتاژ و جریان در شش سناریوی شبیه‌سازی.

۶. نتایج و بحث

مقایسه شش سناریو نشان می‌دهد که وقوع خطا بدون راهکار جبرانی به‌سرعت بر کیفیت ولتاژ خروجی اثر می‌گذارد. از دست رفتن یک سلول یا پل موجب کاهش تعداد حالات ولتاژ و در نتیجه افزایش اعوجاج می‌شود. در کاربرد سه‌فاز، تفاوت ظرفیت فاز معیوب با فازهای سالم می‌تواند عدم تعادل قابل توجهی ایجاد کند.

با اعمال کنترل مبتنی بر SVM، رفتار جریان نسبت به حالت بدون جبران بهبود می‌یابد. اهمیت این موضوع در کاربردهایی مانند درایوها و سامانه‌های منفصل از شبکه بیشتر است، زیرا در بسیاری از موارد ادامه تامین بار حتی با کاهش ظرفیت مبدل از توقف کامل ارزشمندتر است. نتایج پایان‌نامه نشان می‌دهد راهبرد کنترلی قادر است در حضور عدم تعادل ولتاژ، جریان بار را در وضعیت قابل قبول‌تری حفظ کند.

افزودن سازوکار سخت‌افزاری مکمل باعث بهبود بیشتر عملکرد می‌شود. مدار دوبرابرکننده ولتاژ به عنوان ظرفیت جبرانی، محدودیت ناشی از کاهش سطح ولتاژ را تا حدی کاهش می‌دهد. در سناریوی ششم، جریان‌های سه‌فاز به شکل نزدیک‌تری به رفتار سینوسی حفظ شده‌اند. مقدار THD جریان حدود ۳۸/۱۱ درصد و THD ولتاژ حدود ۸۹/۱۱ درصد گزارش شده است. این نتایج نشان می‌دهد اگرچه خطا به‌طور کامل حذف نمی‌شود، ترکیب کنترل و اصلاح ساختار می‌تواند از افت شدید کیفیت توان جلوگیری کند.

از منظر مهندسی، راهکار پیشنهادی با افزایش تعداد ادوات قدرت هزینه سخت‌افزاری را افزایش می‌دهد. در پایان‌نامه، ساختار سه‌فاز پنج‌سطحی شامل ۲۴ MOSFET گزارش شده و با توسعه پیکربندی پیشنهادی، هزینه اجزای کلیدی افزایش می‌یابد. با این حال، در کاربردهای حساس که توقف سرویس یا اعزام تیم تعمیراتی هزینه بالایی دارد، افزایش اولیه هزینه می‌تواند در برابر افزایش قابلیت دسترس‌پذیری توجیه‌پذیر باشد.

۷. مقایسه با روندهای جدید پژوهشی

مطالعات جدید نیز بر اهمیت بازتنظیم مدولاسیون و جبران ولتاژ پس از خرابی سلول‌های CHB تاکید دارند. مرور جامع روش‌های کنترل تحمل‌پذیر خطا در سال ۲۰۲۳، روش‌های مبتنی بر جابه‌جایی فاز، مولفه هموپلار و تنظیم حامل را از مهم‌ترین دسته‌های کنترل نرم‌افزاری معرفی کرده است. پژوهش‌های سال ۲۰۲۴ نیز روش‌های تشخیص خطا، تحلیل THD و جداسازی سلول معیوب را برای اینورترهای پنج‌سطحی بررسی کرده‌اند. در یک پژوهش ۲۰۲۵، تغییر حالت ساختاری و مدولاسیون اصلاح‌شده برای حفظ ولتاژ و توان خروجی پس از خطا پیشنهاد شده است. این روندها نشان می‌دهد ایده ترکیب تغییر ساختار با اصلاح مدولاسیون، همچنان یکی از مسیرهای فعال توسعه اینورترهای تحمل‌پذیر خطا است.

تمایز رویکرد حاضر در تمرکز هم‌زمان بر شرایط منبع فتوولتائیک، بای‌پس بخش معیوب، کنترل SVM و جبران سخت‌افزاری است. این ترکیب به‌ویژه زمانی اهمیت دارد که افزایش ساده ولتاژ لینک DC ممکن نباشد یا منابع DC مستقل رفتار یکسانی نداشته باشند.

جداول و نمودارهای تکمیلی نتایج شبیه‌سازی

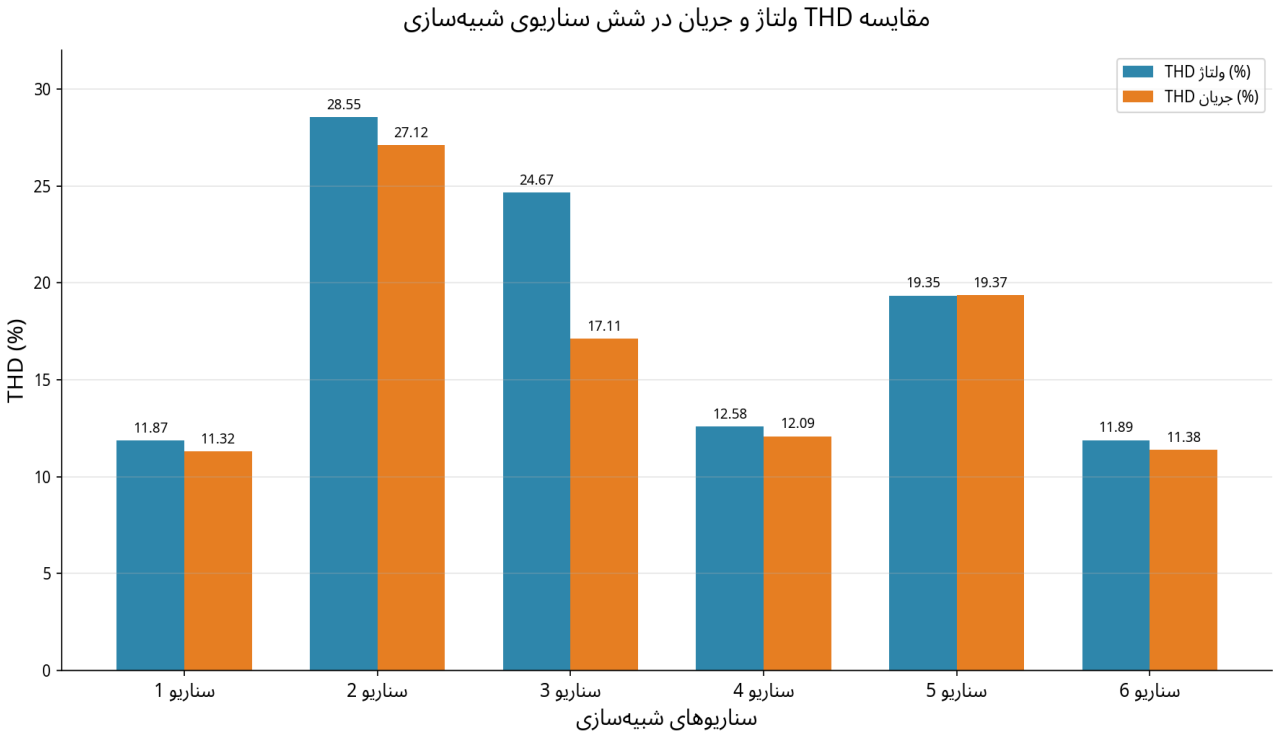
برای جمع‌بندی کمی نتایج شش سناریو ، مقادیر گزارش‌شده در تحلیل FFT به صورت جدول و نمودار ارائه شده‌اند. این مقاله ، مقایسه مستقیم عملکرد حالت سالم، خطا بدون جبران، کنترل SVM و راهکار مبتنی بر مدار دوبرابرکننده ولتاژ را امکان‌پذیر می‌کند.

پارامتر	مقدار	واحد/توضیح
ولتاژ نامی پنل	۴۲۵	V
توان نامی پنل	۴۱۵	W
ولتاژ مدار باز	۸۵٫۳	V
ولتاژ در بیشینه توان	۷۲٫۹	V
جریان اتصال کوتاه	۶٫۰۹	A
جریان در بیشینه توان	۵٫۶۹	A
ماژول‌های سری	۷	ماژول
تعداد پنل‌های موازی	۸۸	پنل
ولتاژ DC هر پل	۸۰	V
فرکانس موج حامل	۱۰	Hz
فرکانس مرجع	۵۰	Hz
ولتاژ خروجی نامی	۶۰۰	V

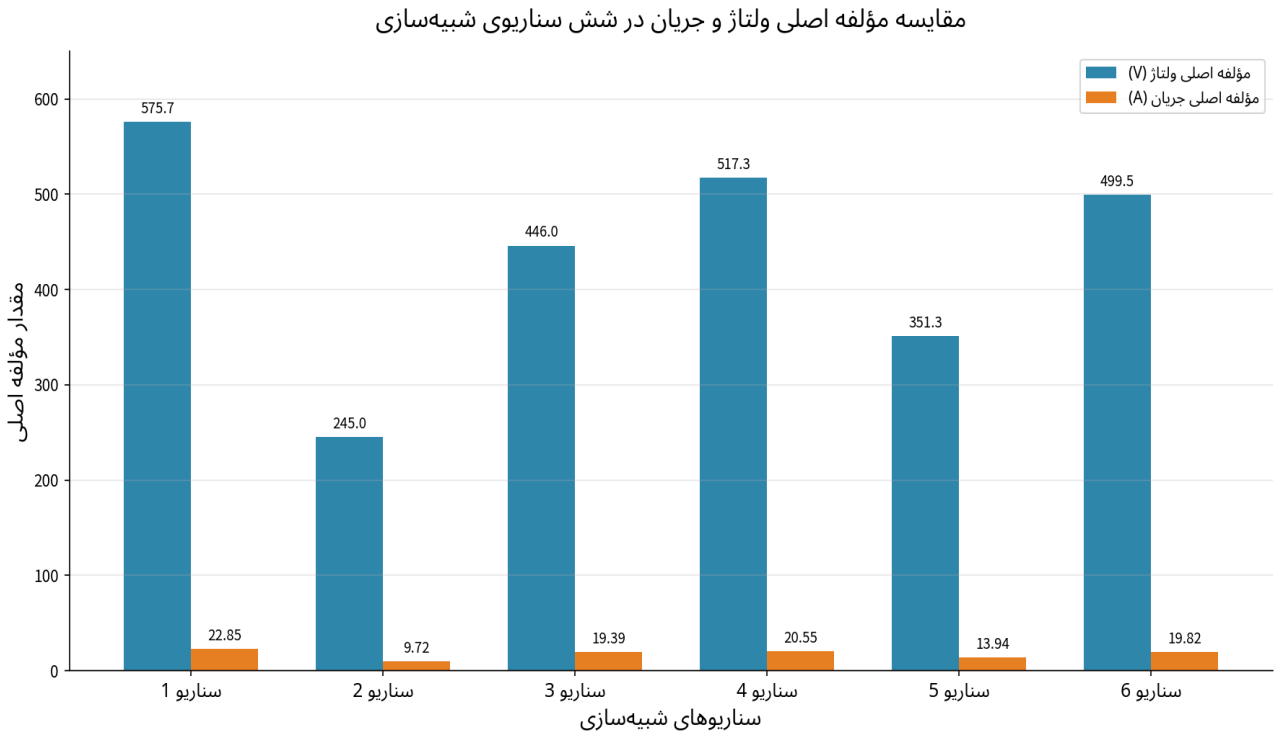
جدول ۱. پارامترهای اصلی مدل شبیه‌سازی

سناریو	شرایط آزمون	مولفه اصلی ولتاژ (V)	THD ولتاژ (٪)	مولفه اصلی جریان (A)	THD جریان (٪)
۱	حالت عادی	۵۷۵,۷	۱۱,۸۷	۲۲,۸۵	۱۱,۳۲
۲	خطای اتصال کوتاه، بدون کنترل پیشنهادی	۲۴۵,۰	۲۸,۵۵	۹,۷۲۴	۲۷,۱۲
۳	خطای اتصال کوتاه + SVM	۴۴۶,۰	۲۴,۶۷	۱۹,۳۹	۱۷,۱۱
۴	خطای اتصال کوتاه + مدار دوبرابرکننده	۵۱۷,۳	۱۲,۵۸	۲۰,۵۵	۱۲,۰۹
۵	خطای مدار باز، بدون کنترل پیشنهادی	۳۵۱,۳	۱۹,۳۵	۱۳,۹۴	۱۹,۳۷
۶	خطای مدار باز + مدار دوبرابرکننده	۴۹۹,۵	۱۱,۸۹	۱۹,۸۲	۱۱,۳۸

جدول ۲. مقادیر مولفه اصلی و THD استخراج‌شده از نتایج FFT شش سناریوی شبیه‌سازی.



شکل ۱. مقایسه THD ولتاژ و جریان در شش سناریوی شبیه‌سازی.



شکل ۲. مقایسه مولفه اصلی ولتاژ و جریان در شش سناریوی شبیه‌سازی.

از جدول ۲ و شکل ۱ مشاهده می‌شود که وقوع خطا بدون راهکار جبرانی، THD ولتاژ را در سناریوی دوم به ۲۸,۵۵ درصد و THD جریان را به ۲۷,۱۲ درصد افزایش داده است. اعمال SVM در سناریوی سوم THD جریان را به ۱۷,۱۱ درصد کاهش می‌دهد. در سناریوی چهارم، افزودن مدار دوبرابرکننده ولتاژ، THD ولتاژ و جریان را به ترتیب به ۱۲,۵۸ و ۱۲,۰۹ درصد کاهش داده است. برای خطای مدار باز نیز مقایسه سناریوهای پنجم و ششم نشان می‌دهد که استفاده از راهکار جبرانی، THD ولتاژ را از ۱۹,۳۵ به ۱۱,۸۹ درصد و THD جریان را از ۱۹,۳۷ به ۱۱,۳۸ درصد کاهش داده است. این ارقام مستقیماً از تحلیل FFT پایان‌نامه استخراج شده‌اند.

۸. نتیجه‌گیری

در این مقاله، عملکرد تحمل‌پذیر خطای یک اینورتر چندسطحی آبشاری سه‌فاز پنج‌سطحی در حضور خطاهای مدار باز و اتصال کوتاه بررسی شد. افزایش تعداد کلیدهای قدرت در ساختارهای چندسطحی، احتمال خرابی را افزایش می‌دهد و به همین دلیل ادامه بهره‌برداری پس از خطا یکی از نیازهای مهم کاربردهای صنعتی و تجدیدپذیر است.

روش پیشنهادی بر ترکیب بای‌پس یا جداسازی بخش معیوب، اصلاح الگوریتم سوئیچینگ با استفاده از مدولاسیون بردار فضایی و استفاده از یک راهکار سخت‌افزاری جبرانی مبتنی بر مدار دوبرابرکننده ولتاژ استوار است. نتایج شش سناریوی شبیه‌سازی نشان داد که بدون راهکار جبرانی، وقوع خطا موجب افت سطح ولتاژ و افزایش اعوجاج می‌شود؛ در حالی که با فعال شدن کنترل SVM و سازوکار سخت‌افزاری پیشنهادی، جریان خروجی متعادل‌تر و کیفیت توان بهتر حفظ می‌شود.

در سناریوی خطای مدار باز همراه با روش پیشنهادی، THD جریان حدود ۳۸/۱۱ درصد و THD ولتاژ حدود ۸۹/۱۱ درصد گزارش شد. بنابراین، راهکار ارائه‌شده می‌تواند به عنوان یک گزینه برای افزایش تداوم سرویس و قابلیت اطمینان مبدل‌های CHB در کاربردهای فتوولتائیک و درایوهای توان بالا مورد توجه قرار گیرد. برای توسعه آینده، پیاده‌سازی آزمایشگاهی، استفاده از روش‌های تشخیص هوشمند خطا، بهینه‌سازی پارامترهای کنترل و بررسی خطاهای خازن لینک DC پیشنهاد می‌شود.

منابع

[1]A. Nabae, I. Takahashi, and H. Akagi, “A new neutral point clamped PWM inverter,” IEEE Transactions on Industry Applications, vol. IA-۱۷، no. ۵، pp. ۵۱۸–۵۲۳، ۱۹۸۱.

[2]J. Rodríguez, J. S. Lai, and F. Z. Peng, “Multilevel inverters: A survey of topologies, controls and applications,” IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. ۴۹، no. ۴، pp. ۷۲۴–۷۳۸، ۲۰۰۲.

[3]H. Hamza et al., “A Review of Fault-Tolerant Control Methods for Cascaded H-Bridge Multilevel Inverters,” IEEE, ۲۰۲۳.

[4]P. M. Lingom, J. Song-Manguelle, J. M. Nyobe-Yome, and M. L. Doumbia, “A Comprehensive Review of Compensation Control Techniques Suitable for Cascaded H-Bridge Multilevel Inverter Operation with Unequal DC Sources or Faulty Cells,” Energies, vol. ۱۷، no. ۳، art. ۷۲۲، ۲۰۲۴, doi:۱۰,۳۳۹۰/en۱۷۰۳۰۷۲۲.

[5]Comprehensive analysis of faults and diagnosis techniques in cascaded multi-level inverters,” Heliyon, vol. ۱۰، no. ۲۱، e۳۹۹۰۱، ۲۰۲۴, doi:۱۰,۱۰۱۶/j.heliyon.۲۰۲۴,e۳۹۹۰۱.

[6]K. Khalili and J. Nazarzadeh, “Improved Modulation Technique in Cascaded H-Bridge Inverters for Fault-Tolerant With Full Bridge Single Phase Rectifier Structure,” IET Power Electronics, vol. ۱۸، e۷۰۰۴۰، ۲۰۲۵, doi:۱۰,۱۰۴۹/pel۲,۷۰۰۴۰.

[7]P. Horrillo-Quintero et al., “Fault-tolerant control for a microgrid with PV systems and energy storage systems integrated into quasi-Z-source cascaded H-bridge multilevel inverter,” Electric Power Systems Research, vol. ۲۲۶، ۱۰۹۹۳۸، ۲۰۲۴, doi:۱۰,۱۰۱۶/j.epsr.۲۰۲۳,۱۰۹۹۳۸.

[8]C. A. Munoz et al., “Fault-Tolerant Operation of Star- and Delta-Connected Cascaded H-Bridge Multilevel Inverters: A Comparative Study,” ۲۰۲۵ ۲۲nd International Conference on Electrical Engineering, Computing Science and Automatic Control, ۲۰۲۵.

[9]S. R. Hameed and T. H. Al-Mhana, “Cascaded H–Bridge Multilevel Inverter: Review of Topologies and Pulse Width Modulation,” Tikrit Journal of Engineering Sciences, vol. ۳۱، no. ۱، ۲۰۲۴.

20.1001.1.23223723.1405.13.2.4.5 KNO-1302-5204

تولید و کاربرد آزمایشی پیکره آموزشی ماشین‌خوان از الگوهای خطاهای دستوری رایج در انگلیسی: پیوند تحلیل خطا، زبان‌شناسی پیکره‌ای و تحلیل مقابله‌ای کاربردی

محمدرضا فلاحتی قدیمی فومنی، دانشیار گروه پژوهشی زبان‌شناسی رایانشی، مؤسسه استنادی و پایش علم و فناوری جهان اسلام (ISC)، شیراز، ایران، mrfalahati81@gmail.com

چکیده:

از داده‌های خطای ماشین‌خوان می‌توان به‌عنوان منبعی ارزشمند در آموزش زبان استفاده کرد. در این پژوهش دو پیکره ماشین‌خوان تولید شد: ۱) پیکره الگوهای خطاهای دستوری رایج انگلیسی و ۲) پیکره موازی جملات انگلیسی حاوی نکات دستوری به‌همراه ترجمه فارسی آن‌ها. داده‌ها از چاپ هفتم کتاب Common Mistakes in English استخراج و در نهایت ۶۵۸ جمله به‌دست آمد. برای هر رکورد، جمله صحیح، ترجمه فارسی، صورت سؤال، گزینه‌ها، کلید پاسخ و برچسب خطا ثبت شد. خطاها در ۵ بخش اصلی و ۲۰ زیربخش دسته‌بندی شدند. از این مجموعه، آزمون ۱۰۹ سؤالی متناسب با حجم زیربخش‌ها تهیه و در پاییز ۱۴۰۴ روی ۱۲۰ دانشجوی رشته زبان انگلیسی در سه دانشگاه شیراز اجرا شد. محصول نهایی، دو منبع ماشین‌خوان قابل استفاده در طراحی آزمون و تحلیل خطاست. محدودیت‌های پژوهش شامل نمونه‌گیری دردسترس، اتکا به یک منبع خاص و نبود داده‌های طبیعی تولیدشده توسط زبان‌آموزان است.

کلمات کلیدی: زبان‌شناسی پیکره‌ای، تحلیل خطا، پیکره آموزشی، پیکره موازی، سؤالات چندگزینه‌ای، خطاهای دستوری.

مقدمه

بروز خطا در تولیدات زبانی زبان‌آموزان جزئی لاینفک از فرایند یادگیری زبانی محسوب می‌شود. از این منظر، بروز خطا در تولیدات زبانی زبان‌آموزان یک عامل منفی تلقی نشده و برعکس می‌تواند اطلاعات متعددی را درخصوص مراحل یادگیری زبان و نیز دشواری‌هایی که زبان‌آموزان با آن مواجه هستند در اختیار محقق قرار دهد [1, 2]. از سویی دیگر، حوزه زبانشناسی مقابله‌ای و یا دقیق‌تر تحلیل کاربردی مقابله‌ای درصدد است تا از طریق بررسی شباهت‌ها و نیز تفاوت‌های موجود در بین زبان‌های مختلف، دشواری‌های احتمالی را که زبان‌آموزان در طی فرایند یادگیری زبان با آن مواجه می‌شوند، توضیح دهد[3, 4] .

با پیدایش زبان‌شناسی پیکره‌ای، مطالعه خطا به جای تمرکز بر داده‌های محدود، بر روی داده‌های بزرگ متمرکز شده است. البته، در این تحول صرفاً بر روی بزرگ‌تر کردن حجم داده تمرکز نشده، بلکه تلاش می‌شود تا به سمت شناسایی الگوهای جامعه‌تر و برچسب‌های منسجم‌تر و نیز کاربردی‌تر کردن پیکره‌های تولید شده حرکت شود [5, 6, 7]. از این منظر هدف پژوهش حاضر نیز صرفاً گردآوری و توصیف انواع خطاهای دستوری نبوده بلکه هدف اصلی آن بوده تا خطاهای دستوری شناسایی‌شده در قالب یک منبع و پیکره آموزشی کاربردی، ساختاریافته و ماشین‌خوان تنظیم و ارائه شود. در اینجا به جای پیکره زبان‌آموز از لفظ پیکره آموزشی استفاده به عمل آمد. دلیل این امر آن بوده که منبع داده‌های مورد استفاده در این پژوهش، داده‌های طبیعی زبان‌آموزان نبوده بلکه از جملات موجود در کتاب Common Mistakes in English نوشته ت. ج. فیتیکیدز استفاده شده است [8]. از این رو منظور از پیکره در این پژوهش، پیکره داده‌محور بوده و نه یک پیکره زبان‌آموز برگرفته از تولیدات زبانی واقعی زبان‌آموزان.

در توجیه استفاده از کتاب Common Mistakes in English نیز قابل ذکر است که این کتاب یکی از کتاب‌های کلاسیک در حوزه خطاهای رایج زبان‌آموزان زبان انگلیسی به عنوان یک زبان خارجی در دنیا محسوب می‌شود. در این کتاب تعداد زیادی از خطاهای دستوری در قالب صورت های درست (Say) و نادرست (Don’t Say) مورد بررسی قرار گرفته است. خطاها در این کتاب در قالب ۵ بخش کلی ارائه می‌شوند که عبارتند از: ۱) استفاده از صورت‌های نادرست، ۲) حذف نادرست، ۳) واژگان حشو، ۴) جایگاه دستوری نامناسب و ۵) به‌جای‌هم گرفتن واژه‌های مشابه. وجود این دسته‌بندی مشخص بین صورت‌های درست و نادرست و طیف گسترده نکات دستوری موجود در این کتاب آن را به منبع داده‌ای معتبر برای انجام پژوهش حاضر تبدیل می‌کند.

بر این اساس در پژوهش حاضر دو هدف کلی دنبال می‌شود: ۱) طراحی و مستندسازی یک پیکره آموزشی ماشین‌خوان از ۶۵۸ جمله حاوی نکات مختلف دستوری و سؤالات مستخرج از هر جمله و ۲) تولید یک پیکره موازی انگلیسی-فارسی از همان جمله‌ها. برای نشان دادن کاربردی بودن این پیکره، آزمونی حاوی ۱۰۹ سؤال (برگرفته از ۵ بخش کتاب و ۶۵۸ سؤال) بر روی ۱۲۰ دانشجوی سال سوم و چهارم رشته‌های زبان انگلیسی در سه دانشگاه شیراز، آزاد اسلامی واحد شیراز و مؤسسه آموزش عالی زند شیراز اجرا شد. در ادامه فرایند ساخت پیکره‌ها، ساختارداده، الگوی برچسب‌دهی، شیوه تولید گزینه‌های هر سؤال، قابلیت‌های استفاده و محدودیت‌های تعمیم توضیح داده خواهد شد.

پیشینه پژوهش

در هر نوع بحث تحلیل خطا ابتدا لازم است تا بین دو واژه «خطا» و «اشتباه» تفاوت قایل شویم. خطا به طور کلی نوعی انحراف نظام‌مند است که به توانش زبانی مربوط می‌شود، درحالی که اشتباه به کنش زبانی مربوط می‌شود و غالباً بر اثر عواملی نظیر لغزش زبانی، بی دقتی، خستگی و نظیر آن اتفاق می‌افتد [2]. در [1, 9, 10] نیز تحلیل خطا به عنوان مجموعه‌ای از فرایندهای تشخیص، توصیف، دسته‌بندی صورت‌های نامتعارف زبانی تعریف شده است. همچنین [11] مشخص بودن واحد تحلیل و معیار تشخیص خطا را برای هر نوع تحلیل خطا ضروری می‌داند.

خطاها را می‌توان به شکل‌های مختلف دسته‌بندی کرد. برای نمونه، بر اساس شکل ظاهری خطاها به حذف، افزایش، جابجایی و ترتیب واژه تقسیم‌بندی می‌شوند. همچنین می آنها را بر اساس واحد زبانی به خطای واجی، واژه‌ای و نحوی تقسیم‌بندی کرد یا بر اساس منشأ اصلی خطا [2, 12]. در پژوهش حاضر، به جای تمرکز بر منشأ خطا بر روی نوع خطا تمرکز شده است، چرا که برای تعیین علت و منشأ خطا به وجود داده‌های زبانی مستقل و طبیعی، سوابق زبانی زبان‌آموز و موقعیت تولید زبان نیاز خواهیم داشت که در پژوهش حاضر مدنظر نبوده است.

طبق نظر [5] در زبان‌شناسی پیکره‌ای به داده‌های زبانی به‌عنوان داده‌هایی ساختاریافته و قابل پردازش با استفاده از رایانه نگریسته می‌شود. در این حوزه پژوهش‌های متعددی به انجام رسیده است که به اختصار به موارد زیر اشاره می‌شود. در [13] برای مطالعه قدرت تشخیص عبارت در دانشجویان زبان انگلیسی از چارچوبی پیکره‌محور استفاده شد. به همین ترتیب در پژوهش‌های [14, 15, 16] نیز خطاهای نوشتاری و دستوری با استفاده از رویکردی پیکره‌محور توصیف و بررسی شد. به عنوان یک نمونه دیگر، [17] برای ساخت داده‌های مرتبط با خطاهای دستوری، چارچوبی را پیشنهاد داد. پژوهش‌های بالا و نمونه‌های دیگر از این دست همگی مؤید این نکته‌اند که در پژوهش‌های پیکره‌محور تولید داده‌های ساخت‌یافته و قابل پردازش اولویتی اساسی به حساب می‌آید.

در ایران نیز تحقیقات پیکره‌محور بسیاری به انجام رسیده است. برای نمونه نویسندگان در [18] به تشریح ضرورت ایجاد یک پیکره زبان‌آموز فارسی و برچسب‌گذاری خطاها برای اهداف آموزشی پرداختند. همچنین [19, 20, 21, 22] پژوهش‌های خود را در حوزه پیکره‌های موازی انجام داده و آنها را در حوزه‌های مختلف نظیر بازیابی اطلاعات بین‌زبانی، ماشین ترجمه و ... دارای کاربرد دانستند.

دو حوزه تحقیقاتی تحلیل مقابله‌ای و تحلیل خطا به هم پیوسته‌اند. در حقیقت، در تحلیل مقابله‌ای نظام‌های زبانی مختلف با هم مقایسه می‌شوند، در حالی که در حوزه تحلیل خطا، هدف استخراج و توصیف خطاهایی است که در تولیدات زبانی بروز پیدا می‌کند. همچنین در حوزه زبان‌شناسی پیکره‌ای نیز امکان جستجو، برچسب‌دهی و بازیابی اطلاعات موجود در پیکره فراهم می‌گردد. در این مقاله، بررسی خطاها به بخش تحلیل خطا، برچسب‌زنی نوع خطا به بخش زبان‌شناسی پیکره‌ای و استفاده آموزشی از داده‌های این پژوهش به بخش تحلیل مقابله‌ای کاربردی مربوط می‌شود. نکته قابل ذکر در این قسمت آن است که هدف پژوهش حاض بررسی ریشه خطاها نبوده و صرفاً نوع خطای دستوری را پوشش می‌دهد. از این رو برای بررسی تأثیر زبان اول یا دوم به داده‌های جدید نیاز خواهد بود.

از آنجا که در این پژوهش بر اساس جملات کتاب و سؤال‌های مستخرج از آن یک آزمون ۱۰۹ سؤاله چندگزینه تولید گردید در این قسمت در خصوص نحوه طراحی آن توضیحاتی آورده می‌شود. یک سؤال چند گزینه‌ای بخش‌های مختلفی دارد که عبارتند از خود سؤال، گزینه‌ها، پاسخ درست، گزینه‌های انحرافی و ... . در [23] بیان می‌شود که در طراحی سؤال و آزمون چندگزینه‌ای ضرورت دارد تا به ارتباط بین سؤال با موضوع و هدف آزمون توجه شود. همچنین لازم است تا از راه‌کارهایی برای پنهان ماندن گزینه درست استفاده شود به گونه‌ای که زبان‌موز نتواند پاسخ درست را پیش‌بینی کند. مثلاً محقق می‌تواند پاسخ سؤالات را بین گزینه‌های مختلف توزیع کند،

همچنانکه می‌تواند طول گزینه‌ها را ثابت یا نزدیک به هم نگه دارد و نظیر آن. برای رعایت این نکات محقق از یک دستورالعمل به شرح زیر استفاده کرد: در گام نخست، محقق از محتوای ارائه شده در هر مدخل و نیز تجربه مدرس (بیش از ۳۰ سال تجربه تدریس دستور زبان انگلیسی) برای تولید گزینه‌ها استفاده کرد. سپس این شش مرحله انجام شد: ۱) ویژگی دستوری هدف در سؤال به همراه کد خطا تعیین شد؛ ۲) از صورت صحیح "Say" به عنوان کلید سؤال استفاده شد؛ ۳) از آن صورت دستوری که در قسمت "Don't Say" آمده بود، به عنوان یکی از گزینه‌های انحرافی استفاده شد؛ ۴) گزینه‌های انحرافی دیگر با رعایت موضوع سؤال و ارتباط منطقی گزینه انحرافی با سؤال تولید شد؛ ۵) گزینه‌های هر سؤال برای صحت ارتباط و نیز منحصر به فرد بودن گزینه درست (وجود تنها یک پاسخ صحیح) بررسی شد و سرانجام ۶) گزینه پاسخ صحیح در سؤال‌های مختلف جابجا شد تا گزینه درست قابل پیش‌بینی نباشد. در پایان در آن دسته از سؤالات که هدف صرفاً قدرت تمیز دو واژه نزدیک به هم مطرح بود (مانند lay/lie یا raise/rise) قالب دوگزینه‌ای حفظ شد و گزینه‌های سوم و چهارم اضافه نشد تا تمرکز بر قدرت تشخیص واژه‌های نزدیک به هم حفظ شود. همچنین لازم به ذکر است که تمامی گزینه‌های هر سؤال توسط خود محقق ساخته و بازبینی شد و چون برای این آزمون از داوری مستقل چند خبره استفاده نشده، این آزمون را باید صرفاً یک منبع آموزشی ساخت‌یافته تلقی کرد که در صورت استفاده در آزمون‌های دیگر نیاز به اعتبارسنجی دارد.

مرور پیشینه حاضر نشان می‌دهد کهبا وجود مطالعات بسیار در حوزه تحلیل خطا، پژوهش‌هایی که به ایجاد منابع آموزشی خطامحور و در قالبی ماشین‌خوان انگلیسی-فارسی پرداخته باشند محدود بوده و محقق از آنها بی‌اطلاع است. در بخش پیکره‌ای این پژوهش هم علاوه بر ساخت پیکره، محقق کوشیده تا در خصوص منطق برچسب‌دهی و طراحی گزینه‌های انحرافی نیز توضیحاتی را ارائه کند تا از این طریق بتواند یک منبع حاوی سؤال و خطامحور را به یک پیکره آموزشی ماشین‌خوان و پیکره موازی تبدیل کند.

اهداف و سؤالات پژوهش

هدف اصلی در پژوهش حاضر آن بوده تا فرایند ساخت و مستندسازی یک منبع ماشین‌خوان از خطاهای دستوری را برای کاربردهای آموزشی تشریح کند. بر این اساس، سؤالات زیر مطرح شد:

1) **فرایند تبدیل مدخل‌های یک منبع آموزشی خطامحور به رکوردهای ماشین‌خوان دارای جملات صحیح دستوری، سؤال، گزینه‌ها، کلید و برچسب‌های خطا به چه صورت است؟**
2) **فرایند مستندسازی گزینه‌های انحرافی در سؤالات آزمون به چه صورت است؟**
3) **ساختار پیکره دستوری تولید شده (حاوی پنج بخش و بیست زیربخش) به چه صورت است؟**
4) **فرایند تولید یک پیکره موازی از جملات انگلیسی منبع آموزشی مورد استفاده و ترجمه این جملات به فارسی به چه صورت است؟**
5) **پیاده‌سازی آزمایشی آزمون ۱۰۹ سؤاله در این پژوهش در میاندانشجویان دانشگاه شیراز، آزاد اسلامی واحد شیراز و مؤسسه آموزش عالی زند شیراز از نظر امکان اجرا و زمان پاسخگویی چه ویژگی‌هایی داشته است؟**

روش پژوهش

این پژوهش را می‌توان در دسته پژوهش‌های مرتبط با توسعه یک منبع آموزشی دسته‌بندی کرد. محصول این پژوهش یک پیکره آموزشی ماشین خوان از خطاهای دستوری دانشجویان زبان انگلیسی سه دانشگاه در شهر شیراز و نیز یک پیکره موازی انگلیسی-فارسی از جملات صحیح انگلیسی و ترجمه آنها به فارسی بوده است. ضمناً اطلاعات خام این پیکره از کتاب خطاهای رایج در زبان انگلیسی گرفته شده است و بنابراین از داده‌های طبیعی استفاده نشده است. از این رو نباید اطلاعات آماری و بسامدی گزارش شده در این پژوهش را منعکس کننده حقایق طبیعی زبانی ارزیابی کنیم. در حقیقت، اطلاعات و آمار بسامدی صرفاً نشان‌دهنده محتوای یک کتاب است که

می تواند با اطلاعات کتاب‌های دیگر در این زمینه متفاوت باشد. همچنین به دلیل استفاده از آزمودنی‌های در دسترس، نتایج گزارش شده در این پژوهش الزاماً قابل تعمیم به کل جامعه آماری دانشجویان زبان انگلیسی در کشور نیست.

منبع استخراج داده‌ها

داده‌ها از چاپ هفتم کتاب Common Mistakes in English تألیف فیتیکیدز استخراج شد. این کتاب حاوی ۵۸۴ مدخل بود که با احتساب زیرمدخل‌ها و مدخل‌های دارای بیش از یک نکته، در نهایت ۶۵۸ جمله به‌دست آمد. نکته‌های متعدد در برخی مدخل‌ها با پسوند a، b، c و نظیر آن از هم متمایز شدند. برای هر رکورد، اطلاعاتی نظیر شناسه، جمله صحیح انگلیسی، ترجمه هر جمله انگلیسی به فارسی، سؤال مستخرج از هر جمله (صورت سؤال)، تعداد گزینه‌ها، کلید پاسخ، گزینه‌ها و برچسب کلی و جزئی خطا ثبت شد. خطاها در ۵ بخش اصلی و ۲۰ زیربخش تنظیم شدند.

در این کتاب هر مدخل بخش معرفی نکته دستوری، نمونه نادرست (که با عبارت انگلیسی "Don't Say" مشخص می‌شود)، نمونه صحیح (که با عبارت انگلیسی "Say" مشخص می‌شود) و در برخی مدخل‌ها توضیح تکمیلی "Notes" را شامل می‌شود. از جملات صحیح انگلیسی به عنوان داده برای تکمیل ستون جمله انگلیسی در پیکره و نیز استخراج کلید (گزینه صحیح) استفاده شد. برای مثال مدخل مربوط به حرف اضافه، تقابل "Don't Say: She accused the man for stealing." و "She accused the man of stealing." موضوع دستوری هدف (تقابل for با of) را مشخص می‌سازد.

ساختار داده و فرایند برچسب‌دهی

ساختار فیلدهای پیکره آموزشی ماشین‌خوان در جدول زیر آمده است.

جدول ۱. توضیح ساختار فیلدهای موجود در پیکره آموزشی ماشین‌خوان

ستون	نام فیلد	محتوا
A	شناسه	شماره یکتا برای هر جمله یا سؤال. ضمناً شماره یکتا در مدخل‌های حاوی نکات متعدد با پسون حروف انگلیسی همراه می‌شود مانند 2a, 2b, …
B	ترجمه فارسی	ترجمه فارسی ابتدا توسط ماشین ترجمه گوگل تولید می‌شود و سپس محقق به عنوان یک متخصص زبان برای رفع خطاهای دستوری، املایی و ... ترجمه هر جمله را بازبینی می‌کند.
C	جمله انگلیسی	صورت صحیح استخراج شده از بخش "Say" کتاب
D	صورت سؤال	جمله حاوی سؤال یا جای خالی مانند "Which sentence is correct?"
E	تعداد گزینه‌ها	۲ یا ۴ گزینه متناسب با موضوع هدف در سؤال‌های مختلف
F	کلید پاسخ	شماره گزینه صحیح
G-J	گزینه‌ها	گزینه‌های ۱ تا ۴ و در سؤال‌های دوگزینه‌ای، گزینه‌های ۱ و ۲
K	برچسب کلی خطا	کد یکی از پنج بخش اصلی خطا
L	برچسب جزئی خطا	کد یکی از زیربخش‌های خطا

در این پژوهش فرایند برچسب‌دهی بر اساس پنج بخش اصلی کتاب Common Mistakes in English انجام شد. پنج بخش موضوعی این کتاب عبارت بودند از: ۱) استفاده از صورت‌های نادرست، ۲) حذف نادرست، ۳) واژگان حشو، ۴) به کار گیری واژه در موقعیت دستوری نامناسب و ۵) خطا در استفاده از واژه‌های مشابه. برای این پنج بخش اصلی بیست زیربخش نیز تعریف شد. به بخش‌های

اصلی کدهای ۱۰، ۲۰، ۳۰، ۴۰ و ۵۰ تعلق گرفت و برای زیربخش‌ها اعدادی مانند ۱۱، ۲۵، ۳۴ و ... درنظر گرفته شد. برای نمونه عدد ۲۵ نشان می‌دهد که خطا مربوط به بخش اصلی ۲ و زیربخش ۵ بوده است. تنها در یک مورد (در زیربخش مربوط به استفاده نادرست از مصدر با to پنج بخش فرعی ذیل این زیربخش وجود داشت که با اعداد ۱۲۱ تا ۱۲۵ نام‌گذاری شدند. برای نمونه عدد ۱۲۱ نشان می دهد که خطا مربوط به بخش اصلی ۱ و زیربخش ۲ و در آنجا زیربخش ۵ از زیربخش ۲ بوده است.

پروتکل تولید سؤال و گزینه‌های انحرافی

برای تولید سؤال و گزینه‌های انحرافی مراحل زیر طی شد: ۱) تعیین یک نکته دستوری و کد خطای متناظر آن به عنوان یک سازه هدف، ۲) تعیین کلید (پاسخ صحیح). این مورد از قسمت "Say" در کتاب گرفته شد، ۳) تولید صورت سؤال. برای تولید سؤال در بیشتر موارد موضوع سؤال از جمله حذف و به جای آن نقطه‌چین گذاشته شد. همچنین در برخی موارد صورت سؤال به شکل "Which sentence is correct?" تولید گردید که دلیل این امر ماهیت و ساختار متفاوت این نوع از سؤال‌ها بود، ۴) تولید گزینه انحرافی اصلی. این گزینه از بخش "Don't Say" کتاب گرفته شد. لازم به ذکر است این گزینه ترکیبی است که زبان‌آموزان به احتمال زیاد آن را به‌جای گزینه صحیح برمی‌گزینند، ۵) تولید گزینه انحرافی فرعی. علاوه بر گزینه درست و گزینه انحرافی اصلی دو گزینه دیگر نیز برای سؤال چهارگزینه‌ای مورد نیاز است. این موارد بر اساس تجربه ۳۰ ساله محقق در تدریس دستور زبان انگلیسی و با استفاده از گزینه‌های خطای محتمل تولید شد. به عبارت شفاف‌تر این گزینه‌ها در حوزه پاسخ صحیح و مرتبط با آن تولید شدند، ۶) وارسی مجدد سؤالات برای اطمینان از تک‌کلیدی بودن سؤالات و یکسان نبودن گزینه صحیح در سؤالات مختلف. در این قسمت محقق به بررسی مجدد تمام گزینه‌ها پرداخت تا اولاً اطمینان یابد که برای هر سؤال بیش از یک پاسخ صحیح وجود ندارد و ثانیاً کلید همه سؤالات یکسان نباشد و اگر چنین بود محقق جای گزینه‌ها را به شکلی تغییر داد تا کلید سؤالات مختلف متفاوت باشد و الگو یا نظمی که زبان‌آموز را به سمت پاسخ هدایت کند، وجود نداشته باشد. البته لازم به ذکر است که چون گزینه‌ها توسط محقق انتخاب شده است، روایی محتوایی برای آزمون محاسبه نشده است که این نکته به‌عنوان یکی از محدودیت‌های پژوهش گزارش شده است.

تولید آزمون ۱۰۹ سؤالی

در این پژوهش با بهره‌گیری از ۶۵۸ سؤال، و با استفاده از روش نمونه‌گیری تصادفی چندمرحله‌ای یک آزمون حاوی ۱۰۹ سؤال ساخته شد. علت استفاده از این روش نمونه‌گیری آن بوده است که در کتاب پنج بخش اصلی و بیست زیربخش وجود داشت و به دلیل تفاوت این بخش‌ها و همچنین تفاوت در حجم سؤالات هر بخش، استفاده از روش نمونه‌گیری تصادفی چندمرحله‌ای روشی مناسب محسوب می‌شد. در این آزمون از نظر گزینه‌ها دو دسته سؤال وجود داشت. دسته اول سؤالات چهارگزینه‌ای بودند که اتفاقاً بیشترین تعداد سؤالات آزمون را تشکیل می‌دادند. این سؤالات عبارت بودند از: سؤالات ۱ تا ۶۸، ۸۳ تا ۹۱ و ۱۰۴ تا ۱۰۹. دسته دوم سؤالات دوگزینه‌ای بودند. تعداد این دسته از سؤالات کمتر بود و سؤال‌های ۶۹ تا ۸۲ و ۹۲ تا ۱۰۳ را تشکیل می‌دادند.ضمناً نحوه نمره‌دهی به برگه‌های زبان‌آموزان بدیت صورت بود که به ازای هر پاسخ صحیح نمره یک درنظر گرفته شد. به هر پاسخ اشتباه هم نمره صفر تعلق گرفت. با توجه به وجود ۱۰۹ سؤال، حداقل و حداکثر نمره قابل اخذ صفر تا ۱۰۹ بود. در جدول شماره ۲ تعداد سؤالات موجود در هر زیربخش از سؤالات به همراه کد شناسایی هر زیربخش آورده شده است.

جدول ۲. توزیع سؤالات آزمون ۱۰۹ سؤالی در ۲۰ زیربخش

کد سؤال	عنوان زیربخش	تعداد سؤال
۱-۱	استفاده از حرف اضافه نادرست	۱۳
۱-۲	استفاده نادرست از مصدر با to	۵
۱-۳	استفاده نادرست از زمان فعل	۵
۱-۴	مثال‌های متفرقه بخش ۱	۹
۱-۵	عبارات نامعتبر در انگلیسی	۶

۲-۱	حذف حرف اضافه	۳
۲-۲	مثال‌های متفرقه بخش ۲	۷
۳-۱	حرف اضافه زائد	۳
۳-۲	حرف تعریف زائد	۳
۳-۳	مصدر با to غیرضروری	۲
۳-۴	مثال‌های متفرقه بخش ۳	۴
۴-۱	موقعیت نامناسب قید	۱
۴-۲	مثال‌های متفرقه بخش ۴	۳
۵-۱	به‌جای‌هم‌گرفتن حروف اضافه	۴
۵-۲	به‌جای‌هم‌گرفتن افعال	۱۵
۵-۳	به‌جای‌هم‌گرفتن قیود	۲
۵-۴	به‌جای‌هم‌گرفتن صفات	۶
۵-۵	به‌جای‌هم‌گرفتن اسامی	۵
۵-۶	عدم رعایت مطابقت عددی	۷
۵-۷	استفاده از مقوله نحوی/گفتاری نادرست	۶

روش انتخاب زبان‌آموزان

برای اجرای آزمون ابتدا نیاز بود تا زبان‌آموزان انتخاب شوند. برای این کار از روش نمونه‌گیری در دسترس استفاده شده و در مجموع ۱۲۰ دانشجوی سال سوم و چهارم رشته‌های زبان انگلیسی از دانشگاه شیراز، دانشگاه آزاد اسلامی واحد شیراز و مؤسسه آموزش عالی غیرانتفاعی غیردولتی زند شیراز انتخاب شدند. از سه دانشگاه تعداد برابر از زبان‌آموزان انتخاب شدند (۴۰ زبان‌آموز از هر دانشگاه). علت انتخاب دانشجویان سال سوم و چهارم این بوده که تصور می‌رفت این دانشجویان تمامی درس‌های پایه دستوری را گذرانده باشند و در مرحله مشابهی از برنامه دوره کارشناسی قرار داشته باشند. این نکته ارزیابی بهتری از عملکرد دستوری زبان‌آموزان فراهم می‌کرد. همچنین ذکر این نکته ضروری است که افرادی که مایل به شرکت در آزمون نبودند از جریان پژوهش حذف شدند. محدوده سنی زبان‌آموزان بین ۲۱ تا ۲۴ سال بود و معدل دانشجویان نیز بین ۱۷ تا ۱۸,۷۸ متغیر بود.

با این حال باید توجه داشت که به دلیل نوع روش نمونه‌گیری (نمونه‌های در دسترس) یافته‌های پژوهش حاضر الزاماً قابل تعمیم به کل زبان‌آموزان رشته‌های زبان انگلیسی در کشور نیست و از این رو محقق ادعایی درباره تعمیم یافته‌ها به کل جامعه آماری پژوهش در کشور ندارد. بلکه برعکس نتایج بدست آمده عملکرد نمونه‌های مورد بررسی را منعکس می کند.

نحوه اجرای آزمون

برای این آزمون زبان‌آموزان هر دانشگاه در یک زمان معین (هفته سوم آبان ۱۴۰۴) در یک کلاس جمع شدند و آزمون ۱۰۹ سؤالی بین آنها توزیع شد. با توجه به تعداد سؤالات، زمان آزمون برای زبان‌آموزان ۸۵ دقیقه تعیین شد. با این حال چنانچه زبان‌آموزی به زمان بیشتری نیاز داشت، زمان در اختیار او قرار گرفت تا بتواند به همه سؤالات پاسخ بدهد و به عبارتی عدم ارائه پاسخ به دلیل کمبود زمان نبوده باشد. تنها یکی از زبان‌آموزان تقاضای زمان بیشتری داشت که به او این زمان داده شد و باقی زبان‌آموزان بین ۵۰ تا ۷۰ دقیقه آزمون را کامل کرده و برگه‌های خود را تحویل دادند. در فرایند تصحیح برگه‌ها نیز به هر پاسخ درست نمره ۱ و به هر پاسخ خطا نمره صفر تعلق گرفت.

مرحله تولید پیکره موازی انگلیسی-فارسی

همانگونه که در قسمت‌های قبل توضیح داده شد، از کتاب Commom Mistakes in English در مجموع ۶۵۸ جمله حاوی نکات دستوری مختلف استخراج شده بود. برای تولید پیکره موازی به صورت زیر عمل شد. ابتدا هر یک از این جملات انگلیسی به ماشین ترجمه گوگل داده شد تا به فارسی ترجمه شود. سپس، محقق ترجمه‌ها را از نظر دستوری، املایی، واژگانی و ... بازبینی کرد و اشکالات احتمالی را مرتفع نمود. بنابراین داده‌های فارسی (۶۵۸ جمله فارسی) را نباید به عنوان داده‌ای خام و صرفاً ماشینی تلقی کرد بلکه باید آن را ترجمه ماشینیِ بازبینی شده توسط محقق قلمداد نمود. در مرحله بعد، به هر جمله انگلیسی و ترجمه فارسی یک شناسه واحد تخصیص داده شد تا هم‌ترازی آنها در سطح جمله حفظ شده و بتوان از این ساختار هم‌تراز ماشین‌خوان در حوزه‌های مختلفی نظیر بازیابی اطلاعات بین‌زبانی، ترجمه ماشینی و نظیر آن استفاده کرد.

نتایج پژوهش

در این قسمت یافته‌های پژوهش تشریح می‌شود:

محصول اول پژوهش حاضر یک پیکره آموزشی با ۶۵۸ رکورد است. از این تعداد رکورد اطلاعاتی، ۵۰۳ مورد (۷۶,۴ درصد) چهار گزینه‌ای و ۱۵۵ مورد (۲۳,۶ درصد) دو گزینه‌ای بودند. ضمناً هر رکورد اطلاعاتی موارد زیر را شامل می‌شد: جمله صحیح به انگلیسی، سوال انگلیسی مستخرج از جمله انگلیسی، کلید سؤال، گزینه‌های انحرافی و برچسب‌های کلی و جزئی خطا. از این منظر، داده‌های پیکره بر اساس نوع خطا، شناسه و نوع سؤال (دو یا چهار گزینه‌ای) قابل بازیابی خواهد بود. جدول ۳ توزیع رکوردهای پیکره آموزشی تولید شده را بر اساس پنج بخش اصلی کتاب نشان می‌دهد.

جدول ۳. توزیع رکوردهای پیکره آموزشی تولید شده بر اساس پنج بخش اصلی کتاب

بخش	عنوان بخش	تعداد و درصد
۱	استفاده از صورت‌های نادرست	۲۳۳ (۳۵,۴ درصد)
۲	حذف نادرست	۶۱ (۹,۲ درصد)
۳	واژگان حشو	۶۹ (۱۰,۵ درصد)
۴	موقعیت دستوری نامناسب	۲۶ (۴ درصد)
۵	به‌جای‌هم‌گرفتن واژه‌های مشابه	۲۶۹ (۴۰,۹ درصد)

همانگونه که در جدول بالا نشان داده شده است، در این پیکره بیشترین سهم به جملات بخش ۵ (به‌جای‌هم‌گرفتن واژه‌های مشابه) داده شده است. پس از آن بخش‌های ۱ (استفاده از صورت‌های نادرست) و ۳ (واژگان حشو) در جایگاه دوم و سوم قرار می‌گیرند. البته باید توجه داشته باشیم که این نوع توزیع کاملاً به نظر نویسنده کتاب وابسته بوده و نمی‌توان بر اساس آن تعداد و فراوانی واقعی خطاها را در میان زبان‌آموزان در جامعه آماری مشخص کرد. در جدول ۴ توزیع رکوردهای پیکره آموزشی تولید شده بر اساس ۲۰ زیربخش کتاب نشان داده شده است.

جدول ۴. توزیع رکوردهای پیکره آموزشی تولید شده بر اساس بیست زیربخش کتاب

کد سؤال	عنوان زیربخش	تعداد/درصد سؤال
۱-۱	استفاده از حرف اضافه نادرست	۷۶ (۱۱,۶ درصد)
۱-۲	استفاده نادرست از مصدر با to	۳۱ (۴,۷ درصد)
۱-۳	استفاده نادرست از زمان فعل	۳۴ (۵,۲ درصد)
۱-۴	مثال‌های متفرقه بخش ۱	۵۵ (۸,۴ درصد)
۱-۵	عبارات نامعتبر در انگلیسی	۳۷ (۵,۶ درصد)

۱-۲	حذف حرف اضافه	۱۹ (۲,۹ درصد)
۲-۲	مثال‌های متفرقه بخش ۲	۴۲ (۶,۴ درصد)
۱-۳	حرف اضافه زائد	۱۷ (۲,۶ درصد)
۲-۳	حرف تعریف زائد	۲۰ (۳ درصد)
۳-۳	مصدر با to غیرضروری	۱۱ (۱,۷ درصد)
۴-۳	مثال‌های متفرقه بخش ۳	۲۱ (۳,۲ درصد)
۱-۴	موقعیت نامناسب قید	۷ (۱,۱ درصد)
۲-۴	مثال‌های متفرقه بخش ۴	۱۹ (۲,۹ درصد)
۱-۵	به‌جای‌هم‌گرفتن حروف اضافه	۲۵ (۳,۸ درصد)
۲-۵	به‌جای‌هم‌گرفتن افعال	۸۷ (۱۳,۲ درصد)
۳-۵	به‌جای‌هم‌گرفتن قیود	۱۴ (۲,۱ درصد)
۴-۵	به‌جای‌هم‌گرفتن صفات	۳۵ (۵,۳ درصد)
۵-۵	به‌جای‌هم‌گرفتن اسامی	۳۲ (۴,۹ درصد)
۶-۵	عدم رعایت مطابقت عددی	۴۳ (۶,۵ درصد)
۷-۵	استفاده از مقوله نحوی/گفتاری نادرست	۳۳ (۵ درصد)

همانگونه که در جدول بالا مشاهده می‌شود، از میان کل زیربخش‌های کتاب، زیربخش‌های « به‌جای‌هم‌گرفتن افعال»، «استفاده از حرف اضافه نادرست» و «مثال‌های متفرقه بخش ۱» به ترتیب با فراوانی ۸۷ (۱۳,۲ درصد)، ۷۶ (۱۱,۶ درصد) و ۵۵ (۸,۴ درصد) بیشترین تعداد از رکوردهای اطلاعاتی پیکره آموزشی تولید شده را به خود اختصاص داده‌اند.

محصول دوم پژوهش حاضر پیکره موازی تولید شده است. این پیکره موازی از ۶۵۸ جمله انگلیسی و برابرنهاده آن (بر اساس ترجمه ماشینی گوگل و بازبینی محقق) به زبان فارسی می‌باشد. هر جفت جمله (انگلیسی و معادل آن به فارسی) با یک شناسه واحد ثبت شده‌اند که می‌توان آن را به رکورد آموزشی اصلی شامل سؤالات و گزینه‌های مربوط به آن ربط داد. مزیت این کار آن است که چنانچه محقق یا کاربر نیاز داشته باشد می‌تواند یا صرفاً از اطلاعات پیکره موازی (جمله انگلیسی و معادل فارسی آن) استفاده کند یا از این اطلاعات در پیوند با اطلاعات دیگر موجود در پیکره نظیر نوع خطا و ... نیز بهره‌مند شود.

اجرای آزمایشی آزمون ۱۰۹ سؤالی

در مرحله اجرا، هر ۱۲۰ نفر به تمامی ۱۰۹ سؤال پاسخ گفتند. از نظر زمانی بالاترین زمان مصرف شده توسط زبان‌آموزان برای تمام کردن آزمون ۸۵ دقیقه بود (فقط یک نفر) و باقی برگه‌ها در زمانی بین ۵۰ تا ۷۰ دقیقه توسط زبان‌آموزان تکمیل شده و به محقق تحویل داده شدند. در این پژوهش تعیین دشواری سؤال از اهداف پژوهش نبوده و از این رو آزمون مورد استفاده به عنوان یک مجموعه داده برای مدرسان قابل استفاده است که می‌توانند با توزیع آن در میان زبان‌آموزان خود نسبت به بررسی معیارهایی چون دشواری سؤالات مطالعه نمایند.

بحث و نتیجه‌گیری

در این پژوهش، پیوند میان سه حوزه تحلیل خطا، زبان‌شناسی پیکره‌ای و تحلیل مقابله‌ای کاربردی ترسیم شد. در حقیقت عنوان شد که مبحث تحلیل خطا انحرافات تولیدی زبانی زبان‌آموزان را به تصویر می‌کشد. از طرفی زبان‌شناسی پیکره‌ای با ملزوماتی نظیر ثبت استاندارد رکوردهای اطلاعاتی و نیز برچسب‌دهی به عناصر زبانی، امکان بازیابی داده‌ها را به شکلی آسان فراهم آورد. در نهایت تحلیل

مقابله‌ای کاربردی می‌کوشد تا از طریق مقایسه و مقابله داده‌های زبانی در دو یا چند زبان، زمینه استفاده آنها را در محیط‌های آموزشی فراهم آورد.

نکته دیگر به ماهیت داده‌های موجود در پیکره آموزشی ماشین خوان تولید شده از خطاهای دستوری دانشجویان زبان انگلیسی سه دانشگاه در شهر شیراز مربوط می‌شود که مهم‌ترین دستاورد پژوهش حاضر نیز بوده است. در حقیقت، داده‌های دستوری مورد استفاده در این پژوهش از داده‌های طبیعی تولید شده توسط زبان‌آموزان استخراج نگردیده و از این رو پیکره تولید شده را باید یک پیکره آموزشیِ ساخته شده از الگوهای خطا به حساب آوریم آن هم الگوهایی که توسط نویسنده کتاب به مخاطب منعکس گردیده است [6, 7]. از این رو پیکره تولید شده برای طراحی آزمون توسط آموزگاران، اجرای تمرین‌های زبانی و نیز مطالعات روش‌شناختی مناسب است و نباید آن را منعکس کننده داده‌های واقعی زبان طبیعی به حساب آوریم.

نکته بعدی به پروتکل تولید سؤال و گزینه‌های انحرافی مربوط می‌شود. در حقیقت از طریق این پروتکل ۶ مرحله‌ای فرایند تولید سؤال و گزینه‌ها به انجام رسید. البته با توجه به اینکه درجه سختی و نیز روایی سؤالات محاسبه نگردیده نباید آن را دارای روایی مفهومی قلمداد کنیم بلکه باید صرفاً به آن به عنوان مخزنی از سؤالات دستوری نگریسته شود که بر اساس چارچوب فکری نویسنده کتاب منبع ساختاربندی شده است. در گرینه‌های سؤالات نیز گزینه انحرافی گرفته شده از بخش "Don't Say" از اهمیت بسیاری برخوردار است چرا که نویسنده کتاب آن را بر اساس خطاهای رایجی تنظیم کرده که در جامعه زبان‌آموزان خود با آن مواجه بوده است.

نکته دیگر به پیکره موازی تولید شده در این پژوهش باز می‌گردد که یکی از دستاوردهای اصلی این پژوهش بوده است. این نوع از پیکره‌ها در حوزه‌های مختلفی از جمله بازیابی اطلاعات بین زبانی کاربد بسیاری دارند. در این پژوهش، همترازی در سطح جمله تنظیم شد و به هر جفت جمله شناسه‌ای واحد تعلق گرفت تا در صورت لزوم بتوان این لایه را به بخش‌های پیکره اول تولید شده از ۶۵۸ جمله وصل کرد یا صرفاً و بسته به نیاز از هم‌ترازی جملات فارسی و انگلیسی استفاده کرد.

در نهایت اجرای آزمایشی آزمون بر روی دانشجویان سه دانشگاه در شیراز نشان داد که این آزمون از نظر اجرایی دارای قابلیت است. با این همه نوع نمونه‌گیری از زبان‌آموزان، عدم نمونه‌گیری از نقاط مختلف کشور و همچنین عدم همگون‌سازی کامل زبان‌آموزان سبب می‌گردد تا نتوانیم نتایج به دست آمده در این پژوهش را لزوماً به جامعه آماری زبان‌آموزان کشور ایران تعمیم دهیم.

کاربردها، محدودیت‌ها و جمع‌بندی

از یافته‌های پژوهش حاضر می‌توان در حوزه‌های مختلفی استفاده کرد که در ادامه به چند مورد از آنها اشاره می‌شود و سپس به بیان محدودیت‌های پژوهش پرداخته خواهد شد.

آموزگاران و مدرسان زبان می‌توانند از پیکره تولید شده برای تولید تمرین برای زبان‌آموزان استفاده نمایند. همچنین از این پیکره می‌توان برای طراحی و تولید آزمون استفاده کرد. البته برای ارزیابی‌های غیر تمرینی و جدی لازم خواهد بود که اعتبارسنجی محتوایی آزمون نیز به انجام برسد. کاربرد دیگر پیکره تولید شده آن است که می‌توان از آن برای بررسی و تحلیل خطاها استفاده کرد، هرچند منظور اینجا نوع خطا است و نه ریشه آن چرا که مورد اخیر جزء اهداف محقق حاضر نبوده است. در پایان می‌توان از پیکره موازی تولید شده نیز در آموزش ترجمه و مباحث بازیابی اطلاعات بین‌زبانی بهره‌برداری کرد.

با وجود دستاوردهای پژوهش حاضر، محدودیت‌هایی نیز وجود داشته است که باید مورد توجه قرار بگیرد. برای نمونه، نوع خطاها و فراوانی‌های گزارش شده تا حد زیادی تحت تأثیر محتوای منبع اصلی نکات دستوری بوده و نه موارد برگرفته از زبان طبیعی و بنابراین نباید این پیکره را یک پیکره زبان‌آموز شمرد، بلکه باید آن را صرفاً یک پیکره آموزشی به حساب آورد. روش نمونه گیری زبان‌آموزان نیز روش نمونه‌های در دسترس بوده که تعمیم نتایج به کل جامعه زبان‌آموزان کشور را ممکن نمی‌سازد.

فهرست منابع

[1] Corder, S. P. (1967). The significance of learners' errors. International Review of Applied Linguistics in Language Teaching, 5(4), 161–170.

[2] James, C. (1998). *Errors in language learning and use: Exploring error analysis*. New York: Longman.

[3] Keshavarz, M. H. (2010). *Contrastive analysis and error analysis*. Tehran: Rahnama.

[4] یارمحمدی، ل. ا. و رشیدی، ن. (۱۳۹۴). *زبان‌شناسی مقابله‌ای کاربردی در زبان انگلیسی و فارسی با تأکید بر دستور*. تهران: انتشارات راهنما.

[5] McEnery, T., & Hardie, A. (2012). *Corpus linguistics, method, theory and practice*. UK: Cambridge University Press.

[6] Callies, M. (2015). Learner corpus methodology. In S. Granger, G. Gilquin, & F. Meunier (Eds.), The Cambridge handbook of learner corpus research (pp. 35–56). Cambridge University Press. https://doi.org/10.1017/CBO9781139649414.003

[7] Granger, S., Gilquin, G., & Meunier, F. (Eds.). (2015). The Cambridge handbook of learner corpus research. Cambridge University Press. https://doi.org/10.1017/CBO9781139649414

[8] فیتیکیدز، ت. ج. (۱۳۷۰). *خطاهای رایج در انگلیسی*. تهران: انتشارات راهنما.

[9] Lennon, P. (1991). Error: Some problems of definition, identification and distinction. *Applied Linguistics*, *12*(2), 180-196.

[10] Botley, S. P. (2015). Errors versus mistakes: A false dichotomy? *Malaysian Journal of ELT Research*, *11*(1), 81-94.

[11] Ellis, R. & Burkhuizen, G. (2005). *Analysing learner language*. Oxford: Oxford University Press.

[12] Bussmann, H., Kazzazi, K., & Trauth, G. (1996). *Routledge dictionary of language and linguistics*. London: Routledge.

[13] Mala, M. (2020). Phraseology in learner academic English corpus-driven approaches. *Discourse and Interaction*, *13*(2), 75-88.

[14] Chen, X. (2024). Corpus-based study on language errors in English Writing. *International Journal of Education and Humanities*, *15*(2), 144-153. DOI: 10.54097/f2cmct16

[15] Gazioglu, M., & Salami, A. (2024). Identifying grammatical errors and mistakes via a written learner corpus in a foreign language context. *Journal of Language Research*, *8*(2), 91-106. https://doi.org/10.51726/jlr.1553484

[16] Amirsheibani, M. (2025). A corpus-based description of grammatical errors in Uzbek EFL learner writing. European *International Journal of Philological Sciences*, *5*(10), 65-70. https://doi.org/10.55640/eijps-05-10-14

[17] Lin, M., Zeng, M., Huang, W., Jiang, Sh., Xiao, L., & Yang, A. (2025). A simple yet effective corpus construction framework for Indonesian grammatical error correction. *ACM Transactions on Asian and Low-Resource Language Information Processing*, *24*(1), 1-15. https://doi.org/10.1145/3704264

[18] صفری، س.، عاصی، م. و صحرایی، ر. (۱۳۹۱). طراحی و ایجاد پیکره تولیدی زبان‌آموز فارسی (پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه علامه طباطبائی).

[19] براتعلی‌پور، خ.، فیلی، ه. و شاکری، آ. (۱۳۹۱). تولید یک پیکره موازی فارسی-انگلیسی با استفاده از دادگان استخراج شده از وب (پایان‌نامه کارشناسی‌ارشد، دانشگاه تهران، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشکده علوم مهندسی).

[20] کشتکار، ح.، موسوی میانگاه، ط. و غیاثیان، م. (۱۳۹۱). ساخت پیکره دوزبانه موازی انگلیسی-فارسی و کاربرد آن در سامانه حافظه ترجمه (مبحثی در زبانشناسی پیکره‌ای) (پایان‌نامه کارشناسی‌ارشد، دانشگاه پیام نور استان تهران، مرکز پیام نور تهران).

[21] آذربنیاد، ح.، شاکری، آ. و فیلی، ه. (۱۳۹۲). بازیابی اطلاعات بین‌زبانی فارسی-انگلیسی با استفاده از پیکره‌های موازی (پایان‌نامه کارشناسی‌ارشد، دانشگاه تهران، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشکده علوم مهندسی).

[22] هاشمی، آ.، فیلی، ه. و شاکری، آ. (۱۳۹۴). ابهام‌زدایی معنایی کلمات با استفاده از پیکره‌های موازی (پایان‌نامه کارشناسی‌ارشد، دانشگاه تهران، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشکده علوم مهندسی).

[23] Haladyna, T. M., Downing, S. M., & Rodriguez, M. C. (2002). A review of multiple-choice item-writing guidelines for classroom assessment. Applied Measurement in Education, 15(3), 309–333. https://doi.org/10.1207/S15324818AME1503_5

20.1001.1.23223723.1405.13.2.5.6 KNO-1302-5205

بررسی تأثیر فناوری wDR در دوربین‌های مداربسته بر تشخیص چهره در شرایط نور پس‌زمینه شدید

شهاب ترکی ، مهندسی کامپیوتر

دانشگاه ملی مهارت شهرکرد

ایمیل :shahab.torki1383@gmail.com

مصطفی عبدالهیان دهکردی ، گروه مهندسی برق و کامپیوتر

دانشگاه ملی مهارت ، تهران ،ایران

ایمیل :Mdehkordi@tvu.ac.ir

چکیده

استفاده از دوربین‌های مداربسته به‌شکل گسترده‌ای در محیط‌های مختلف افزایش یافته است. این دوربین‌ها در مکان‌هایی مانند بانک‌ها، فروشگاه‌ها، فرودگاه‌ها، مدارس، ادارات، پارکینگ‌ها و معابر شهری مورد استفاده قرار می‌گیرند. هدف اصلی از به‌کارگیری این سیستم‌ها، افزایش امنیت، ثبت وقایع و کمک به شناسایی افراد یا رخدادهای مشکوک است.امروزه دوربین‌های مداربسته نقش مهمی در حفظ امنیت، کنترل تردد و نظارت بر محیط‌های عمومی و خصوصی دارند. یکی از کاربردهای مهم این دوربین‌ها، استفاده در سیستم‌های تشخیص چهره است. با این حال، کیفیت تصویر ثبت‌شده توسط دوربین تأثیر مستقیمی بر دقت تشخیص چهره دارد.

یکی از مشکلات رایج در تصویربرداری نظارتی، وجود نور پس‌زمینه شدید است؛ شرایطی که در آن منبع نور قوی در پشت سوژه قرار می‌گیرد و باعث تاریک شدن چهره فرد می‌شود. در چنین وضعیتی، الگوریتم‌های تشخیص چهره ممکن است نتوانند ویژگی‌های اصلی صورت را به‌درستی استخراج کنند.

فناوری wDR یا دامنه دینامیکی گسترده، یکی از راهکارهای مهم برای کاهش این مشکل است. این فناوری به دوربین کمک می‌کند تا جزئیات بخش‌های روشن و تاریک تصویر را به‌صورت هم‌زمان ثبت کند. در نتیجه، تصویر نهایی تعادل نوری بهتری دارد و چهره افراد در شرایط نوری دشوار، واضح‌تر دیده می‌شود.

هدف این مقاله، بررسی نقش فناوری wDR در بهبود کیفیت تصویر دوربین‌های مداربسته و تأثیر آن بر افزایش دقت سیستم‌های تشخیص چهره در شرایط نور پس‌زمینه شدید است.

کلید واژه :

امنیت نظارتی، پردازش تصویر، تشخیص چهره، دوربین مداربسته، wDR، نور پس‌زمینه.

مقدمه

در سال‌های اخیر، با پیشرفت فناوری، دوربین‌های مداربسته دیگر تنها ابزاری ساده برای ضبط تصویر نیستند؛ بلکه به بخشی جدایی‌ناپذیر از سیستم‌های هوشمند نظارتی تبدیل شده‌اند.

یکی از مهم‌ترین قابلیت‌هایی که در سال‌های اخیر در سیستم‌های نظارتی مورد توجه ویژه قرار گرفته، فناوری تشخیص چهره است. تشخیص چهره یکی از روش‌های بیومتریک برای شناسایی افراد است که بر اساس تحلیل ویژگی‌های ظاهری صورت عمل می‌کند.

این فناوری می‌تواند در حوزه‌های مختلفی نظیر کنترل تردد، حضور و غیاب هوشمند و مدیریت امنیت مکان‌های حساس، کاربرد مؤثری داشته باشد.

مزیت بارز تشخیص چهره نسبت به روش‌های سنتی‌تر مانند اثر انگشت، عدم نیاز به تماس مستقیم فرد با دستگاه است؛ چرا که فرآیند شناسایی به‌سادگی از طریق پردازش تصاویر ثبت‌شده توسط دوربین، صورت می‌پذیرد.

اهمیت تشخیص چهره در سیستم‌های نظارتی

تشخیص چهره یکی از شاخه‌های مهم فناوری‌های بیومتریک است. بیومتریک به روش‌هایی گفته می‌شود که بر اساس ویژگی‌های فیزیکی یا رفتاری انسان، هویت او را شناسایی می‌کنند. نمونه‌هایی از روش‌های بیومتریک شامل اثر انگشت، عنبیه چشم، صدا، امضا و چهره هستند. در میان این روش‌ها، تشخیص چهره به‌دلیل غیرتماسی بودن و امکان استفاده در فواصل نسبتاً دور، جایگاه ویژه‌ای در سیستم‌های نظارتی دارد.

در سیستم‌های امنیتی، تشخیص چهره می‌تواند به شناسایی دقیق افراد مجاز و غیرمجاز کمک کند. برای مثال، در ورودی یک سازمان، سیستم می‌تواند چهره افراد را با پایگاه داده کارکنان مقایسه کرده و بر این اساس مجوز ورود صادر کند یا هشدارهای امنیتی لازم را ارسال نماید. از نظر فنی، سیستم تشخیص چهره معمولاً شامل سه مرحله اصلی است: شناسایی چهره در تصویر، استخراج ویژگی‌های کلیدی صورت و مقایسه این ویژگی‌ها با داده‌های ذخیره‌شده. بدیهی است که هرچه کیفیت تصویر اولیه بالاتر باشد، احتمال موفقیت سیستم در تشخیص صحیح نیز بیشتر خواهد بود.

مطالعات مختلف نشان داده‌اند که تغییرات نوری، یکی از عوامل اصلی در کاهش دقت تشخیص چهره است. «ژائو» و همکارانش بیان می‌کنند که تغییرات روشنایی، تغییر زاویه چهره و حالت‌های مختلف صورت، از مهم‌ترین چالش‌های تشخیص چهره در محیط‌های واقعی هستند .

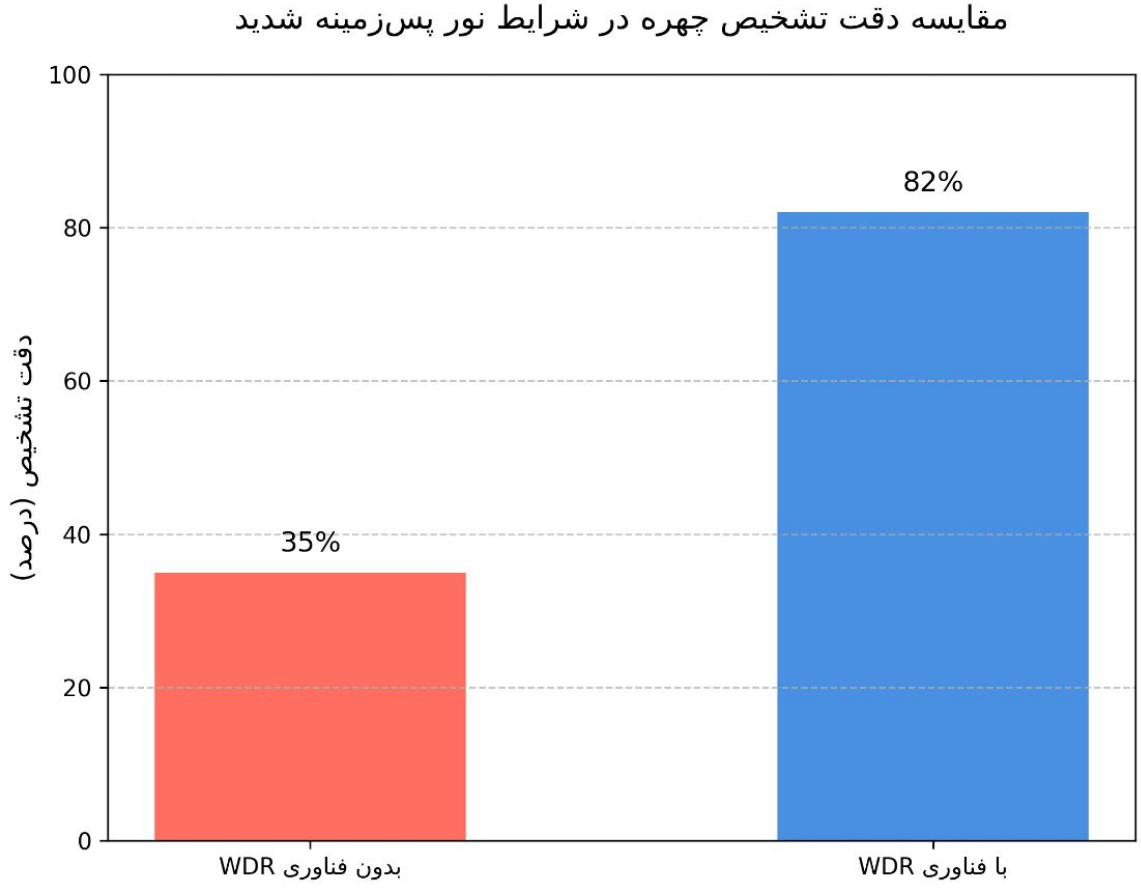
مشکل نور پس‌زمینه شدید در دوربین‌های مداربسته

پدیده نور پس‌زمینه شدید زمانی رخ می‌دهد که منبع نور قوی در پشت سوژه قرار گرفته باشد. در این حالت، دوربین برای تنظیم نور تصویر با چالشی جدی روبه‌رو می‌شود؛ چرا که بخشی از تصویر بسیار روشن و بخش دیگر بسیار تاریک خواهد بود. اگر دوربین نوردهی

Exposureرا بر اساس پس‌زمینه روشن تنظیم کند، سوژه در تاریکی فرو می‌رود و اگر نوردهی را بر اساس سوژه تنظیم نماید، پس‌زمینه دچار بیش‌تابی Overexposureشده و جزئیات خود را از دست می‌دهد.

این مشکل در محیط‌های واقعی بسیار رایج است؛ برای نمونه می‌توان به ورودی ساختمان‌ها، فروشگاه‌ها، پارکینگ‌ها و فضاهایی اشاره کرد که دارای پنجره‌های بزرگ هستند. در چنین شرایطی، معمولاً صورت فرد به‌صورت ضدنور Silhouetteدیده می‌شود و جزئیات چهره به‌طور کامل از دست می‌رود.

از دیدگاه پردازش تصویر، توزیع نامتعادل نور باعث کاهش کنتراست محلی و از بین رفتن اطلاعات حیاتی در تصویر می‌شود. گونزالس و وودز (۲۰۱۸) بیان می‌کنند که کیفیت تصویر و توزیع روشنایی، نقش تعیین‌کننده‌ای در دقتِ تحلیل‌های بعدی تصویر دارند



معرفی فناوری wDR

فناوری WDRمخفف Wide Dynamic Rangeبه‌معنای «دامنه دینامیکی گسترده» است. در صنعت تصویربرداری، دامنه دینامیکی به ظرفیت دوربین در ثبت هم‌زمان جزئیات در نواحی بسیار روشن و بسیار تاریک یک صحنه گفته می‌شود. به‌عبارتی، هرچه دامنه دینامیکی یک دوربین بالاتر باشد، آن سیستم در مدیریت اختلاف شدید نوری در یک محیط، عملکرد موفق‌تری خواهد داشت.

در دوربین‌های معمولی، هنگامی که اختلاف سطح نور در محیط زیاد باشد، بخشی از تصویر دچار بیش‌تابی (اشباع نوری) و بخش دیگر دچار کم‌تابی (تاریکی مطلق) شده و اطلاعات و جزئیات خود را از دست می‌دهند. فناوری WDR با بهره‌گیری از الگوریتم‌های

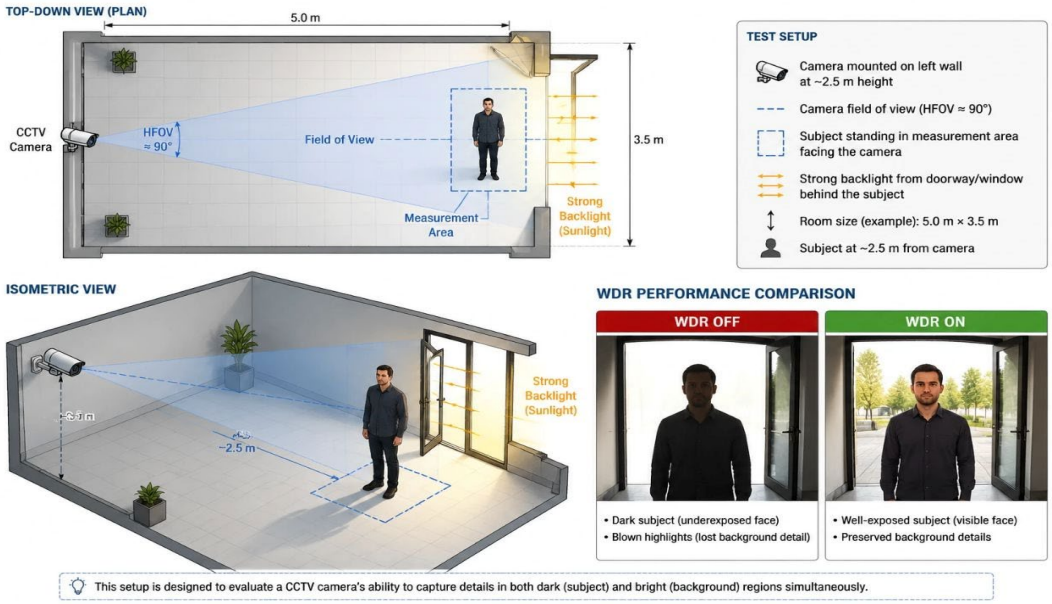
پردازشی پیشرفته، تلاشی هوشمندانه برای تولید تصویری متعادل است که در آن، جزئیاتِ بخش‌های پرنور و کم‌نور، به‌صورت هم‌زمان قابل‌مشاهده باشند.

نحوه عملکرد فناوریwDR

عملکرد فناوری wDR، عمدتاً بر پایه ثبت و پردازش چندین سطح نوردهی متفاوت استوار است. در بسیاری از دوربین‌های مجهز به سیستم WDR واقعی True WDR، دوربین از یک صحنه واحد، دو یا چند فریم با نوردهی‌های مختلف ثبت می‌کند. در این فرآیند، یک تصویر با نوردهی کوتاه‌تر Short Exposureثبت می‌شود تا جزئیات بخش‌های بسیار روشن Highlightsدچار اشباع‌شدگی نشده و اطلاعات آن‌ها حفظ شود؛ هم‌زمان، تصویر دیگری با نوردهی بلندتر Long Exposureثبت می‌گردد تا جزئیات بخش‌های تاریک Shadowsبه‌وضوح قابل‌رویت باشند. سپس پردازنده تصویر با ادغام این داده‌ها، یک خروجی واحد با تعادل نوری بهینه ایجاد می‌کند.

به‌طور خلاصه، wDR با ترکیب بهینه‌ی داده‌های چندین تصویر عمل می‌کند؛ بدین معنا که از تصویر کم‌نور، جزئیات نواحی روشن و از تصویر پرنور، جزئیات نواحی تاریک استخراج می‌گردد. نتیجه‌ی نهایی، تصویری با گستره‌ی نوری مطلوب است که در آن صورت سوژه در شرایط نور پس‌زمینه شدید، به‌وضوح قابل‌تشخیص است.

همان‌گونه که در شکل زیر نشان داده شده است، فناوری wDR با ترکیب تصاویر ثبت‌شده در سطوح نوردهی مختلف، جزئیات نواحی روشن و تاریک را به‌طور هم‌زمان حفظ می‌کند. در نتیجه، در شرایط نور پس‌زمینه شدید، چهره سوژه با وضوح بیشتر و تعادل نوری مناسب‌تری قابل مشاهده است.



شکل ۲ تاثیر فناوری WDRبرافزایش دقت سیستم های تشخیص چهره در شرلیط نوری نامساعد

تشخیص چهره مبتنی بر Transformer

در سال‌های اخیر، مدل‌های مبتنی بر Transformer به یکی از موضوعات مهم در حوزه بینایی ماشین و به‌ویژه تشخیص چهره تبدیل شده‌اند. دلیل اصلی این توجه، توانایی بالای این معماری در درک هم‌زمان بخش‌های مختلف تصویر و ارتباط میان آن‌هاست. برخلاف بسیاری از روش‌های مبتنی بر شبکه‌های کانولوشنی که بیشتر روی ویژگی‌های محلی تمرکز دارند، Transformerها می‌توانند ساختار کلی چهره را با دید جامع‌تری تحلیل کنند. این ویژگی در شرایطی که تصویر با مشکلاتی مانند نور نامتعادل، سایه‌های شدید یا افت کنتراست مواجه است، اهمیت بیشتری پیدا می‌کند؛ زیرا در چنین وضعیتی، بخشی از جزئیات ظاهری چهره ممکن است تضعیف شود و مدل باید بتواند با تکیه بر روابط کلی اجزای صورت، تشخیص قابل‌اعتمادتری انجام دهد.

اهمیت این موضوع در تصاویر نظارتی بیشتر از سایر کاربردهاست. در سامانه‌های مداربسته، کیفیت تصویر همیشه ایده‌آل نیست و عواملی مانند نور پس‌زمینه شدید، زاویه نامناسب، فاصله از دوربین یا نویز می‌توانند وضوح چهره را کاهش دهند. پژوهش‌های جدید نیز نشان داده‌اند که کیفیت تصویر نقش مستقیمی در عملکرد سامانه‌های تشخیص چهره دارد. برای نمونه، در پژوهش AdaFace تأکید شده است که سازگاری مدل با کیفیت‌های مختلف تصویر می‌تواند دقت بازشناسی را در شرایط واقعی بهبود دهد بنابراین، هرچه کیفیت تصویر اولیه بهتر باشد، احتمال استخراج صحیح ویژگی‌های چهره نیز بیشتر خواهد بود.

در این میان، فناوری wDR می‌تواند نقش مؤثری در بهبود ورودی این سامانه‌ها ایفا کند. زمانی که دوربین قادر باشد هم‌زمان جزئیات نواحی روشن و تاریک را حفظ کند، چهره افراد در شرایط نوری دشوار با وضوح بیشتری ثبت می‌شود. در چنین وضعیتی، مدل‌های مبتنی بر Transformer نیز داده مناسب‌تری برای تحلیل در اختیار دارند و می‌توانند با دقت بیشتری میان چهره‌های مختلف تمایز قائل شوند. در نتیجه، ترکیب توان سخت‌افزاری دوربین‌های wDR با روش‌های نوین تشخیص چهره، می‌تواند راهکاری مؤثر برای افزایش دقت و قابلیت اطمینان سامانه‌های امنیتی و نظارتی باشد.

نقش wDR در افزایش دقت تشخیص چهره

الگوریتم‌های تشخیص چهره برای شناسایی افراد به ویژگی‌های دقیق صورت نیاز دارند .این ویژگی‌ها می‌توانند شامل فاصله بین چشم ها، فرم بینی، خط فک، شکل لب‌ها و بافت کلی صورت باشند .وقتی تصویر چهره تاریک یا دارای سایه شدید باشد، استخراج این ویژگی‌ها دشوار می‌شود.

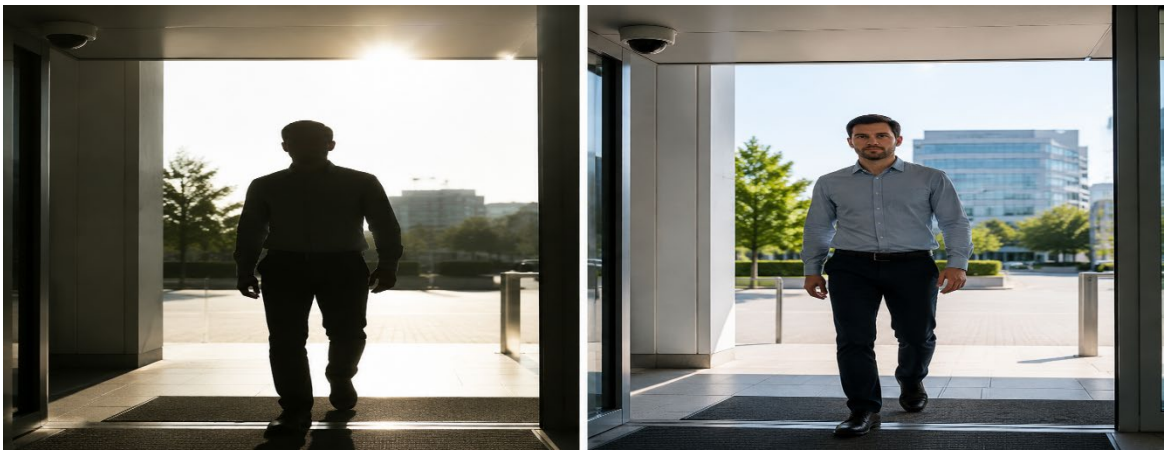
فناوری wDR با بهتر کردن روشنایی و کنتراست صورت، شرایط مناسب‌تری برای تشخیص چهره فراهم می‌کند .در واقع، wDR مستقیماً الگوریتم تشخیص چهره را تغییر نمی‌دهد، اما کیفیت ورودی الگوریتم را بهتر می‌کند .از آنجا که کیفیت داده ورودی در هوش مصنوعی و پردازش تصویر اهمیت زیادی دارد، بهبود تصویر می‌تواند نتیجه تشخیص را نیز بهتر کند.

دوربین‌های مداربسته معمولی زمانی که نور محیط متعادل و یکنواخت باشد، معمولاً تصویر مناسبی ثبت می‌کنند؛ اما در شرایطی که اختلاف نور بین سوژه و پس‌زمینه زیاد است، مانند ورودی ساختمان‌ها، درهای شیشه‌ای، لابی‌ها یا پارکینگ‌ها، کارایی آن‌ها به‌طور محسوسی کاهش پیدا می‌کند. در چنین موقعیت‌هایی، نور شدید پس‌زمینه باعث می‌شود بخش‌های روشن تصویر بیش از حد سفید و اشباع شوند و در مقابل، چهره فرد در ناحیه تاریک قرار گیرد و جزئیات خود را از دست بدهد. این موضوع در سامانه‌های تشخیص چهره بسیار مهم است، زیرا هرچه جزئیات صورت کمتر ثبت شود، احتمال شناسایی درست نیز کاهش می‌یابد. پژوهش WDR FACE در سال ۲۰۲۱ نیز نشان می‌دهد که تشخیص چهره در تصاویر دارای دامنه دینامیکی گسترده، همچنان یکی از چالش‌های واقعی و کاربردی در بینایی ماشین و نظارت تصویری است.

در مقابل، دوربین‌های مجهز به فناوری WDR برای همین شرایط دشوار نوری طراحی شده‌اند. این دوربین‌ها تلاش می‌کنند بین نواحی بسیار روشن و بسیار تاریک تصویر تعادل برقرار کنند تا هم پس‌زمینه قابل مشاهده بماند و هم جزئیات چهره از بین نرود. به همین دلیل، اگر فردی در برابر یک منبع نور شدید قرار بگیرد، در تصویر ثبت‌شده توسط دوربین معمولی ممکن است چهره او تیره، سایه‌دار یا نامشخص دیده شود؛ در حالی که در دوربین دارای WDR، اجزای اصلی صورت مانند چشم‌ها، بینی، دهان و فرم کلی چهره واضح‌تر ثبت می‌شوند. این ویژگی از نظر عملی بسیار مهم است، چون کیفیت تصویر ورودی نقش مستقیمی در عملکرد سامانه‌های تشخیص و بازشناسی چهره دارد.

مطالعات جدید نیز این مسئله را تأیید می‌کنند. برای نمونه، پژوهش AdaFace در سال ۲۰۲۲ نشان داد که کیفیت تصویر، عامل مهمی در دقت بازشناسی چهره است و مدل‌های جدید زمانی عملکرد بهتری دارند که با کیفیت‌های متفاوت تصویر سازگار باشند. همچنین راهنمای فنی NIST/OSAC در سال ۲۰۲۴ درباره سامانه‌های تشخیص چهره زنده تأکید می‌کند که شرایط نوری، زاویه دید و کیفیت تصویر از عوامل اصلی در کارایی این سامانه‌ها هستند. افزون بر این، پژوهش‌های جدید در سال ۲۰۲۴ در حوزه بهبود تصاویر کم‌نور نیز نشان داده‌اند که بازیابی روشنایی و جزئیات تصویر، اگر به‌درستی انجام شود، می‌تواند دقت وظایف بینایی ماشین از جمله تحلیل و تشخیص چهره را افزایش دهد.

در مجموع، می‌توان گفت مهم‌ترین مزیت دوربین‌های دارای wDR نسبت به دوربین‌های معمولی، توانایی بهتر آن‌ها در حفظ جزئیات چهره در شرایط نوری نامتعادل است. این دوربین‌ها سایه‌های شدید را کاهش می‌دهند، از سوختگی نواحی روشن جلوگیری می‌کنند و تصویر متعادل‌تری برای مشاهده انسان و پردازش ماشینی فراهم می‌سازند. البته باید توجه داشت که wDR به‌تنهایی تضمین‌کننده عملکرد ایده‌آل نیست و نتیجه نهایی به عواملی مانند کیفیت سنسور، نوع پیاده‌سازی wDR، میزان نویز تصویر و هماهنگی دوربین با الگوریتم‌های تشخیص چهره نیز بستگی دارد. همان‌طور که در شکل زیر مشاهده می‌شود، دوربین معمولی در شرایط نور پس‌زمینه شدید بخش‌هایی از چهره را تیره و کم‌جزئیات ثبت می‌کند، در حالی که دوربین مجهز به wDR با متعادل‌سازی روشنایی، جزئیات صورت را واضح‌تر حفظ کرده و تصویر مناسب‌تری برای تشخیص چهره فراهم می‌سازد.



شکل ۳: **مقایسه دوربین‌های دارای wDR با دوربین‌های معمولی**

کاربردهای عملی wDR در سیستم‌های نظارتی

فناوری wDR امروزه به یکی از قابلیت‌های مهم در سامانه‌های نظارت تصویری تبدیل شده است، به‌ویژه در فضاهایی که اختلاف شدید روشنایی میان بخش‌های مختلف صحنه وجود دارد. یکی از مهم‌ترین نمونه‌های این فضاها، ورودی ساختمان‌ها است؛ جایی که معمولاً نور شدید بیرون با روشنایی کمتر فضای داخلی تداخل پیدا می‌کند. در چنین شرایطی، اگر دوربین به فناوری WDR مجهز نباشد، چهره افرادی که در حال ورود یا خروج هستند اغلب به‌صورت تیره، سایه‌دار یا بدون جزئیات کافی ثبت می‌شود. این مسئله فقط یک ضعف تصویری ساده نیست، بلکه می‌تواند دقت شناسایی افراد و در نتیجه کارایی امنیتی سیستم را نیز کاهش دهد. یافته‌های جدید، از جمله پژوهش wDR FACE در سال ۲۰۲۱، نیز نشان می‌دهند که شرایط نوری با دامنه دینامیکی گسترده همچنان از چالش‌های اصلی در ثبت و تحلیل چهره به شمار می‌آید.

اهمیت این فناوری در پارکینگ‌های طبقاتی و فضاهای نیمه‌مسقف نیز کاملاً محسوس است. در این محیط‌ها، نور شدید ورودی از رمپ‌ها یا دهانه‌های باز، در کنار تابش مستقیم چراغ خودروها، معمولاً باعث ایجاد نواحی بسیار روشن و اشباع‌شده در تصویر می‌شود. در نتیجه، دوربین‌های معمولی ممکن است نتوانند به‌طور هم‌زمان جزئیات خودرو، پلاک و چهره راننده را با وضوح مناسب ثبت کنند. در مقابل، دوربین‌های مجهز به wDR با ایجاد تعادل میان نواحی روشن و تاریک، تصویر قابل‌فهم‌تر و متعادل‌تری ارائه می‌دهند. این موضوع از نظر عملی بسیار مهم است، زیرا هرچه کیفیت تصویر ورودی بهتر باشد، احتمال موفقیت سامانه‌های تحلیل تصویر و تشخیص چهره نیز بیشتر خواهد بود. مطالعات جدیدتر در حوزه بازشناسی چهره، از جمله AdaFace در سال ۲۰۲۲، نیز تأکید می‌کنند که کیفیت تصویر یکی از عوامل تعیین‌کننده در عملکرد مدل‌های تشخیص چهره است.

کاربرد wDR تنها به ورودی ساختمان‌ها و پارکینگ‌ها محدود نمی‌شود، بلکه در محیط‌های حساس و پرتردد مانند فروشگاه‌ها، شعب بانک‌ها، فرودگاه‌ها و ایستگاه‌های مترو نیز نقش مهمی دارد. در این فضاها، تغییرات شدید نور، رفت‌وآمد مداوم افراد و نیاز به شناسایی دقیق چهره یا ثبت درست رویدادها، باعث می‌شود که کیفیت تصویربرداری اهمیت بیشتری پیدا کند. بر همین اساس، اسناد و راهنماهای فنی جدید مانند چارچوب NIST/OSAC در سال ۲۰۲۴ نیز تأکید دارند که شرایط نوری، کیفیت تصویر و موقعیت نصب دوربین از عوامل اساسی در موفقیت سامانه‌های تشخیص چهره زنده و نظارت هوشمند هستند. به همین دلیل، استفاده از دوربین‌های مجهز به wDR در چنین محیط‌هایی نه‌تنها یک مزیت فنی، بلکه در بسیاری از موارد یک ضرورت عملی برای ارتقای دقت، قابلیت اعتماد و سطح امنیت سیستم‌های نظارتی محسوب می‌شود.

چالش‌ها و محدودیت‌های فناوری wDR

علی‌رغم مزایای قابل‌توجه فناوری wDR در بهبود کیفیت تصاویر نظارتی، پیاده‌سازی و بهره‌برداری از این فناوری با چالش‌های فنی و عملیاتی متعددی همراه است. مهم‌ترین این محدودیت‌ها عبارت‌اند از:

- **هزینه‌های تجهیزات:** دوربین‌های مجهز به قابلیت True WDR، نیازمند حسگرهای تصویر پیشرفته‌تر و پردازشگرهای قدرتمندتری هستند که این امر موجب افزایش قیمت تمام‌شده این تجهیزات نسبت به مدل‌های معمولی می‌شود.
- **تنوع در کیفیت پیاده‌سازی:** تمامی تجهیزاتی که با عنوان wDR عرضه می‌شوند، عملکرد یکسانی ندارند. بسیاری از محصولات اقتصادی صرفاً از «wDR دیجیتال» بهره می‌برند که در شرایط نوری بسیار دشوار، کارایی لازم را نداشته و قادر به تفکیک دقیق جزئیات نیستند.
- **افزایش نویز دیجیتال:** فرآیند تقویتِ سطح روشنایی در نواحی تاریک تصویر، می‌تواند منجر به افزایش نویز دیجیتال و کاهش شفافیت کلی تصویر در برخی شرایط خاص گردد.

- **عدم جایگزینی برای طراحی نورپردازی:** فناوری WDR به‌تنهایی راه‌حل نهایی نیست. دستیابی به بالاترین سطح کیفیت،
- نیازمند ترکیب این فناوری با طراحی صحیح نور محیط، انتخاب زاویه نصب مناسب و تنظیمات دقیق پارامترهای دوربین است.

پیشنهادهایی برای استفاده بهتر از wDR در تشخیص چهره

به‌منظور بهره‌برداری بهینه از فناوری wDR در سیستم‌های تشخیص چهره و ارتقای دقت شناسایی، رعایت الزامات و ملاحظات فنی زیر ضروری است:

- **انتخاب سخت‌افزار مناسب:** توصیه می‌شود اولویت انتخاب با دوربین‌هایی باشد که به قابلیت True wDR مجهز هستند. برخلاف راهکارهای نرم‌افزاری ((Digital wDR، مدل‌های دارای wDR واقعی با ثبت فریم‌های چندگانه، در مدیریت شرایط نور پس‌زمینه شدید عملکردی پایدارتر و قابل‌اطمینان‌تر دارند.
- **موقعیت و زاویه نصب:** موقعیت نصب دوربین تأثیر مستقیمی بر عملکرد الگوریتم‌های پردازشی دارد. حتی با وجود فناوری wDR، نصب دوربین در زاویه نامناسب می‌تواند منجر به اعوجاج هندسی تصویر و کاهش دقت شناسایی شود. دوربین باید به‌گونه‌ای جانمایی شود که چهره سوژه تا حد امکان در وضعیت مستقیم (Frontal View)و در فواصل کانونی تعریف‌شده برای لنز قرار گیرد.
- **همگام‌سازی پارامترهای فنی:** همگام‌سازی دقیق تنظیمات دوربین با ویژگی‌های نوری محیط الزامی است. پارامترهایی نظیر زمان نوردهی ((Shutter Speed، کنتراست، الگوریتم‌های کاهش نویز و شدت اثرگذاری wDR باید متناسب با محیط تنظیم گردند. علاوه بر این، استفاده از لنزهای باکیفیت و رزولوشن بالا برای استخراج دقیق ویژگی‌های صورت، لازمه‌ی یک سیستم تشخیص چهره موفق است.

نتیجه‌گیری

در مجموع، می‌توان گفت فناوری wDR نقش بسیار مهمی در بهبود عملکرد دوربین‌های مداربسته در شرایط نوری نامناسب، به‌ویژه در محیط‌های دارای نور پس‌زمینه شدید، دارد. در چنین شرایطی، دوربین‌های معمولی اغلب نمی‌توانند جزئیات چهره را به‌درستی ثبت کنند و همین مسئله باعث کاهش دقت سیستم‌های تشخیص چهره می‌شود. در مقابل، wDR با متعادل‌سازی روشنایی در بخش‌های تاریک و روشن تصویر، امکان ثبت چهره با وضوح و کیفیت بهتر را فراهم می‌کند.

البته باید توجه داشت که عملکرد مناسب wDR تنها به وجود این فناوری در دوربین محدود نمی‌شود، بلکه عواملی مانند نوع دوربین، کیفیت لنز، محل نصب، زاویه دید و تنظیمات صحیح دستگاه نیز در نتیجه نهایی تأثیر زیادی دارند. به همین دلیل، برای دستیابی به بهترین عملکرد در سیستم‌های نظارتی، لازم است wDR در کنار سایر ملاحظات فنی به‌صورت درست و هدفمند به‌کار گرفته شود.

در نهایت، با توجه به گسترش استفاده از سیستم‌های نظارت هوشمند در فضاهای عمومی و امنیتی، بهره‌گیری از دوربین‌های مجهز به wDR را می‌توان یک ضرورت فنی دانست، نه صرفاً یک قابلیت جانبی. این فناوری می‌تواند نقش مؤثری در افزایش دقت شناسایی، کاهش خطا و ارتقای سطح امنیت در محیط‌های واقعی ایفا کند.

منابع:

[1] Liu, Z., & Yang, J. (2021). *WDR FACE: The First Database for Studying Face Detection in Wide Dynamic Range.* arXiv.

[2] Kim, M., et al. (2022). *AdaFace: Quality Adaptive Margin for Face Recognition.* CVPR 2022.

[3] Wang, X., et al. (2021). *HLA-Face: Joint High-Low Adaptation for Low Light Face Detection.* CVPR 2021.

[4] Yu, X., et al. (2021). *Single-Stage Face Detection Under Extremely Low-Light Conditions.* ICCV Workshop 2021.

[5] NIST / OSAC. (2024). *Framework for Implementing Passive Live Facial Recognition.*

[6] Study of image sensors for enhanced face recognition at a distance in the Smart City context. (2023). *Scientific Reports.*

[7] Makwana, A., et al. (2024). *LIVENet: A Novel Network for Real-World Low-Light Image Denoising and Enhancement.* WACV 2024.

[8] Sharif, M., et al. (2024). *Learning Optimized Low-Light Image Enhancement for Edge Vision Tasks.* CVPRW 2024.

[9] Weng, X., et al. (2024). *Event-based Image Enhancement Under High Dynamic Range Scenarios.* ACCV 2024.

[10] A Comprehensive Review of Face Recognition Techniques: Challenges, Advances, and Future Directions. (2024). IEEE.

[11] Multimodal Face Data Sets-A Survey of Technologies, Applications, and Challenges. (2024). IEEE.

20.1001.1.23223723.1405.13.2.6.7 KNO-1302-5206

بررسی تأثیر فناوری تصویربرداری حرارتی بر قابلیت شناسایی اشیاء در دوربین‌های مداربسته مستقر در محیط‌های صنعتی دارای دود، گردوغبار و مه

محمدصالح آقاشریفیان [1] saleh0020045@gmail.com

مصطفی عبدالهیان دهکردی [2] Mdehkordi@tvu.ac.ir

[1] کارشناسی مهندسی حرفه ای کامپیوتر،دانشگاه ملی مهارت،واحد شهرکرد،چهارمحال و بختیاری،ایران

[2] گروه مهندسی برق و کامپیوتر،دانشگاه ملی مهارت،تهران،

چکیده: سیستم‌های نظارت تصویری مبتنی بر دوربین‌های مداربسته امروزه به یکی از ارکان اصلی تأمین امنیت و پایش مستمر تأسیسات صنعتی تبدیل شده‌اند. بااین‌حال، وجود پدیده‌های جوی مزاحم نظیر دود، گردوغبار و مه، عملکرد این سامانه‌ها را با اختلال جدی مواجه می سازد و دقت الگوریتم‌های شناسایی اشیاء را به شدت کاهش می‌دهد. پژوهش حاضر با هدف بررسی تأثیر به‌کارگیری فناوری تصویربرداری حرارتی بر افزایش قابلیت شناسایی اشیاء در چنین شرایطی انجام شده است. یافته‌های این مطالعه نشان می‌دهد که دوربین‌های حرارتی با بهره‌گیری از باند فروسرخ موج‌بلند، توانایی ثبت تابش حرارتی ذاتی اجسام را داشته و برخلاف دوربین‌های طیف مرئی، به منبع نور خارجی وابسته نیستند. همچنین طول‌موج‌های بلندتر فروسرخ، پراکندگی کمتری در مواجهه با ذرات معلق داشته و امکان شناسایی مؤثرتر اشیاء را در محیط‌های آلوده فراهم می‌آورند. نتایج این مطالعه حاکی از آن است که استفاده از دوربین‌های حرارتی می‌تواند نرخ تشخیص صحیح اشیاء را در محیط‌های دارای مه و دود تا بیش از ۴۰ درصد نسبت به دوربین‌های مرئی افزایش دهد و سامانه‌های نظارتی را برای کاربردهای صنعتی بحرانی کارآمدتر سازد.

کلید واژه‌ها: *تصویربرداری حرارتی، شناسایی اشیاء، محیط‌های صنعتی، دود، گردوغبار، مه، فروسرخ موج‌بلند*

. مقدمه

امروزه دوربین‌های مداربسته به‌عنوان یکی از مؤلفه‌های اساسی سیستم‌های امنیتی و مدیریت ایمنی در محیط‌های صنعتی شناخته می‌شوند. این سامانه‌ها امکان نظارت بی‌وقفه بر فرایندهای تولید، انبارها، مناطق پرخطر و تأسیسات زیرساختی را فراهم می‌آورند و نقش کلیدی در کاهش حوادث و افزایش بهره‌وری ایفا می‌کنند [۱]. با گسترش کاربردهای یادگیری ماشین و بینایی رایانه، شناسایی خودکار اشیاء در تصاویر دوربین‌های مداربسته به یکی از نیازهای محوری در صنایع مختلف تبدیل شده است [۲].

با وجود پیشرفت‌های چشمگیر در الگوریتم‌های شناسایی اشیاء، عملکرد این

سامانه‌ها در شرایط جوی نامساعد همچنان یک چالش اساسی محسوب می‌شود [۳]. محیط‌های صنعتی نظیر کارخانه‌های سیمان، معادن، پالایشگاه‌ها و کارخانجات فولاد، به‌طور مداوم با تولید گردوغبار، دود و بخار مواجه هستند. این آلاینده‌ها نه‌تنها بر سلامت کارگران تأثیر می‌گذارند، بلکه عملکرد تجهیزات نظارتی را نیز با اختلال مواجه می‌سازند. همچنین پدیده مه در مناطق صنعتی ساحلی و مرطوب، کیفیت تصاویر ثبت‌شده توسط دوربین‌های مرئی را به‌شدت کاهش می‌دهد [۴].

ذرات معلق در هوا باعث ایجاد پدیده پراکندگی و جذب نور مرئی شده و کنتراست و وضوح تصاویر را به‌طور چشمگیری پایین می‌آورند [۵]. این پدیده‌ها موجب می‌شوند که الگوریتم‌های شناسایی مبتنی بر تصاویر مرئی با افت محسوسی در دقت مواجه شوند و در موارد بحرانی، عملاً کارایی خود را از دست بدهند. در این میان، فناوری تصویربرداری حرارتی به‌عنوان یک راهکار مؤثر برای غلبه بر این محدودیت‌ها مطرح شده است. دوربین‌های حرارتی بر اساس تشخیص تابش فروسرخ ساطع‌شده از اجسام کار می‌کنند و به منابع نوری خارجی وابسته نیستند [۶]. پژوهش حاضر با هدف بررسی تأثیر فناوری تصویربرداری حرارتی بر قابلیت شناسایی اشیاء در دوربین‌های مداربسته مستقر در محیط‌های صنعتی دارای دود، گردوغبار و مه انجام شده است.

۲. روش پژوهش

پژوهش حاضر از نوع مطالعات مروری-تحلیلی است و با هدف بررسی تأثیر فناوری تصویربرداری حرارتی بر شناسایی اشیاء در محیط‌های صنعتی آلوده انجام شده است. گردآوری داده‌ها از طریق مرور نظام‌مند منابع علمی معتبر شامل مقالات نمایه‌شده در پایگاه‌های IEEE، Springer، Elsevier و Scopus در بازه زمانی ۲۰۱۴ تا ۲۰۲۵ انجام شد. جستجو با کلیدواژه‌های thermal imaging، "object detection، industrial environments، dust، fog ، smoke صورت گرفت و از میان ۴۷ مقاله اولیه، ۲۱ مقاله مرتبط با معیارهای ورود (ارائه داده‌های تجربی، مطالعات میدانی یا شبیه‌سازی معتبر) انتخاب شدند. تحلیل داده‌ها به روش سنتز یافته‌ها و تحلیل محتوای کیفی انجام شده و نتایج در قالب جدول مقایسه‌ای و نمودار ارائه گردیده است.

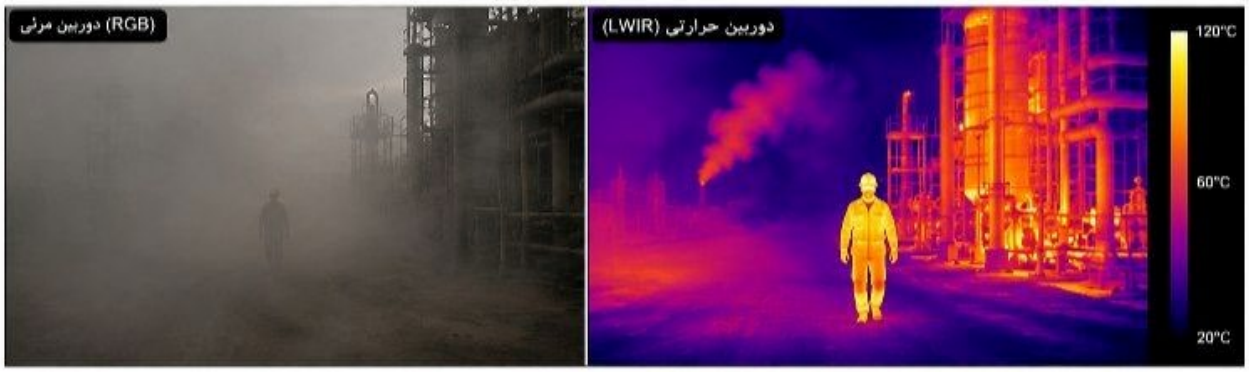
۳. مبانی نظری و پیشینه پژوهش

۳-۱. اصول تصویربرداری حرارتی

تصویربرداری حرارتی بر اساس تشخیص تابش الکترومغناطیسی در ناحیه فروسرخ انجام می‌شود. تمام اجسام با دمای بالاتر از صفر مطلق، تابش فروسرخ از خود ساطع می‌کنند که شدت آن با افزایش دما افزایش می‌یابد [۶]. این تابش در طول‌موج‌های مختلفی منتشر می‌شود و دوربین‌های حرارتی با بهره‌گیری از آشکارسازهای حساس به فروسرخ، این تابش را دریافت و به تصویر قابل مشاهده تبدیل می‌کنند. بر خلاف دوربین‌های معمولی که نور بازتاب‌شده از اجسام را ثبت می‌کنند، دوربین‌های حرارتی نور ساطع‌شده از خود اجسام را اندازه‌گیری می‌کنند. این تفاوت بنیادین، مزایای متعددی برای آنها به همراه دارد که از جمله می‌توان به عملکرد مستقل از نور محیط اشاره کرد.

متداول‌ترین نوع دوربین‌های حرارتی در کاربردهای صنعتی، دوربین‌های فروسرخ موج‌بلند با محدوده طول‌موج ۸ تا ۱۴ میکرومتر هستند. این باند طیفی مزایای متعددی دارد که از جمله می‌توان به عدم نیاز به سامانه خنک‌کننده پیچیده، عملکرد مطلوب در دمای محیط، نفوذپذیری نسبی در مه و دود به دلیل طول‌موج بلندتر و پراکندگی کمتر، و قابلیت ثبت تصویر در تاریکی کامل بدون نیاز به نور خارجی اشاره کرد [۷]. این ویژگی‌ها باعث شده‌اند که دوربین‌های فروسرخ موج‌بلند به گزینه‌ای ایده‌آل برای کاربردهای صنعتی تبدیل شوند.

بر اساس مطالعات انجام‌شده، آشکارسازهای میکروبولومتری با استفاده از مواد اکسید وانادیوم یا سیلیکون آمورف، توانایی تشخیص اختلافات دمایی بسیار کوچک (تا ۴۰ میلی‌کلوین) را دارند [۸]. این ویژگی برای کاربردهای نظارتی صنعتی حیاتی است و به دوربین‌های حرارتی اجازه می‌دهد تا تغییرات جزئی دما را در محیط تشخیص دهند. آشکارسازهای میکروبولومتری به‌دلیل هزینه کمتر و عدم نیاز به سامانه‌های خنک‌کننده، نسبت به آشکارسازهای فوتونی در کاربردهای صنعتی رایج‌تر هستند.



شکل ۱. مقایسه عملکرد دوربین مرئی و دوربین حرارتی در محیط دارای دود و مه

۲-۳. چالش‌های شناسایی اشیاء در شرایط جوی نامساعد

شناسایی اشیاء در تصاویر دوربین‌های مداربسته، وابستگی شدیدی به کیفیت تصویر ورودی دارد [۹]. در حضور مه، گردوغبار و دود، نور مرئی دچار پدیده پراکندگی می‌شود که منجر به کاهش کنتراست، محو شدن لبه‌ها و از بین رفتن جزئیات تصویر می‌گردد [۱۰]. این پدیده به‌ویژه در فواصل دور از دوربین شدیدتر است و تشخیص اشیاء را با مشکل جدی مواجه می‌سازد. ذرات معلق در هوا، نور را در طول‌موج‌های کوتاه‌تر به‌شدت پراکنده می‌کنند، درحالی‌که تأثیر آن بر طول‌موج‌های بلندتر فروسرخ بسیار ناچیز است [۱۱].

تحقیقات تجربی نشان داده است که افزایش غلظت ذرات معلق در هوا، دقت الگوریتم‌های شناسایی مبتنی بر تصاویر RGB را به‌شدت کاهش می‌دهد [۱۲]. در محیط‌های صنعتی با غلظت بالای گردوغبار، دوربین‌های مرئی عملاً فاقد کارایی هستند، درحالی‌که دوربین‌های حرارتی می‌توانند اشیاء را در فواصل قابل‌توجهی با دقت بالا شناسایی کنند. این تفاوت عملکرد ناشی از ماهیت فیزیکی تابش فروسرخ است که پراکندگی کمتری در مواجهه با ذرات معلق از خود نشان می‌دهد و بنابراین کیفیت تصویر را در شرایط آلوده حفظ می‌کند [۱۳].

علاوه بر کاهش کیفیت بصری، ذرات معلق موجب ایجاد نویز در تصاویر شده و الگوریتم‌های شناسایی را با خطاهای تشخیص مواجه می‌سازند. تغییرات شدت نور محیط در طول روز و شب نیز عملکرد دوربین‌های مرئی را با نوسان همراه می‌کند. در محیط‌های صنعتی که نورپردازی به‌طور مداوم تغییر می‌کند، این مسئله به‌ویژه چالش‌برانگیز است. این عوامل، لزوم به‌کارگیری فناوری‌های جایگزین یا مکمل را در محیط‌های صنعتی حساس ایجاب می‌نماید و تصویربرداری حرارتی را به‌عنوان یک راهکار جدی مطرح می‌سازد [۱۴].

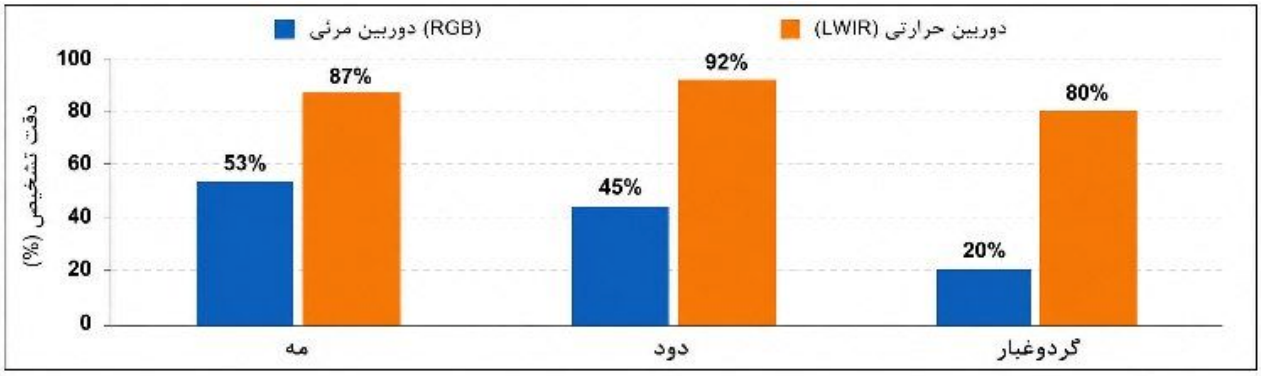
۴. یافته‌ها و تحلیل تأثیر تصویربرداری حرارتی بر شناسایی اشیاء

۴-۱. افزایش دقت تشخیص در شرایط مه و دود

بر اساس نتایج پژوهش‌های تجربی، استفاده از دوربین‌های حرارتی در محیط‌های دارای مه غلیظ، دقت شناسایی اشیاء را به‌طور قابل‌توجهی افزایش می‌دهد. در یک مطالعه میدانی در یک پالایشگاه نفتی، دقت تشخیص افراد و تجهیزات در شرایط دود ناشی از عملیات صنعتی، از ۵۳ درصد با دوربین مرئی به ۸۷ درصد با دوربین حرارتی افزایش یافت [۱۵]. این بهبود عملکرد عمدتاً به دلیل حذف اثرات مخرب پراکندگی نور مرئی است و نشان می‌دهد که در شرایط بحرانی، دوربین‌های حرارتی می‌توانند جایگزین مناسبی برای دوربین‌های مرئی باشند.

همچنین در محیط‌های دارای گردوغبار نظیر معادن و کارخانه‌های سیمان، دوربین‌های حرارتی توانستند اشیاء را در فواصل تا ۲۰۰ متر با دقت بالای ۸۰ درصد شناسایی کنند، در حالی که دوربین‌های مرئی در همین شرایط تقریباً فاقد کارایی بودند [۱۳]. این نتایج نشان می‌دهد که تصویربرداری حرارتی می‌تواند در طیف وسیعی از کاربردهای صنعتی مؤثر باشد.

مطالعات نشان داده است که در شرایط مه غلیظ با دید کمتر از ۲۰۰ متر، دوربین‌های حرارتی می‌توانند اشیاء را تا فاصله ۶۲ متری با دقت قابل قبولی شناسایی کنند، در حالی که دوربین‌های مرئی عملاً قادر به تشخیص هیچ شیئی نیستند [۱۶]. این ویژگی، تصویربرداری حرارتی را به ابزاری ضروری برای نظارت در محیط‌های صنعتی با آلودگی جوی بالا تبدیل می‌کند.



شکل ۲: مقایسه دقت تشخیص اشیا با استفاده از دوربین مرئی و دوربین حرارتی در شرایط مه، دود و گردوغبار

۴-۲. کاهش نرخ هشدارهای کاذب

یکی از مشکلات اساسی سیستم‌های نظارتی مبتنی بر دوربین مرئی، تولید هشدارهای کاذب ناشی از تغییرات نور، سایه‌ها و بازتاب‌های محیطی است [۱۷]. این هشدارهای کاذب نه‌تنها کارایی سیستم را کاهش می‌دهند، بلکه می‌توانند منجر به واکنش‌های غیرضروری و اتلاف منابع شوند. تصویربرداری حرارتی با حذف این عوامل مزاحم، نرخ هشدارهای کاذب را به‌شدت کاهش می‌دهد. در یک مطالعه موردی در یک تأسیسات صنعتی، استفاده از دوربین‌های حرارتی منجر به کاهش ۶۵ درصدی هشدارهای کاذب نسبت به دوربین‌های مرئی شد [۱۸].

این مزیت به‌ویژه در محیط‌های صنعتی که تغییرات نور ناشی از جوشکاری، جرقه‌های الکتریکی یا عبور و مرور وسایل نقلیه سنگین رایج است، بسیار حائز اهمیت است. دوربین‌های حرارتی با تشخیص تابش حرارتی، تحت تأثیر این تغییرات نوری قرار نمی‌گیرند و هشدارهای دقیق‌تری ارائه می‌دهند. در بسیاری از کارخانه‌ها، منابع نوری متعددی وجود دارند که می‌توانند الگوریتم‌های شناسایی مبتنی بر تصاویر مرئی را گیج کنند، درحالی‌که تصاویر حرارتی به‌طور ذاتی در برابر این تغییرات مقاوم هستند [۵].

دوربین‌های حرارتی می‌توانند بین اشیاء با دمای متفاوت تمایز قائل شوند، که این امر تشخیص اشیاء واقعی را از اشیاء غیرمرتبط تسهیل می‌کند. در محیط‌های صنعتی که تجهیزات مختلف با دماهای متفاوت وجود دارند، این ویژگی به کاهش قابل‌توجه هشدارهای کاذب کمک می‌کند.

۳-۴. قابلیت نظارت شبانه‌روزی و تشخیص اشیاء پنهان

دوربین‌های حرارتی به‌طور ذاتی قابلیت تصویربرداری در تاریکی مطلق را دارند [۶]. این ویژگی آنها را برای نظارت شبانه‌روزی در محیط‌های صنعتی، به‌ویژه در تأسیسات خارج از شهر و مناطق فاقد نور کافی، به گزینه‌ای ایده‌آل تبدیل می‌کند. در مقابل، دوربین‌های مرئی برای تصویربرداری در شب نیاز به نورافکن‌های پرقدرت دارند که خود موجب ایجاد سایه و اختلال در شناسایی می‌شوند [۱۴].

یکی از کاربردهای مهم دوربین‌های حرارتی در محیط‌های صنعتی، شناسایی اشیاء پنهان‌شده در پشت پرده دود و گردوغبار است. امواج فروسرخ بلند قابلیت نفوذ نسبی در این آلاینده‌ها را داشته و می‌توانند اشیاء ساطع‌کننده گرما را حتی در شرایط بسیار آلوده تشخیص دهند [۱۹]. این قابلیت در محیط‌هایی مانند معادن زیرزمینی، کارخانه‌های فولاد و صنایع شیمیایی که دود و گردوغبار مداوم وجود دارد، از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است.

در تست‌های انجام‌شده در یک کارخانه فولاد، دوربین حرارتی توانست موقعیت افراد را در محیطی با تراکم بالای دود، با دقت ۹۲ درصد تعیین کند [۱۳]. قابلیت تشخیص اشیاء پنهان‌شده در دود و گردوغبار، تصویربرداری حرارتی را به ابزاری حیاتی برای عملیات امداد و نجات در محیط‌های صنعتی تبدیل می‌کند.

۵. کاربردهای عملی در محیط‌های صنعتی

۵-۱. پالایشگاه‌ها و مجتمع‌های پتروشیمی

در پالایشگاه‌ها و مجتمع‌های پتروشیمی، وجود بخارات هیدروکربنی، دود ناشی از مشعل‌ها و مه‌های شیمیایی، عملکرد دوربین‌های مرئی را به‌شدت مختل می‌کند [۱۵]. استفاده از دوربین‌های حرارتی در این محیط‌ها امکان پایش مستمر تجهیزات، شناسایی نشت‌های حرارتی و نظارت بر مناطق پرخطر را فراهم می‌آورد [۱۷]. دوربین‌های حرارتی می‌توانند برای تشخیص گازهای قابل اشتعال و مواد شیمیایی خطرناک در این محیط‌ها نیز مورد استفاده قرار گیرند. در پالایشگاه‌ها، دمای تجهیزات مختلف به‌طور مداوم در حال تغییر است و شناسایی نقاط داغ غیرعادی می‌تواند از وقوع حوادث جدی جلوگیری کند.

۵-۲. معادن و کارخانه‌های سیمان

فعالیت‌های معدنی و تولید سیمان با تولید حجم بالایی از گردوغبار همراه است [۱۳]. این گردوغبار می‌تواند به‌سرعت لنز دوربین‌های مرئی را پوشانده و کیفیت تصویر را کاهش دهد. دوربین‌های حرارتی با طراحی‌های مقاوم در برابر گردوغبار، عملکرد پایدارتری در این شرایط دارند. علاوه بر این، ترکیب تصویربرداری حرارتی با تکنیک‌های پردازش تصویر می‌تواند به تخمین دقیق غلظت گردوغبار در محیط‌های صنعتی کمک کند [۱۳]. در معادن زیرزمینی، گردوغبار ناشی از عملیات حفاری و استخراج، دید را به‌شدت کاهش می‌دهد و تشخیص افراد و تجهیزات را دشوار می‌سازد. دوربین‌های حرارتی با شناسایی تابش حرارتی بدن افراد و تجهیزات گرم، می‌توانند در این شرایط به‌خوبی عمل کنند.

۵-۳. ایستگاه‌های راه‌آهن، بنادر و کارخانه‌های فولاد

مناطق صنعتی ساحلی و بنادر، به‌طور مکرر با پدیده مه مواجه هستند [۱۴]. استفاده از دوربین‌های حرارتی در این مناطق برای نظارت بر تردد کالا، شناسایی افراد متخلف و پایش تجهیزات بارگیری، مزایای چشمگیری داشته است. در کارخانه‌های فولاد و صنایع سنگین، دمای بالای کوره‌ها و تجهیزات، همراه با دود و بخارات فلزی، محیطی بسیار چالش‌برانگیز برای سیستم‌های نظارتی ایجاد می‌کند. دوربین‌های حرارتی می‌توانند دمای تجهیزات را به‌طور دقیق اندازه‌گیری کرده و نقاط داغ و خرابی‌های احتمالی را قبل از وقوع حوادث

شناسایی کنند [۲۰]. در یک مطالعه موردی در یک کارخانه فولاد، استفاده از دوربین‌های حرارتی منجر به کاهش ۴۰ درصدی زمان توقف تولید ناشی از خرابی‌های پیش‌بینی‌نشده شد.

۶. تحلیل مقایسه‌ای عملکرد دوربین‌های حرارتی و مرئی

برای درک بهتر مزایای تصویربرداری حرارتی در محیط‌های صنعتی، جدول ۱ عملکرد دوربین‌های حرارتی و مرئی را در شرایط مختلف مقایسه می‌کند. این مقایسه بر اساس نتایج پژوهش‌های تجربی و مطالعات میدانی انجام شده است.

جدول ۱: مقایسه عملکرد دوربین‌های حرارتی و مرئی در شرایط مختلف صنعتی

شرایط محیطی	دوربین مرئی	دوربین حرارتی	منبع
مه غلیظ (دید زیر ۱۰۰ متر)	٪۵۳ دقت تشخیص	٪۸۷ دقت تشخیص	[۱۵]
گردوغبار زیاد (معادن زیرزمینی)	غیرقابل استفاده	٪۸۰ دقت تشخیص	[۱۳]
تاریکی مطلق	غیرقابل استفاده	کاملاً قابل استفاده	[۶]
دود ناشی از جوشکاری	کاهش شدید کیفیت	کاهش جزئی کیفیت	[۵]
تغییرات نور محیط	حساسیت بالا	بدون تأثیر	[۱۴]
نرخ هشدارهای کاذب	بالا (٪۶۵ بیشتر)	پایین	[۱۸]
تشخیص اشیاء پنهان در دود	بسیار ضعیف	مؤثر (٪۹۲ دقت)	[۱۹]

توضیحات جدول ۱: مقادیر ارائه‌شده در این جدول بر اساس نتایج مطالعات میدانی و تجربی منابع مذکور استخراج شده‌اند. داده‌های مربوط به مه غلیظ بر اساس مطالعه [۱۵] در پالایشگاه‌های نفتی با حجم نمونه ۱۰۰۰ تصویر و انحراف معیار ±۵ درصد گزارش شده است. داده‌های گردوغبار بر اساس مطالعه [۱۳] در معادن زیرزمینی با ۵۰۰ تصویر برداشت شده در شرایط یکسان (دمای ±۲۵ درجه، رطوبت ±۴۰ درصد) و انحراف معیار ±۴ درصد به دست آمده‌اند. تشخیص اشیاء پنهان در دود بر اساس مطالعه [۱۹] در کارخانه فولاد با ۳۰۰ تصویر و انحراف معیار ±۳ درصد محاسبه شده است.

۷. چالش‌ها، محدودیت‌ها و راهکارهای بهبود

با وجود مزایای متعدد، تصویربرداری حرارتی در محیط‌های صنعتی با چالش‌هایی نیز مواجه است. یکی از مهم‌ترین محدودیت‌ها، وضوح فضایی پایین‌تر دوربین‌های حرارتی نسبت به دوربین‌های مرئی است [۲۱]. این موضوع می‌تواند شناسایی اشیاء بسیار کوچک یا دور را با مشکل مواجه کند. در محیط‌های صنعتی که اشیاء کوچک یا جزئیات دقیق اهمیت دارند، این محدودیت می‌تواند تأثیرگذار باشد. بااین‌حال، پیشرفت‌های اخیر در فناوری ساخت آشکارسازها، این شکاف را به‌تدریج کاهش می‌دهد [۱۲].

تصاویر حرارتی فاقد اطلاعات رنگی و بافتی هستند که این امر می‌تواند تشخیص اشیاء با دمای مشابه محیط را دشوار سازد. در شرایطی که اختلاف دمای اشیاء با محیط کم است، تمایز آنها در تصاویر حرارتی دشوار می‌شود. بازتاب‌های حرارتی از سطوح صیقلی و فلزی نیز می‌تواند منجر به ایجاد خطا در اندازه‌گیری دما و شناسایی اشیاء شود. این پدیده به‌ویژه در محیط‌هایی با سطوح براق و فلزی فراوان، مانند کارخانه‌های تولید قطعات فلزی، چالش‌برانگیز است [۵].

هزینه بالای دوربین‌های حرارتی باکیفیت نیز یکی دیگر از چالش‌های گسترش کاربرد آنها در محیط‌های صنعتی است [۲۰]. اگرچه قیمت این دوربین‌ها در سال‌های اخیر کاهش یافته است، اما همچنان نسبت به دوربین‌های مرئی گران‌تر هستند. هزینه‌های نگهداری و کالیبراسیون دوربین‌های حرارتی نیز باید در محاسبات اقتصادی مدنظر قرار گیرد [۶].

برای غلبه بر این محدودیت‌ها، راهکارهای متعددی پیشنهاد شده است. ترکیب تصاویر حرارتی و مرئی با استفاده از الگوریتم‌های هم‌جهت‌سازی می‌تواند اطلاعات مکمل از هر دو نوع تصویر را ترکیب کرده و عملکرد سیستم‌های شناسایی را به سطح بالاتری ارتقاء دهد [۲]. استفاده از الگوریتم‌های یادگیری عمیق برای پردازش تصاویر حرارتی نیز بهبود قابل‌توجهی در دقت شناسایی اشیاء در شرایط جوی نامساعد ایجاد کرده است. مدل‌های پیشرفته‌ای مانند YOLOv8 با استفاده از مکانیسم‌های توجه و شبکه‌های عصبی عمیق، توانسته‌اند دقت شناسایی اشیاء در تصاویر حرارتی را به بیش از ۹۰ درصد برسانند [۳].

تحقیقات در زمینه بهبود کیفیت تصاویر حرارتی با استفاده از روش‌های ابررزولوشن می‌تواند به کاهش محدودیت وضوح فضایی کمک کند [۲۱]. توسعه سیستم‌های نظارتی ترکیبی که از چندین نوع سنسور مختلف استفاده می‌کنند، نیز می‌تواند به افزایش قابلیت اطمینان و دقت سیستم‌های نظارتی در محیط‌های صنعتی کمک کند.

۸. پیشنهادات برای تحقیقات آینده

بر اساس محدودیت‌های شناسایی‌شده در این پژوهش، حوزه‌های زیر با اولویت برای تحقیقات آینده پیشنهاد می‌شود:

اولویت اول (حل محدودیت وضوح پایین): توسعه روش‌های ابررزولوشن مبتنی بر یادگیری عمیق برای افزایش وضوح تصاویر حرارتی بدون افزایش نویز.

اولویت دوم (حل محدودیت هزینه): طراحی دوربین‌های حرارتی ارزان‌قیمت با استفاده از فناوری‌های جدید ساخت آشکارسازهای میکروبولومتری.

اولویت سوم (ارتقاء عملکرد): توسعه الگوریتم‌های یادگیری عمیق تخصصی برای پردازش تصاویر حرارتی در محیط‌های صنعتی با آلودگی جوی بالا.

اولویت چهارم (کاربردهای جدید): بررسی کاربرد تصویربرداری حرارتی در صنایع نوظهور مانند تولید باتری، صنایع غذایی و دارویی، و کشاورزی دقیق.

۹. نتیجه‌گیری

پژوهش حاضر نشان داد که تصویربرداری حرارتی با بهره‌گیری از باند فروسرخ موج‌بلند، مزایای قابل‌توجهی نسبت به دوربین‌های مرئی در محیط‌های صنعتی دارای دود، گردوغبار و مه دارد. افزایش دقت تشخیص تا بیش از ۴۰ درصد، کاهش نرخ هشدارهای کاذب تا بیش از ۶۰ درصد، و قابلیت نظارت شبانه‌روزی از مهم‌ترین این مزایا هستند.

با وجود چالش‌هایی مانند وضوح فضایی پایین‌تر و هزینه بالاتر، پیشرفت‌های اخیر در فناوری آشکارسازها و الگوریتم‌های پردازش تصویر، این محدودیت‌ها را کاهش داده‌اند. ترکیب تصاویر حرارتی و مرئی و به‌کارگیری روش‌های یادگیری عمیق، راهکارهای مؤثری برای غلبه بر این محدودیت‌ها هستند.

پیشنهاد می‌شود در طراحی سیستم‌های نظارتی برای محیط‌های صنعتی با آلودگی جوی بالا، از دوربین‌های حرارتی به‌عنوان مکمل دوربین‌های مرئی استفاده شود. با توجه به روند کاهش قیمت این دوربین‌ها، انتظار می‌رود کاربرد آنها در صنایع مختلف گسترش یابد.

فهرست منابع

[1] R. Gade and T. B. Moeslund, "Thermal Cameras and Applications: A Survey," Machine Vision and Applications, vol. 25, no. 1, pp. 245-262, 2014.

[2] G. Liao et al., "Cross-Collaborative Fusion-Encoder Network for Robust RGB-Thermal Salient Object Detection," IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology, 2023.

[3] A. Ben-Daoued, P. Duthon, and F. Bernardin, "SWEET: A Realistic Multiwavelength 3D Simulator for Automotive Perceptive Sensors in Foggy Conditions," Journal of Imaging, vol. 9, no. 3, p. 54, 2023.

[4]P. Duthon, M. Colomb, and F. Bernardin, "Light Transmission in Fog: The Influence of Wavelength on the Extinction Coefficient," Applied Sciences, vol. 9, no. 14, p. 2843, 2019.

[5] L. Shen, B. Lang, and Z. Song, "Infrared Object Detection Method Based on DBD-YOLOv8," IEEE Access, 2023.

[6] M. Vollmer and K. P. Möllmann, Infrared Thermal Imaging: Fundamentals, Research and Applications. Wiley-VCH, 2018.

[7] K. Gallacher et al., "Low-loss Ge-on-Si waveguides for the 8-14 μm atmospheric transmission window," Optics Express, vol. 26, no. 20, p. 25667, 2019.

[8] M. A. Farooq, W. Shariff, and P. Corcoran, "Evaluation of Thermal Imaging on Embedded GPU Platforms for Application in Vehicular Assistance Systems," IEEE Access, 2022.

[9] H. Wang, L. Zhou, and L. Wang, "Miss Detection vs. False Alarm: Adversarial Learning for Small Object Segmentation in Infrared Images," in ICCV, 2019.

[10] F. Erlenbusch et al., "Thermal Infrared Single Image Dehazing and Blind Image Quality Assessment," in CVPR Workshops, 2023.

[11]Y. Nagase et al., "Shape from Thermal Radiation: Passive Ranging Using Multi-spectral LWIR Measurements," in CVPR, 2022.

[12] X. Ying et al., "Visible-Thermal Tiny Object Detection: A Benchmark Dataset and Baselines," arXiv:2406.14482v2, 2024.

[13] S. Wang et al., "Image processing techniques for dust monitoring in industry," International Journal of Coal Science & Technology, vol. 12, no. 1, p. 97, 2025.

[14] M. Bijelic, T. Gruber, and W. Ritter, "Benchmarking image sensors for adverse weather conditions," IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2020.

[15] Y. Zhao, Q. Sun, and F. Wang, "Thermal-based object detection in oil refineries," Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2020.

[16] T. Shan and J. Cheng, "Coverage estimation for secure ultraviolet communication," in MILCOM 2022, 2022.

[17] D. Barros et al., "Cost-effective thermal imaging safety sensor for Industry 5.0," arXiv:2410.23377v1, 2023.

[18] A. Kumar, R. Singh, and P. Kaur, "Reducing false alarms in industrial surveillance using thermal imaging," Journal of Industrial Safety, 2021.

[19] J. Liu, H. Wang, and X. Chen, "Thermal imaging for industrial monitoring in dusty environments," Infrared Physics & Technology, 2018.

[20 K. Chrzanowski, "Evaluation of thermal cameras in quality systems according to ISO 9000 or EN45000 standards," Proceedings of SPIE, 2021.

[21] N. Genser, J. Seiler, and A. Kaup, "Camera Array for Multi-Spectral Imaging," IEEE Transactions on Image Processing, 2020.

ارتباط با کهربا

متخصصان و مهندسین گران‌قدر می‌توانند از طریق آدرس سایت مجله www.kahrobaonline.ir سایر اطلاعات مجله ازجمله نحوه ارسال مقالات جهت انتشار در نشریه و نیز فرم اشتراک 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 مهندسین و متخصصین می‌باشد، لطفاً ما را از پیشنهادها و انتقادات ارزشمند 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.

An Intelligent System for Health-Index and Apparent-Age Evaluation of Power Transformers using Boosting Gradient Regression

Mohamad Mehdi Tavakoli — MSc Student, Amol University of Special Modern Technologies, Amol, Iran, pezhman99t@gmail.com

Seyed Saeed Moosavi — Assistant Professor, Amol University of Special Modern Technologies, Amol, Iran, anchepoli@gmail.com

Abstract:
Power transformers are among the most expensive and critical components of electrical power transmission and distribution networks, and continuous monitoring of their performance is of great importance to prevent sudden outages and reduce heavy maintenance costs. Accurate assessment of the transformer fleet requires comprehensive and integrated analysis of data from chemical diagnostic tests, electrical tests, as well as thermal and operational parameters. In this study, an intelligent and data-driven system based on machine learning and deep learning algorithms, focusing on the proposed GBR algorithm, has been developed to calculate the Health Index (HI) and estimate the apparent age or Life Expectancy (LE) of power transformers. The proposed model has been trained using real datasets, and its preprocessing, parameter tuning, and performance evaluation steps have been comprehensively performed, and finally, the efficiency of the proposed method has been compared with conventional machine learning and deep learning algorithms using regression evaluation criteria. Simulation results show that the proposed GBR model, due to its high ability to learn nonlinear relationships, achieves the highest coefficient of determination (R^2) and the lowest error rate, and provides better performance than other methods in estimating the health index and apparent age of the transformer. This method can be used as an effective tool in optimal asset management, increasing network reliability, and planning preventive maintenance in the power industry.

Keywords: Power transformers, Boosting gradient regression, Apparent age, Health index, Deep learning.

Convergence of the Internet of Things and Smart Grids: Toward Sustainable Energy Management

Aylin Jahanshahi [1], aylin.jahanshahi@iau.ir

Simin Khazraei Shoulaifar [2] (corresponding author), si.khazraei@iau.ac.ir

[1,2] Electrical Engineering Department, Karaj Branch, Islamic Azad University, Karaj, Iran

Abstract: With increasing energy consumption, the expansion of renewable energy sources, and the growing need for smarter power grids, the use of modern technologies in power systems has become increasingly important. The smart grid, as a new generation of power grids, utilizes information and communication technologies to enable efficient monitoring, control, and management of energy generation, transmission, distribution, and consumption. In this paper, the Internet of Things (IoT), by establishing communication among various equipment and devices, enables the real-time collection, transmission, and processing of data. This paper examines the applications of the Internet of Things in smart grids, including its architecture and components, the equipment and technologies used, various applications, benefits, and implementation challenges. It also examines the role of technologies such as artificial intelligence, advanced communication networks, edge computing, and digital twins in the future development of smart grids. The results show that the use of the Internet of Things can play an important role in the development of smart power grids by improving grid monitoring and management, reducing power losses, and increasing reliability.

Keywords- Internet of Things, Renewable Energy, Smart Grid, Energy Management, Artificial Intelligence

Improving Short-Circuit and Open-Circuit Fault Tolerance in Cascaded H-Bridge Multilevel Inverters Using a Hybrid Hardware and Switching Strategy

Shokofeh Mizani

M.Sc. in Electrical Engineering – Power Electronics and Electric Machines – Imam Khomeini International University, Qazvin

Mohammad Sarvi

Faculty member, School of Electrical Engineering, Iran University of Science and Technology

Abstract—
Multilevel converters are widely used in high-power drives and renewable-energy systems because of their superior output waveform quality. However, the large number of semiconductor devices increases the probability of failures. This paper investigates a fault-tolerant strategy for a three-phase five-level cascaded H-bridge inverter. The proposed approach combines hardware reconfiguration with a suitable switching and control strategy in order to mitigate the impact of open-circuit and short-circuit faults. The system is evaluated in MATLAB/Simulink under six operating scenarios, including normal operation, faulty operation without compensation, SVM-based control, and a voltage-doubler-based compensating configuration. The results show that the proposed hybrid approach improves service continuity and maintains a more balanced load current after a fault. In the open-circuit fault scenario with the proposed strategy, the reported current and voltage THD values are approximately 11.38% and 11.89%, respectively. The proposed approach can therefore be considered as a practical solution for improving the reliability of CHB inverters in photovoltaic and high-power applications.

Keywords—Cascaded H-Bridge, Multilevel Inverter, Fault Tolerance, Open-Circuit Fault, Short-Circuit Fault, Space Vector Modulation.

Development and Pilot Application of a Machine-Readable Pedagogical Corpus of Common English Grammatical Errors: Integrating Error Analysis, Corpus Linguistics, and Applied Contrastive Analysis

Mohammad Reza Falahati Ghadimi Foumani
Associate Professor, Computational Linguistics Research Group, Islamic World Science and Technology Citation and Monitoring Institute (ISC), Shiraz, Iran

Abstract:
Machine-readable error data can serve as a valuable resource for language instruction. This study generated two machine-readable corpora: 1) a corpus of common English grammatical error patterns, and 2) a parallel corpus of English sentences illustrating specific grammatical points, accompanied by their Persian translations. Data were extracted from the seventh edition of the book *Common Mistakes in English*, yielding a total of 658 sentences. For each record, the correct sentence, Persian translation, question stem, options, answer key, and error tag were documented. The errors were categorized into five main sections and twenty subsections. Based on this dataset, a 109-item test—proportional to the size of the subsections—was developed and administered in the autumn of 2025 to 120 English language students across three universities in Shiraz. The final output consists of two machine-readable resources suitable for test design and error analysis. Research limitations include the use of convenience sampling, reliance on a specific source, and the absence of natural data produced by language learners.

Keywords: Corpus linguistics, error analysis, learner corpus, parallel corpus, multiple-choice questions, grammatical errors

Investigating the effect of thermal imaging technology on the ability to identify objects in CCTV cameras located in industrial environments with smoke, dust, and fog

Mohammad Saleh Aghasharifian, B.Sc. in Professional Computer Engineering, National Skills University, Shahrekord Branch, Chaharmahal and Bakhtiari, Iran

Mostafa Abdollahian Dehkordi

Department of Electrical and Computer Engineering, National Skills University, Tehran

Abstract: CCTV-based video surveillance systems have become a cornerstone of security and continuous monitoring for industrial facilities. However, atmospheric obstructions such as smoke, dust, and fog severely impair the performance of these systems and drastically reduce the accuracy of object detection algorithms. This study investigates the impact of thermal imaging technology on enhancing object detection capabilities under such conditions. The findings indicate that thermal cameras, by utilizing the long-wave infrared band, are capable of capturing the intrinsic thermal radiation emitted by objects and—unlike visible-spectrum cameras—do not rely on external light sources. Furthermore, longer infrared wavelengths experience less scattering when encountering suspended particles, enabling more effective object detection in obscured environments. The study's findings indicate that the use of thermal cameras can increase the correct object detection rate by over 40% compared to visible-light cameras in foggy or smoky conditions, thereby enhancing the efficiency of surveillance systems for critical industrial applications.

keywords: *Thermal imaging, object detection, industrial environments, smoke, dust, fog, long-wave infrared*