

کاربرد هوش مصنوعی در بکارگیری تجهیزات نوین برای شناسایی آسیب و نگهداری هوشمند پل ها

سیدسینا سیدجعفری اولیاء^{۱*}، سیدمهدی هاشمی، علیرضا رضوانیان زاده، عرفان حسن لی، حجت کارگرزاده

۱- دکتری تخصصی مهندسی عمران سازه، دانشگاه شهید باهنر کرمان، Siafari@eng.uk.ac.ir

۲- دانشجوی دکتری تخصصی مهندسی عمران سازه، دانشگاه آزاد اسلامی واحد کرمان

۳- دکتری تخصصی مهندسی عمران سازه، دانشگاه شهید باهنر کرمان

۴- کارشناسی زبان انگلیسی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد کرمان

۵- کارشناسی ارشد مهندسی عمران مدیریت ساخت، دانشگاه آزاد اسلامی واحد کرمان

خلاصه

پل ها به عنوان بخش مهمی از زیرساخت های یک کشور، نقش کلیدی در توسعه اقتصادی و تسهیل جریان های حمل و نقل ایفا می کنند. این سازه ها علاوه بر جنبه های ترافیکی، در مواقع بحران نقش حیاتی را در حفظ ارتباطات و تسهیل عملیات امداد و نجات برعهده دارند. بنابراین اهمیت نظارت و نگهداری از این جریان های حیاتی برای بهره برداری تضمین شده در شرایط بحران بسیار حائز اهمیت می باشد. هوش مصنوعی به طور فزاینده ای در زمینه نگهداری و مدیریت راه ها، جاده ها و خصوصا پل ها به عنوان ابزاری کارآمد و موثر مورد استفاده قرار می گیرد. این فناوری با استفاده از الگوریتم های یادگیری ماشین و تحلیل داده های بزرگ، به مهندسان این امکان را می دهد که سلامت پل ها را به طور دقیق و منظم پایش کنند و فرآیندهای نگهداری و تعمیر را بهینه سازی و بهبود بخشند. یکی از کاربردهای اصلی هوش مصنوعی در نگهداری زیر ساخت های حیاتی مانند پل، پیش بینی خرابی ها و آسیب ها است. با تحلیل داده های به دست آمده از ابزارهای سنجشی و سیستم های نظارتی، هوش مصنوعی قادر است الگوهای خرابی و آسیب ها را شناسایی کرده و حتی زمان وقوع آن را پیش بینی نماید. این پیش بینی ها به مهندسان کمک می کند تا از خرابی های عمده و هزینه های تعمیرات غیرمنتظره جلوگیری کنند. در این مقاله به ارائه و بررسی تجهیزات نوین و پیشرفته برای بازرسی و نگهداری زیر ساخت های حمل و نقل با استفاده از الگوریتم های هوش مصنوعی پرداخته شده است.

کلمات کلیدی: سلامت پل، آسیب، نگهداری، هوش مصنوعی، الگوریتم های یادگیری ماشین

۱- مقدمه

پل ها به عنوان جریان های حیاتی برای تضمین توسعه اقتصاد ملی و کانال های مهم حمل و نقل می باشند. نحوه ارزیابی دقیق و کارآمد عملکرد پل ها و در نهایت تحقق بهره برداری بلندمدت آن ها همچنان با چالش های زیادی مواجه است. در سال های اخیر، دستگاه های هوشمند مانند پهپادها و ربات ها، الگوریتم های هوشمند مانند داده های کلان و هوش مصنوعی و فناوری های پیشرفته ای همچون اینترنت اشیا، پیشرفت های چشمگیری داشته اند. این پیشرفت ها فرصت های جدیدی برای اطلاع رسانی، اتوماسیون و هوشمندسازی بازرسی و نگهداری پل ها به ارمغان آورده اند. در حال حاضر، ارزیابی سلامت زیرساخت های ارتباطی مانند پل ها بیشتر به صورت دستی و توسط کارشناسان انجام می شود که این روش ها نه تنها زمان بر و پرهزینه است، بلکه نتایج آن همیشه دقیق و قابل اعتماد نیستند [۱]. با پیشرفت فناوری و استفاده از تجهیزات نوین این امکان فراهم شده است که بتوان بدون نیاز به نیروی انسانی، به تمام بخش های پل دسترسی پیدا کرد. علاوه بر این، ترکیب

این تجهیزات با تکنولوژی‌هایی مانند پردازش تصویر، داده‌های سه‌بعدی و فناوری اولتراسونیک امکان انجام تحلیل‌های دقیق و کم‌هزینه از آسیب‌های مختلف را فراهم می‌آورد. به همین دلیل، با پیشرفت فناوری و همکاری میان رشته‌های مختلف، امکان ارائه روش‌های جدید و دقیق‌تر برای نظارت بر سلامت پل‌ها فراهم شده است [۲]. یکی از مفاهیم جدیدی که در این راستا توسعه یافته و به پایش سلامت پل‌ها کمک شایانی کرده است، هوش مصنوعی می‌باشد. در این روش برای ارزیابی سلامت پل، نیاز به جمع‌آوری داده‌ها با استفاده از حسگرها و ابزارهای دقیق سنجشی توزیع شده، می‌باشد. روش‌های شناسایی آسیب مبتنی بر داده، یکی از رویکردهای موفق در زمینه پایش سلامت سازه‌ها است که به طور کلی از روش‌های یادگیری ماشین استفاده می‌کنند. این فناوری‌ها با استفاده از الگوریتم‌های ریاضی و عددی منجر به بهبود عملکرد سیستم پایش سلامت سازه‌ای می‌شود. علاوه بر این، استفاده از روش‌های یادگیری عمیق و مبتنی بر داده، برای تصمیم‌گیری در مورد زمان و راهبردهای نگهداری پل‌ها می‌تواند باعث بهینه‌سازی فرآیندهای بازرسی و نگهداری شود [۳]. این مقاله به بررسی فناوری‌های نوین و آخرین دستاوردها مرتبط جهت نگهداری و تعمیر هوشمند پل‌های بتنی و فولادی پرداخته است. در این راستا، پژوهش‌های اخیر در زمینه تجهیزات و فناوری‌های هوشمند بازرسی و نظارت مورد بررسی قرار گرفته است. هدف اصلی این مقاله، ترویج و گسترش استفاده از فناوری‌های نوین و دستاوردهای علمی در زمینه بهبود و ارتقاء عملیات نگهداری هوشمند پل‌ها است تا بتوان علاوه بر کاهش هزینه‌های تعمیر و نگهداری، از این منابع به مطلوب‌ترین شکل ممکن استفاده کرد.

۲- تجهیزات و فناوری تشخیص هوشمند

با پیشرفت‌های چشمگیر فناوری و تجهیزات هوشمند، استفاده از این فناوری‌ها در ارزیابی آسیب پل‌ها به طور قابل توجهی مورد استفاده قرار گرفته است. یکی از اصلی‌ترین اهداف این فناوری‌ها، کاهش حداکثری نقش انسان در عملیات شناسایی و ارزیابی آسیب پل‌ها است. در گذشته، بازرسان، برای شناسایی آسیب‌ها به صورت دستی و با استفاده از ابزارهای ساده، باید ساعت‌ها یا حتی روزها در محیط‌های خطرناک و دشوار کار می‌کردند. این روش‌ها علاوه بر اینکه بسیار زمان‌بر و طاقت‌فرسا بودند، به دلیل دخالت و قضاوت‌های انسانی، می‌توانستند منجر به اشتباهات یا ارزیابی‌های غیر دقیق شوند. اما با معرفی تجهیزات و فناوری‌های شناسایی هوشمند، فرآیند جمع‌آوری داده‌ها و تحلیل آنها به طرز چشمگیری بهبود یافته است. این تجهیزات هوشمند قادرند به صورت خودکار داده‌های دقیق و با دقت بالا را از پل‌ها جمع‌آوری کرده و آن‌ها را تحت شرایط خاص و با توجه به نیازها تحلیل کنند. این امر نه تنها باعث افزایش دقت و صحت ارزیابی‌ها می‌شود، بلکه سرعت عملیات شناسایی را نیز به طور قابل توجهی افزایش می‌دهد. با توجه به اینکه شناسایی آسیب پل‌ها معمولاً در شرایط سخت و خطرناک انجام می‌شود، به ویژه در پل‌هایی که به دلیل شرایط جوی، ترافیک سنگین یا آسیب‌های سازه‌ای، دسترسی به آن‌ها مشکل است، استفاده از فناوری‌های هوشمند، علاوه بر حفظ ایمنی و عدم نیاز به حضور مستقیم بازرسان، باعث افزایش کیفی بهره‌برداری از این سازه‌ها می‌شود [۴]. یکی از بزرگ‌ترین چالش‌ها در شناسایی آسیب پل‌ها، فرآیند پردازش داده‌هاست. در روش‌های سنتی، به دلیل وابستگی به تجربه و دانش شخصی بازرسان، ممکن است در برخی موارد تصمیمات نادرست یا برداشت‌های اشتباهی صورت گیرد اما در سیستم‌های هوشمند، پردازش داده‌ها به روش‌های علمی انجام می‌شود که این امر می‌تواند دقت و صحت نتایج را به طور چشمگیری افزایش دهد. این روش‌ها شامل بهره‌گیری از الگوریتم‌های پیچیده، هوش مصنوعی و یادگیری ماشین هستند که به این سیستم‌ها توانایی می‌دهند تا با تحلیل داده‌های عظیم، الگوهای آسیب و خرابی را شناسایی کرده و پیش از آنکه پل‌ها به وضعیت بحرانی برسند، آن‌ها را تحت نظارت و بررسی قرار دهند. این ویژگی سبب می‌شود که توانایی پیش‌بینی افزایش و نیاز به تعمیرات اضطراری به طور چشمگیری کاهش یابد [۵].

۳- الگوریتم های هوش مصنوعی

هوش مصنوعی شاخه‌ای از علوم کامپیوتر است که به ماشین‌ها این امکان را می‌دهد تا وظایفی را که معمولاً به هوش انسانی نیاز دارند را توسعه دهد. این وظایف می‌توانند شامل تصمیم‌گیری، حل مسئله، یادگیری و شبیه‌سازی رفتارهای انسانی باشند. هدف اصلی هوش مصنوعی این است که به ماشین‌ها توانایی فکر کردن را در شرایط خاص بدهد، به گونه‌ای که آن‌ها قادر به تحلیل داده‌ها و اتخاذ تصمیمات مشابه انسان‌ها باشند. این فرآیند می‌تواند در زمینه‌های مختلفی نظیر بینایی ماشین، یادگیری ماشین و رباتیک به کار گرفته شوند. به طور خاص، در صنعت نگهداری و تعمیرات، روش‌ها و الگوریتم‌های هوش مصنوعی می‌توانند در پشتیبانی از تصمیم‌گیری‌ها کمک کنند تا فرآیندها، کارآمدتر و بهینه‌تر شوند [۶]. در هوش مصنوعی، تکنیک‌هایی مانند سیستم‌های مبتنی بر دانش، استدلال مبتنی بر مورد، الگوریتم‌های ژنتیک، شبکه‌های عصبی و منطق فازی در پشتیبانی از تصمیم‌گیری‌های بهینه برای نظارت و نگهداری پل‌ها کاربرد دارند. این تکنیک‌ها با تحلیل داده‌ها و بهینه‌سازی فرآیندها، به شناسایی مشکلات و پیشنهاد راه‌حل‌های مناسب کمک می‌کنند.

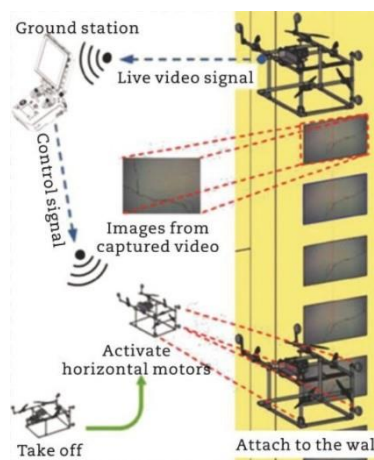
۴- نظارت و نگهداری هوشمند پل

با گسترش مقیاس پل‌ها و افزایش عمر مفید آن‌ها، مدیریت عملیات و نگهداری از این سازه‌ها اهمیت فزاینده‌ای پیدا کرده است. همانطور که در بخش قبل توضیح داده شده، راهبردهای نگهداری و بهره‌برداری از پل‌ها در سیستم‌های سنتی بیشتر بر اساس مشاهدات و تجربیات استوار است که این می‌تواند منجر به نگهداری بیش از حد یا از دست دادن زمان‌های بهینه برای انجام عملیات مراقبت و تعمیر شود. بنابراین، ضروری است که برنامه‌ریزی و مدیریت چرخه عمر پل‌ها به‌طور علمی انجام گیرد، زمان‌بندی نگهداری به‌صورت دقیق و به موقع تعیین شود و راهبردهای نگهداری به شیوه‌ای معقول و اقتصادی توسعه یابد. در این بخش به ابزارها و تجهیزات مدرن، جهت جمع‌آوری داده‌ها برای تحلیل تعیین آسیب پل‌های بتنی و فولادی پرداخته شده است.

۴-۱- تشخیص هوشمند آسیب پل‌های بتنی

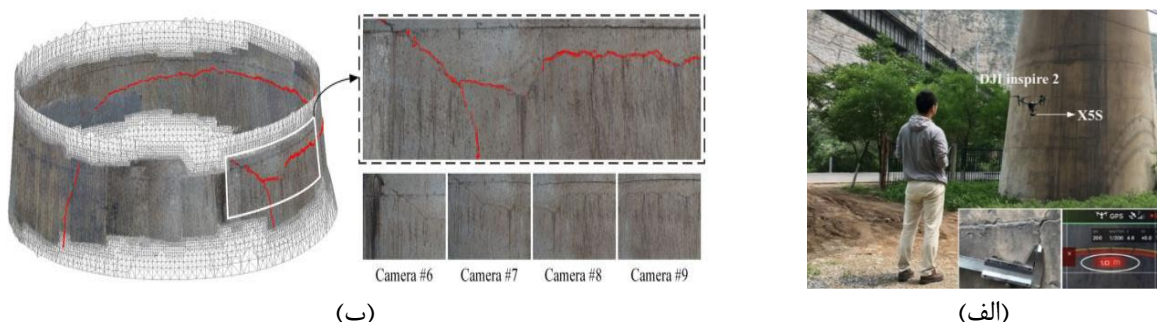
پل‌های بتنی به دلیل ویژگی‌هایی مانند استحکام، دوام و هزینه نسبی کمتر، کاربرد گسترده‌ای در پروژه‌های زیربنایی و حمل و نقل دارند. این پل‌ها به‌ویژه در مناطق شهری، جاده‌ها، راه‌آهن‌ها و مناطق روستایی برای عبور از موانع طبیعی و حمل و نقل استفاده می‌شوند. ترک‌ها از جمله آسیب‌های حیاتی برای استحکام و ایمنی این پل‌ها به شمار می‌روند. شناسایی دقیق ترک‌ها در پل‌های بتنی و درک فرآیند گسترش آن‌ها برای برنامه‌ریزی مؤثر در نگهداری و تضمین عملکرد بلندمدت آن‌ها، از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. به همین دلیل، روش‌های مؤثر و دقیق برای شناسایی ترک‌ها در این نوع پل‌ها همواره یکی از محورهای اصلی تحقیقاتی برای پژوهشگران بوده است. در سال ۲۰۱۹، سانچز-کواواس و همکاران [۲] یک سیستم رباتیک را پیشنهاد کردند که از پهپادهای بدون سرنشین برای بازرسی پل استفاده می‌کند. این سیستم با حرکت در نزدیکی سطح پل و استفاده از یک دوربین، نقص‌های سطحی مانند ترک‌ها و آسیب‌های سازه‌ای را با استفاده از تکنیک‌های بینایی ماشین شناسایی می‌کند. علاوه بر این، پهپاد می‌تواند به حسگرهای دیگری مانند حسگرهای اولتراسونیک مجهز شود تا خرابی‌ها را با دقت بالاتری را بررسی و شناسایی کند. ژونگ و همکاران [۷] از پهپاد به‌عنوان یک ابزار برای اندازه‌گیری فاصله اشیاء از طریق یک لیزر خودکار استفاده کردند و سپس با محاسبه وضوح تصویر، عمق ترک را محاسبه و تصحیح کردند. شناسایی شکل و عرض ترک‌ها روی سطح سازه با طراحی برنامه پیش‌پردازش تصویر، ساخت مدل استخراج هوشمند

شکل ترک و محاسبه عرض آن محاسبه می شود. با این حال، هنوز زمان قابل توجهی از جمع آوری اطلاعات خام، تجزیه و تحلیل داده ها و پردازش آن ها تا دریافت نتایج نیاز است. برای یکپارچه سازی مراحل از جمع آوری داده های خام تا تجزیه و تحلیل داده ها و همچنین شناسایی بهتر ترک ها، جیانگ و ژانگ [۸] چارچوبی برای شناسایی سریع ترک های پل پیشنهاد کردند. این روش از نوعی پهناد دیوارچسب استفاده می کرد تا اطلاعات تصویری از ترک ها را به دست آورد، اطلاعات را از طریق انتقال بی سیم ارسال کرده و سپس شناسایی ترک های پل را از طریق شبکه های عصبی کانولوشنی انجام دهد. روند کلی این کار در شکل ۱ نشان داده شده است.



شکل ۱- مکانیزم تشخیص ترک در پل ها توسط جیانگ و ژانگ [۸]

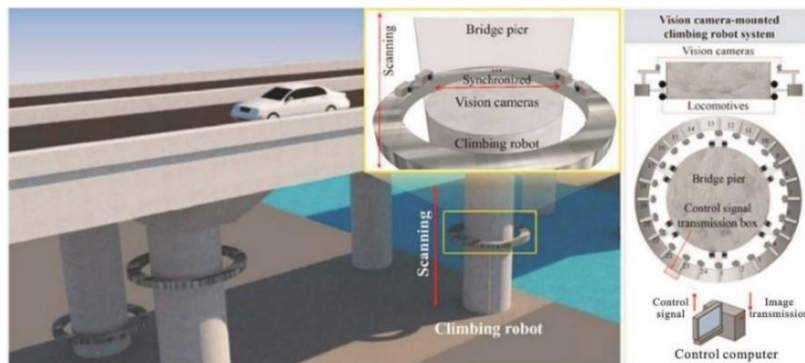
یکی از موانع استفاده از پهپادها برای بازرسی پل ها، مشکلاتی مانند اعوجاج تصویر و دشواری در موقعیت یابی می باشد. برای حل این مشکلات، لیو و همکاران [۹] مسیر پروازی و استراتژی عکاسی مناسبی (شکل ۲) برای شناسایی ترک های پایه های پل پیشنهاد کردند. این روش پیشنهادی بر اساس وضوح تصویر و همپوشانی کافی، بهترین مسیر پروازی و استراتژی عکاسی را برای بخش دایره ای و حتی بخش های مستطیلی پل تعیین و ارائه می کند. سپس از روش پردازش تصویر دیجیتال برای شناسایی ترک ها و بازسازی صحنه سه بعدی پایه های پل استفاده می کند.



شکل ۲- (الف) الگوریتم و مسیر پروازی ارائه شده، (ب) تصویر شبیه سازی شده از ترک ها توسط لیو و همکاران [۹]

تشخیص و شمارش ترک های سطحی در دال های پل همواره یکی از چالش های بزرگ در حوزه مهندسی سازه بوده است. این مشکل به ویژه برای اجزای ستون مانند دال ها که در معرض آسیب های مختلف قرار دارند، اهمیت ویژه ای پیدا

می‌کند. همانطور که ذکر شد، استفاده از پهپادها یکی از روش‌ها برای نظارت بر سطح پل‌ها است. با این حال، استفاده از ربات‌ها برای شناسایی ترک‌ها و ارزیابی وضعیت دال‌های پل نیز مورد توجه قرار گرفته است. به همین منظور، جانگ و همکاران [۱۰] از یک ربات حلقه‌ای متشکل شده از سه بخش اصلی مطابق شکل ۳، که به طور نزدیک از سطح دال پل تصویر برداری می‌کند، استفاده کردند تا اطلاعات دقیق و با کیفیتی از وضعیت سطحی دال جمع‌آوری شود. سپس این تصاویر به کمک روش‌های پیشرفته پردازش تصویر، تحلیل می‌شوند تا نواحی ترک‌خورده شناسایی شوند.



شکل ۳- ربات حلقوی ارائه شده توسط جانگ و همکاران [۱۱]

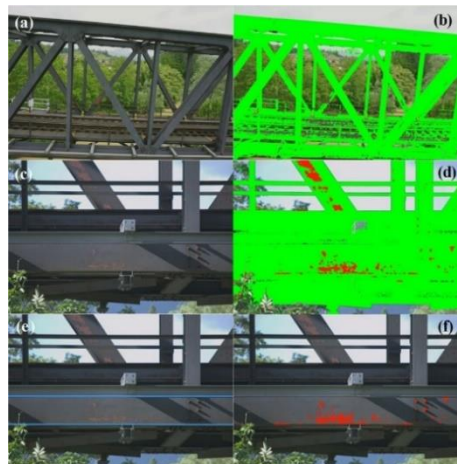
بررسی ترک‌ها در پایه‌های پل‌های بتنی زیر آب یکی از مراحل حیاتی در ارزیابی وضعیت سازه‌ای پل‌ها است. این ترک‌ها می‌توانند به دلیل عوامل مختلفی نظیر فرسایش و خوردگی ناشی از تماس طولانی مدت با آب و رسوبات ایجاد شوند. بدین منظور برای پایش سلامت پل، لی و همکاران [۱۲] از یک ربات زیر آبی مجهز به دوربین مطابق شکل ۴ به منظور جمع‌آوری اطلاعات پایه پل‌های بتنی استفاده کردند. الگوریتم‌های مختلف شبکه عصبی کانولوشنی به منظور ارزیابی و شناسایی دقیق ترک‌ها از تصاویر جمع‌آوری شده توسط ربات مورد بررسی قرار گرفت و در نهایت دقت شناسایی ترک‌ها در هر شبکه و عملکرد آن در محیط‌های آزمایشی مختلف مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان دادند که الگوریتم‌های ارائه شده قادر به شناسایی دقیق ترک‌ها در محیط زیر آب و تحت شرایط پیچیده می‌باشند.



شکل ۴- ربات زیر آبی جمع‌آوری داده ارائه شده توسط لی و همکاران [۱۲]

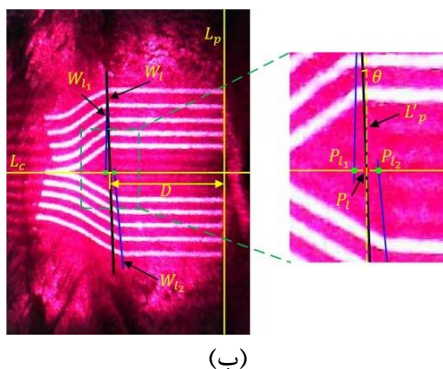
۴-۲- تشخیص هوشمند آسیب پل های فولادی

ویژگی های ظاهری آسیب در سازه های فولادی با سازه های بتنی متفاوت است و مهم ترین نشانه ها شامل خوردگی، پوسته پوسته شدن، ترک های جوش و شکست ها در اثر خستگی می باشند. به منظور شناسایی ویژگی های آسیب سطحی سازه های فولادی، در سال ۲۰۲۰، پتنزا و همکاران [۱۳] الگوریتمی برای شناسایی آسیب های سطحی پل های فولادی بر اساس اطلاعات تصاویر رنگی (شکل ۵) توسعه دادند که اطلاعات توسط پهپادها به دست می آید. این برنامه می تواند به طور خودکار پوسته پوسته شدن، خوردگی و سایر آسیب ها روی سطح سازه فولادی را شناسایی کند. همچنین کیم و همکاران [۱۴] روش تجزیه و تحلیل هوشمند تصویر را پیشنهاد کردند که می تواند تغییرات رنگ و نوردهی نامتوازن را در نظر بگیرد. این روش توانست پایش خوردگی سطحی سازه های فولادی را انجام دهد.

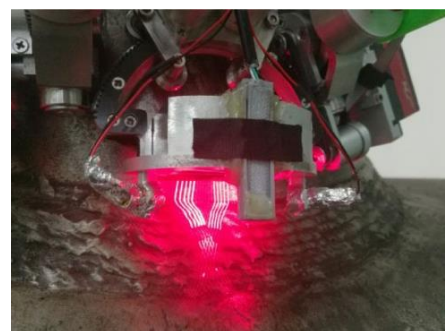


شکل ۵- آسیب های سطحی پل فولادی بررسی شده توسط پتنزا [۱۳]

دانگ و همکاران [۱۵] روشی برای شبیه سازی ساختارهای نوری موازی بر اساس یادگیری عمیق و ادغام اطلاعات به منظور شناسایی خطوط جوش پیشنهاد کردند. در این روش، از یک دوربین برای ثبت تصویر خطوطی که توسط لیزر بر روی جوش تابانده می شود، استفاده می شود. سپس، با استفاده از یک مدل یادگیری عمیق برای استخراج ناحیه مورد نظر و حذف نویز تصویر آموزش داده و در نهایت، خط جوش با ادغام اطلاعات مرزهای مختلف جوش به دست می آید. شکل ۶ سامانه لیزری و جزییات ارائه شده را نشان می دهد.



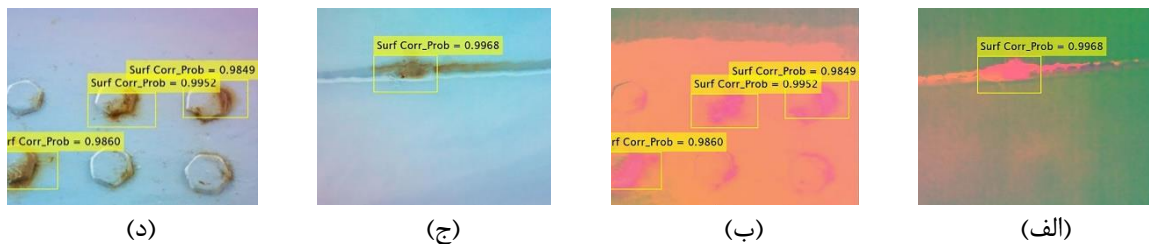
(ب)



(الف)

شکل ۶- (الف) سامانه لیزری و جزییات ارائه شده توسط دانگ و همکاران [۱۵]

به منظور بهبود کارایی تشخیص ترک‌های ناشی از خستگی در دال‌های فولادی ارتوتروپیک، هان و همکاران [۱۶] رباتی هوشمند طراحی کردند که از ترکیب فناوری پردازش تصویر و اولتراسونیک فازی استفاده می‌کند. این ربات، آسیب‌ها را با استفاده از جذب امواج الکترومغناطیسی روی سطح پل تشخیص می‌دهد. لیم و همکاران [۱۷] روشی را با ترکیب تصاویر بصری و اطلاعات تصویر حرارتی و همچنین با استفاده از شبکه عصبی، منطقه‌ای مطابق شکل ۷ برای شناسایی و طبقه‌بندی هوشمند خوردگی سطحی و زیرسطحی در پل‌های فولادی با اتصالات جوش و پیچ معرفی کردند.



شکل ۷- تشخیص خوردگی سطحی در اتصال جوش و پیچ [۱۷]

(الف, ب) نتیجه تشخیص با استفاده از تصویر CbCr-IR (ترکیب رنگ CbCr در طیف مادون قرمز)

(ج, د) نتیجه تشخیص با همپوشانی تصویر تشخیص شده بر روی تصویر RGB (تصویر رنگی)

در سال ۲۰۲۱، نگین [۱۸] رباتی را برای تشخیص آسیب در پل‌های فولادی توسعه داد که از انواع حسگرها مانند حسگرهای مغناطیسی، مادون قرمز و دوربین‌ها استفاده می‌کند. با استفاده از این حسگرها، ربات می‌تواند خوردگی و ترک‌های خستگی پل‌های فولادی را به طور مؤثر تشخیص دهد. همچنین این ربات می‌تواند به طور مستقل از سطوح صاف به سطوح خمیده منتقل شود و توانایی عبور از موانع را دارد که منجر به بهبود کارایی در تشخیص آسیب‌های سطحی پل می‌شود. شکل ۸ نحوه عملکرد این ربات را در یک پل فولادی در موقعیت‌های مختلف نشان می‌دهد.



شکل ۸- ربات تشخیص خرابی پل‌های فولادی توسعه داده شده توسط نگین [۱۸]

۵- بحث و نتیجه گیری

عملیات نگهداری و تعمیر هوشمند پل‌ها به یکی از حوزه‌های تحقیقاتی میان رشته‌ای در سال‌های اخیر تبدیل شده که از ترکیب نظریه‌ها، فناوری‌ها و روش‌های مختلف برای بهبود نظارت، شناسایی آسیب‌ها و تعمیر پل‌ها بهره می‌برد. این مقاله به دستاوردهای اخیر در زمینه تجهیزات، فناوری‌های شناسایی و تحلیل داده‌ها جهت نظارت و نگهداری هوشمند پل‌ها پرداخته است. در زمینه شناسایی و بازرسی پل، تجهیزات هوشمندی مانند پهپادها و ربات‌های چندمنظوره برای

نظارت دقیق و همه‌جانبه بر اجزای مختلف پل‌ها معرفی شدند. این تجهیزات به کمک فناوری‌های پیشرفته مانند اینترنت اشیا و یادگیری ماشین به شناسایی دقیق آسیب‌های ظاهری و بررسی وضعیت سلامت پل‌ها کمک می‌کنند و علاوه بر افزایش دقت، ایمنی نیروی انسانی را نیز بهبود می‌بخشند. این روش‌ها با بهره‌گیری از تکنیک‌هایی مانند فتوگرامتری، لیزر و امواج الکترونیکی منجر به اندازه‌گیری‌های دقیق‌تر و پایدارتر عملکرد پل‌ها می‌شوند. همچنین الگوریتم‌هایی مانند شبکه‌های عصبی می‌توانند به شناسایی دقیق آسیب‌های ظاهری و زیرسطحی در عملکرد و بهینه‌سازی برنامه‌های نگهداری پل‌ها بپردازند. استفاده از هوش مصنوعی در نگهداری پل‌ها نشان می‌دهد که این تکنولوژی قادر است تحولی عظیم در ارتقای دقت، سرعت و کارایی فرآیندهای بازرسی و نگهداری به وجود آورد. هوش مصنوعی با تحلیل داده‌های پیچیده و حجیم، فرآیند شناسایی آسیب‌ها و ناهنجاری‌ها را تسهیل کرده و به تصمیم‌گیری‌های به‌موقع برای تعمیرات و پیش‌بینی خرابی‌ها کمک می‌کند. علاوه بر این، نتایج تحقیقات نشان می‌دهند که ترکیب ابزارهای سنجشی نوین با الگوریتم‌های هوش مصنوعی می‌تواند به طور کامل نیازهای موجود را برآورده کرده و قابلیت اطمینان سیستم‌ها را افزایش دهد.

۶- مراجع

- [1] G. Zhang, Y. Liu, J. Liu, S. Lan, J. Yang, Causes and statistical characteristics of bridge failures: A review, *Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)* 9 (2022) 388–406.
- [2] P.J. Sanchez-Cuevas, P. Ramon-Soria, B. Arrue, A. Ollero, G. Heredia, Robotic System for Inspection by Contact of Bridge Beams Using UAVs, *Sensors* 19 (2019) 305.
- [3] C. Lazo, P. Gallardo, S. Cespedes, A bridge structural health monitoring system supported by the Internet of Things, in: *IEEE Colombian Conference on Communication and Computing (IEEE COLCOM 2015)*, IEEE, 2015: pp. 1–6.
- [4] J.J. Moughty, J.R. Casas, A State of the Art Review of Modal-Based Damage Detection in Bridges: Development, Challenges, and Solutions, *Applied Sciences* 7 (2017) 510.
- [5] W. Han, G. Yang, S. Chen, K. Zhou, X. Xu, Research progress on intelligent operation and maintenance of bridges, *Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)* 11 (2024) 173–187.
- [6] H.-T. Thai, Machine learning for structural engineering: A state-of-the-art review, *Structures* 38 (2022) 448–491.
- [7] X. Zhong, Z. Chen, J. Liu, J. Chen, A wideband optical channelized receiver based on coherent optical frequency combs and Fabry-Perot filter, in: P. Liu, Y. Tian, T. Xiao (Eds.), *Second Symposium on Novel Technology of X-Ray Imaging*, SPIE, 2019: p. 52.
- [8] S. Jiang, J. Zhang, Real-time crack assessment using deep neural networks with wall-climbing unmanned aerial system, *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering* 35 (2020) 549–564.
- [9] Y. Liu, X. Nie, J. Fan, X. Liu, Image-based crack assessment of bridge piers using unmanned aerial vehicles and three-dimensional scene reconstruction, *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering* 35 (2020) 511–529.
- [10] K. Jang, Y. An, B. Kim, S. Cho, Automated crack evaluation of a high-rise bridge pier using a ring-type climbing robot, *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering* 36 (2021) 14–29.

- [11] K. Jang, Y. An, B. Kim, S. Cho, Automated crack evaluation of a high-rise bridge pier using a ring-type climbing robot, *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering* 36 (2021) 14–29.
- [12] X. Li, H. Sun, T. Song, T. Zhang, Q. Meng, A method of underwater bridge structure damage detection method based on a lightweight deep convolutional network, *IET Image Process* 16 (2022) 3893–3909.
- [13] F. Potenza, C. Rinaldi, E. Ottaviano, V. Gattulli, A robotics and computer-aided procedure for defect evaluation in bridge inspection, *J Civ Struct Health Monit* 10 (2020) 471–484.
- [14] H. Kim, J. Yoon, S. Sim, Automated bridge component recognition from point clouds using deep learning, *Struct Control Health Monit* 27 (2020).
- [15] Z. Dong, Z. Mai, S. Yin, J. Wang, J. Yuan, Y. Fei, A weld line detection robot based on structure light for automatic NDT, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 111 (2020) 1831–1845.
- [16] H.G.H.H. et al. B. Han, Research on intelligent robot for fatigue crack detection of orthotropic steel bridge panel, *Highway* (2021) 143–148.
- [17] H. Jin Lim, S. Hwang, H. Kim, H. Sohn, Steel bridge corrosion inspection with combined vision and thermographic images, *Struct Health Monit* 20 (2021) 3424–3435.
- [18] S.T. Nguyen, H.M. La, A Climbing Robot for Steel Bridge Inspection, *J Intell Robot Syst* 102 (2021) 75.