ارائه چارچوب یکپارچه کاربرد هوش مصنوعی در پایش سلامت و مدیریت نگهداری پل‌ها با تأکید بر الزامات پیاده‌سازی در ایران

مقاله عملی – پژوهشی

*مهران غلامی (نویسنده مسئول)، استادیار، مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی، تهران، ایران
مقصود پوریاری، استادیار، مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی، تهران، ایران
*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: m.gholami@bhrc.ac.ir

دریافت: ۱۴۰۵/۰۴/۲۵– پذیرش: ۱۴۰۵/۰۸/۰۵
صفحه ۳۷۸-۳۶۱

چکیده

پل‌ها از دارایی‌های مهم زیرساختی شبکه حمل‌ونقل هستند و حفظ ایمنی، قابلیت بهره‌برداری و دوام آن‌ها به بازرسی مؤثر، ارزیابی وضعیت و برنامه‌ریزی مناسب نگهداری وابسته است. هوش مصنوعی با تحلیل تصاویر، داده‌های حسگرها، نتایج بازرسی و سوابق تعمیرات می‌تواند به شناسایی آسیب، ارزیابی وضعیت سازه، پیش‌بینی روند زوال و اولویت‌بندی اقدامات نگهداری کمک کند. بااین‌حال، بهره‌گیری مؤثر از این فناوری مستلزم یکپارچگی داده‌ها و پیوند تحلیل‌های فنی با تصمیم‌های مدیریتی است. هدف این پژوهش، تحلیل و مقایسه کاربردهای اصلی هوش مصنوعی در پایش سلامت و مدیریت نگهداری پل‌ها و ارائه چارچوبی مفهومی متناسب با نیازهای شبکه راه‌های ایران است. پژوهش با رویکرد مرور تحلیلی و تطبیقی منابع علمی و فنی و مقایسه خانواده‌های الگوریتمی انجام شده است. چارچوب پیشنهادی شامل شش لایه مرتبط است: گردآوری داده، مدیریت و آماده‌سازی داده، تحلیل هوشمند، ارزیابی وضعیت و ریسک، پشتیبانی از تصمیم‌های نگهداری و بازخورد حاصل از اجرا. نتایج بررسی نشان می‌دهد که بینایی ماشین برای تشخیص عیوب قابل مشاهده، یادگیری ماشین و یادگیری عمیق برای تحلیل داده‌های حسگری و شناسایی الگوهای خرابی، و روش‌های بهینه‌سازی و تصمیم‌گیری چندمعیاره برای اولویت‌بندی اقدامات نگهداری ظرفیت‌های مکملی دارند. استانداردسازی داده‌های بازرسی، توسعه مجموعه‌داده‌های معتبر، اتصال سامانه‌های موجود، ارزیابی بومی مدل‌ها و حفظ نقش کارشناسان در تصمیم‌های ایمنی، از الزامات اصلی پیاده‌سازی این چارچوب در ایران است.

واژه‌های کلیدی: هوش مصنوعی، پایش سلامت سازه‌ای، مدیریت نگهداری پل، نگهداری پیش‌بینانه، مدیریت دارایی راه.

۱ – مقدمه

پل‌ها از اجزای حیاتی شبکه حمل‌ونقل به شمار می‌روند و اختلال در عملکرد آن‌ها می‌تواند ایمنی کاربران، پیوستگی مسیرها، هزینه‌های حمل‌ونقل و تاب‌آوری شبکه راه را تحت تأثیر قرار دهد. عوامل محیطی، تکرار بارگذاری، خوردگی، خستگی مصالح، فرسایش، شرایط هیدرولیکی و کیفیت نگهداری در طول زمان بر وضعیت پل‌ها اثر می‌گذارند. ازاین‌رو، مدیریت پل تنها به بازرسی‌های دوره‌ای محدود نمی‌شود، بلکه شامل گردآوری داده، ارزیابی وضعیت، شناسایی خطر، تعیین زمان مناسب مداخله و تخصیص منابع محدود نگهداری نیز هست. در شیوه‌های متداول، اطلاعات وضعیت پل از طریق بازرسی چشمی، آزمون‌های غیرمخرب، اندازه‌گیری‌های میدانی و در برخی موارد سامانه‌های پایش سلامت سازه‌ای به دست می‌آید. .راهنماهای بازرسی و نگهداری پل نیز بر ثبت منظم وضعیت اجزا و استفاده از نتایج بازرسی در مدیریت دارایی

تأکید دارند (AASHTO, 2019; Federal Highway Administration, 2022, 2023). این روش‌ها همچنان پایه اصلی ارزیابی مهندسی هستند؛ با این حال، حجم و تنوع داده‌های تولیدشده و نیاز به مقایسه روند تغییرات در طول زمان، استفاده از روش‌های تحلیلی پیشرفته را ضروری‌تر کرده است. پژوهش‌های مربوط به پایش سلامت سازه‌ای نشان می‌دهند که یادگیری ماشین و تحلیل داده می‌توانند در استخراج الگو از داده‌های حسگرها، تشخیص تغییرات رفتاری و کمک به ارزیابی وضعیت سازه نقش داشته باشند (Farrar & Worden, 2012;Sun et al., 2020; Sonbul & Rashid, 2023). یکی از حوزه‌های مهم کاربرد هوش مصنوعی، تحلیل خودکار تصاویر پل است. تصاویر ثبت‌شده توسط دوربین‌های زمینی، سامانه‌های تصویربرداری و پهپادها می‌توانند برای شناسایی ترک، پوسته‌شدگی، لکه‌های خوردگی و سایر عیوب سطحی تحلیل شوند. مرور Luo و همکاران (۲۰۲۳) نشان می‌دهد که بینایی ماشین علاوه بر تشخیص عیوب سطحی، در برخی مسائل مرتبط با اندازه‌گیری جابه‌جایی و تحلیل رفتار پل نیز مورد استفاده قرار گرفته است. با این حال، عملکرد سامانه‌های تصویری به کیفیت تصویر، شرایط نور، زاویه برداشت، فاصله، پوشیدگی عیب و تنوع مصالح وابسته است. نکته اساسی آن است که شناسایی یک عیب، به‌تنهایی معادل ارزیابی کامل سلامت پل نیست. تشخیص ترک سطحی، برای مثال، اطلاعاتی درباره وجود و ویژگی‌های ظاهری آسیب فراهم می‌کند. اما تعیین اهمیت سازه‌ای آن به موقعیت، ابعاد، روند گسترش، نوع عضو، شرایط بارگذاری و ارزیابی مهندسی نیاز دارد. همچنین بسیاری از تغییرات عملکردی یا آسیب‌های پنهان را نمی‌توان تنها از روی تصاویر تشخیص داد. ازاین‌رو، مدیریت هوشمند پل باید داده‌های تصویری، اطلاعات حسگرها، نتایج بازرسی و سوابق نگهداری را در یک فرایند تحلیلی مرتبط به کار گیرد (Di Mucci et al., 2024; Xu et al., 2023).

در ایران نیز بهره‌گیری مؤثر از داده‌های بازرسی و سامانه‌های مدیریت پل می‌تواند زمینه ارتقای برنامه‌ریزی نگهداری را فراهم کند. با این حال، پراکندگی داده‌ها، تفاوت در شیوه ثبت خرابی، محدودیت مجموعه‌داده‌های برچسب‌گذاری‌شده و نبود ارزیابی بومی برای برخی مدل‌ها، از موضوعاتی هستند که باید در طراحی سامانه‌های هوشمند مورد توجه قرار گیرند. بنابراین، مسئله اصلی این مقاله صرفاً انتخاب الگوریتمی با دقت بالا نیست، بلکه چگونگی پیوند دادن داده، تحلیل هوشمند، ارزیابی ریسک و تصمیم مدیریتی در یک چارچوب قابل پیاده‌سازی است. هدف مقاله، مرور و مقایسه کاربردهای هوش مصنوعی در مراحل مختلف مدیریت پل و ارائه چارچوبی مفهومی برای یکپارچه‌سازی آن‌ها با تأکید بر شرایط و نیازهای ایران است.

۲- روش تحقیق

این پژوهش از رویکرد مرور تحلیلی و تطبیقی منابع علمی و فنی استفاده می‌کند. منابع منتخب در سه محور کلی بررسی شده‌اند: نخست مطالعات مربوط به پایش سلامت سازه‌ای و تحلیل داده‌های حسگرها، سپس مطالعات مربوط به بینایی ماشین و تشخیص خودکار عیوب پل و نهایتاً پژوهش‌های مرتبط با پیش‌بینی وضعیت، مدیریت نگهداری و پشتیبانی از تصمیم‌های مدیریتی. برای تحلیل کاربردها، خانواده‌های اصلی الگوریتمی از نظر نوع داده ورودی، مسئله قابل حل، نقاط قوت، محدودیت‌ها و جایگاه آن‌ها در چرخه نگهداری مقایسه شده‌اند. این مطالعه، مرور نظام‌مند محسوب نمی‌شود، زیرا هدف آن، تجمیع آماری تمام مطالعات منتشرشده یا اجرای فرایند انتخاب منابع بر اساس یک پروتکل از پیش ثبت‌شده نیست. در عوض، از یافته‌های مطالعات مروری و پژوهش‌های کاربردی مرتبط برای تحلیل ظرفیت‌ها و محدودیت‌های روش‌ها استفاده می‌شود. ازاین‌رو، نتایج مقاله ماهیت تحلیلی و چارچوب‌ساز دارند و نباید به‌عنوان رتبه‌بندی قطعی الگوریتم‌ها در همه شرایط اجرایی تفسیر شوند. در مرحله تلفیق، کاربردهای شناسایی‌شده در یک چرخه مدیریتی قرار گرفته‌اند تا رابطه میان داده‌های ورودی، خروجی مدل‌های هوش مصنوعی، ارزیابی مهندسی و تصمیم‌های نگهداری روشن شود. چارچوب نهایی یک پیشنهاد مفهومی است و اعتبارسنجی عملی آن مستلزم بکارگیری در شبکه‌ای از پل‌ها با داده‌های واقعی و معیارهای ارزیابی مشخص خواهد بود.

۲-۱- هوش مصنوعی در پایش سلامت سازه‌ای پل‌ها

پایش سلامت سازه‌ای با هدف گردآوری و تحلیل اطلاعاتی انجام می‌شود که وضعیت و رفتار سازه را در طول زمان توصیف می‌کنند. این اطلاعات می‌توانند شامل شتاب، تغییرمکان، کرنش،

دما، فرکانس‌های طبیعی و سایر ویژگی‌های پاسخ سازه باشند. چالش مهم در این حوزه آن است که داده‌های ثبت‌شده، علاوه بر آسیب احتمالی، از تغییرات دما، شرایط محیطی، بار ترافیکی و وضعیت بهره‌برداری نیز تأثیر می‌پذیرند. بنابراین، تغییر در یک شاخص اندازه‌گیری‌شده الزاماً به معنای وقوع آسیب نیست و باید در زمینه شرایط بهره‌برداری تفسیر شود. Sun و همکاران (۲۰۲۰) نقش داده‌های حجیم و هوش مصنوعی را در پایش سلامت پل‌ها، از ارزیابی وضعیت تا تشخیص آسیب، بررسی کرده‌اند. این مطالعه بر اهمیت تحلیل داده‌های متعدد و تبدیل داده‌های خام به اطلاعات قابل استفاده برای ارزیابی سازه تأکید دارد. همچنین Sonbul و Rashid (۲۰۲۳) با بررسی نظام‌مند الگوریتم‌های یادگیری ماشین، شبکه‌های عصبی و روش‌های ترکیبی را در مسائل مختلف پایش سلامت پل‌ها مقایسه کرده‌اند. یافته‌های آن‌ها نشان می‌دهد که انتخاب الگوریتم باید بر اساس هدف تشخیص، نوع داده، روش استخراج ویژگی و شرایط بهره‌برداری صورت گیرد، نه صرفاً بر مبنای نام یا پیچیدگی مدل. Zinno و همکاران (۲۰۲۳) نیز در مرور فناوری‌های هوش مصنوعی و روش‌های نوین پایش سلامت سازه‌ای پل‌ها، نقش فناوری‌های دیجیتال و سامانه‌های نوین گردآوری داده را بررسی کرده‌اند. مرور نظام‌مند Ataei و همکاران (۲۰۲۶) نیز کاربردهای هوش مصنوعی را در تشخیص آسیب، مدیریت داده، پیش‌بینی نگهداری و شناسایی چالش‌هایی مانند کمبود داده و تغییرپذیری محیطی جمع‌بندی کرده است. این مطالعات در مجموع نشان می‌دهند که هوش مصنوعی زمانی بیشترین فایده را دارد که در یک سامانه پایش تعریف‌شده به کار رود و خروجی آن به مسئله مهندسی مشخصی، مانند شناسایی ناهنجاری، تشخیص آسیب یا برآورد وضعیت، پاسخ دهد.

از نظر کاربرد، مدل‌های نظارت‌شده مانند ماشین بردار پشتیبان و جنگل تصادفی می‌توانند برای طبقه‌بندی وضعیت یا پیش‌بینی شاخص‌های کمی به کار روند. در حالی که روش‌های بدون نظارت و خودرمزگذارها برای شناسایی الگوهای غیرعادی، به‌ویژه در شرایطی که نمونه‌های آسیب‌دیده محدودند، قابل بررسی هستند. با این وجود، عملکرد این مدل‌ها به کیفیت داده، نمایندگی نمونه‌های آموزشی و توانایی تفکیک اثر آسیب از تغییرات عادی محیطی وابسته است.

۲-۲- بینایی ماشین و بازرسی خودکار پل‌ها

بینایی ماشین از پرکاربردترین شاخه‌های هوش مصنوعی در بازرسی پل‌هاست. زیرا بسیاری از عیوب مهم مانند ترک، پوسته‌شدگی، لکه‌های زنگ‌زدگی و آسیب‌های سطحی نشانه‌های تصویری دارند. در این حوزه، سه نوع مسئله باید از یکدیگر متمایز شوند: طبقه‌بندی تصویر، تشخیص موقعیت عیب و بخش‌بندی پیکسلی آن. طبقه‌بندی نوع کلی تصویر را مشخص می‌کند، تشخیص شیء محل تقریبی عیب را تعیین می‌کند و بخش‌بندی مرز و گستره عیب را با جزئیات بیشتری استخراج می‌کند.

Luo و همکاران (۲۰۲۳) در مرور خود، طیفی از کاربردهای بینایی ماشین در بازرسی و پایش پل را بررسی کرده‌اند. پژوهش Ma و همکاران (۲۰۲۳) نیز به بررسی کارایی چارچوب‌های یادگیری عمیق در تشخیص ترک پل پرداخته است. مطالعات پایه در تشخیص ترک با شبکه‌های عصبی و روش‌های بینایی نیز مبنای مهمی برای این حوزه فراهم کرده‌اند (Cha et al., 2017; Yeum & Dyke, 2015). در این مطالعات، شبکه‌های عصبی کانولوشنی برای استخراج ویژگی‌های تصویری و مدل‌های تشخیص شیء برای تعیین محل عیب به کار گرفته می‌شوند. در عمل، روش مناسب به هدف بازرسی بستگی دارد. اگر هدف غربالگری سریع تعداد زیادی تصویر باشد، سرعت تشخیص اهمیت بالایی دارد، اما اگر تعیین طول و عرض ترک یا محاسبه مساحت آسیب مورد نظر باشد، بخش‌بندی دقیق می‌تواند مفیدتر باشد. در سال‌های اخیر، معماری‌های مبتنی بر ترنسفورمر بینایی نیز برای تشخیص و بخش‌بندی عیوب بررسی شده‌اند. Shahin و همکاران (۲۰۲٤) رویکردی ترکیبی برای تشخیص ترک بتن با استفاده از ترنسفورمر بینایی و روش‌های بهبود تصویر بررسی کرده‌اند. Chu و همکاران (۲۰۲٤) نیز معماری مبتنی بر ترنسفورمر و عملیات پردازش متوالی را برای بخش‌بندی ترک‌های پل در تصاویر با وضوح بالا معرفی کرده‌اند. این مطالعات ظرفیت مدل‌های جدید را در استخراج ویژگی‌های تصویری پیچیده نشان می‌دهند، اما به‌تنهایی دلیلی بر برتری عمومی ترنسفورمرها نسبت به CNN ها در تمام کاربردها نیستند، زیرا مقایسه معتبر مستلزم استفاده از داده‌ها، معیارها و شرایط آزمون یکسان است.

۲-۳- مقایسه مطالعات مروری و جایگاه پژوهش حاضر

مطالعات موجود از جنبه‌های مختلف به هوش مصنوعی در پایش سلامت پل‌ها پرداخته‌اند. برخی بر تحلیل داده‌های حسگر و الگوریتم‌های تشخیص آسیب متمرکزند. برخی دیگر روش‌های بینایی ماشین را بررسی می‌کنند و گروهی نیز فناوری‌های نوین و کاربردهای هوش مصنوعی در مدیریت سلامت سازه را در سطحی گسترده‌تر تحلیل می‌کنند (Di Mucci et al., 2024; Luo et al., 2023; Sonbul & Rashid, 2023; Zinno et al., 2023).

Di Mucci و همکاران (۲۰۲۴) با مرور نظام‌مند کاربرد هوش مصنوعی در مدیریت سلامت پل‌های موجود، علاوه بر تشخیص عیوب بصری، به نقش هوش مصنوعی در بهبود ورودی‌ها و خروجی‌های سامانه‌های پایش سلامت، ارزیابی عملکرد و تحلیل ریسک پرداخته‌اند. Xu و همکاران (۲۰۲۳) نیز انتخاب روش‌های یادگیری ماشین برای پایش سلامت پل‌های بتنی و فولادی را از منظر نوع داده و مسئله مورد بررسی قرار داده‌اند. این پژوهش‌ها تأکید می‌کنند که انتخاب مدل باید متناسب با ماهیت داده و هدف کاربرد باشد.

با وجود این پیشرفت‌ها، یک نیاز کاربردی همچنان مطرح است وآن اتصال نتایج الگوریتم‌های مختلف به چرخه تصمیم‌گیری نگهداری در سطح شبکه پل‌ها می باشد. برای مثال، تشخیص ترک از تصویر، شناسایی ناهنجاری در داده‌های شتاب و پیش‌بینی کاهش شاخص وضعیت، خروجی‌هایی با ماهیت متفاوت‌اند. تبدیل این خروجی‌ها به تصمیم عملی نیازمند تعریف شاخص‌های وضعیت، بررسی اهمیت سازه‌ای، برآورد پیامد خرابی، تعیین فوریت مداخله و لحاظ کردن محدودیت بودجه است. نوآوری مقاله حاضر در معرفی یک الگوریتم کاملاً جدید یا ادعای برتری یک مدل مشخص نیست. بلکه در ارائه چارچوبی تلفیقی است که کاربردهای هوش مصنوعی را در پیوند با مراحل مدیریت نگهداری پل سامان‌دهی می‌کند و الزامات پیاده‌سازی آن را برای شرایط داده‌ای و مدیریتی ایران مورد توجه قرار می‌دهد.

۳ - کاربردها و مقایسه روش‌های هوش مصنوعی در مدیریت پل‌ها

۳-۱- جمع‌آوری و آماده‌سازی داده‌ها

کیفیت خروجی مدل‌های هوش مصنوعی تا حد زیادی به کیفیت داده‌های ورودی وابسته است. منابع داده می‌توانند شامل تصاویر بازرسی، تصاویر پهپادی، داده‌های حسگرهای ثابت، نتایج آزمون‌های غیرمخرب، اطلاعات هندسی و مصالح، سوابق تعمیرات، شرایط محیطی و حجم ترافیک باشند. پیش از تحلیل، داده‌ها باید از نظر کامل بودن، سازگاری زمانی، صحت برچسب‌ها، وضوح تصویر، نویز و داده‌های مفقود بررسی شوند. در داده‌های تصویری، اصلاح روشنایی، حذف نویز، تنظیم کنتراست و انتخاب ناحیه مورد بررسی می‌تواند کیفیت ورودی را بهبود دهد. با این حال، پیش‌پردازش نباید ویژگی واقعی عیب را تغییر دهد یا جزئیاتی را ایجاد کند که در تصویر اصلی وجود نداشته‌اند. در داده‌های حسگری نیز هم‌زمان‌سازی، بررسی نقاط پرت، تشخیص خرابی حسگر و ثبت شرایط محیطی اهمیت دارد. در نبود این مراحل، مدل ممکن است الگوهای ناشی از خطای اندازه‌گیری یا تغییرات بهره‌برداری را به‌اشتباه به آسیب سازه‌ای نسبت دهد(Sun et al., 2020; Xu et al., 2023).

۳-۲- تشخیص عیوب با استفاده از تصاویر

در کاربردهای تصویری، CNNها به‌طور گسترده برای استخراج ویژگی‌های محلی و شناسایی الگوهایی مانند ترک و خوردگی استفاده می‌شوند. مدل‌های تشخیص شیء مانند خانواده YOLOیا Faster R-CNN برای تعیین موقعیت عیب در تصویر مناسب‌اند، در حالی که شبکه‌هایی مانند U-Net برای بخش‌بندی پیکسلی و تعیین شکل و گستره عیب قابل استفاده‌اند. انتخاب میان این روش‌ها باید بر اساس نیاز عملیاتی، کیفیت داده و معیارهای ارزیابی انجام شود. در کاربردهای غربالگری، سرعت پردازش و نرخ شناسایی عیوب مهم است. اما در ارزیابی شدت آسیب، دقت مکان‌یابی و اندازه‌گیری ابعاد عیب نیز اهمیت دارد. بنابراین، مقایسه مدل‌ها نباید فقط به یک شاخص مانند دقت کلی محدود شود. در شرایطی که تعداد نمونه‌های سالم و آسیب‌دیده برابر نیست، باید حساسیت مدل در شناسایی عیوب، میزان هشدارهای نادرست و کیفیت تعیین محل عیب نیز بررسی شود.

۳-۳- تحلیل داده‌های حسگر و تشخیص ناهنجاری

برای داده‌های حسگری، مسئله می‌تواند شامل تشخیص وضعیت، شناسایی ناهنجاری، برآورد پارامترهای سازه یا پیش‌بینی روند تغییرات باشد. روش‌های سنتی یادگیری ماشین، مانند ماشین بردار پشتیبان و جنگل تصادفی، در مسائل طبقه‌بندی و رگرسیون کاربرد دارند و در صورت محدود بودن داده‌ها یا نیاز به تحلیل ویژگی‌های تعریف‌شده می‌توانند گزینه‌های مناسبی باشند. روش‌های یادگیری عمیق نیز برای استخراج الگو از داده‌های پیچیده و چندبعدی مورد توجه‌اند. در یک مطالعه داخلی نیز ترابی، قدرتی امیری و درویشان (۱۴۰۰) امکان پایش سلامت پل‌ها با استفاده از داده‌های موجود و یادگیری عمیق را

بررسی کرده‌اند و نتایج آن‌ها، ظرفیت شبکه عصبی عمیق کانولوشنی یک‌بعدی را برای تفکیک وضعیت سالم از ناسالم نشان می‌دهد. این نتیجه، در کنار ضرورت ارزیابی مستقل و داده‌های کافی، از بررسی روش‌های یادگیری عمیق برای داده‌های حسگری پل‌های ایران پشتیبانی می‌کند.

شبکه‌های بازگشتی و معماری‌های LSTM برای تحلیل وابستگی زمانی و پیش‌بینی سری‌های زمانی قابل بررسی هستند. خودرمزگذارها می‌توانند با یادگیری الگوی داده‌های عادی، در شناسایی انحراف از رفتار متعارف به کار روند. با این حال، هر انحرافی الزاماً ناشی از آسیب نیست. تغییرات دما، بارگذاری، شرایط تکیه‌گاهی و عملکرد حسگر باید در تفسیر خروجی لحاظ شوند. به همین دلیل، ترکیب داده‌های حسگری با اطلاعات محیطی و دانش مهندسی، برای کاهش هشدارهای کاذب اهمیت دارد (Sonbul & Rashid, 2023; Xu et al., 2023).

۳-٤- مقایسه خانواده‌های الگوریتمی

انتخاب الگوریتم باید بر مبنای نوع مسئله، حجم و کیفیت داده، هزینه محاسباتی، قابلیت تفسیر و نیاز عملیاتی انجام شود.

جدول ۱ مقایسه‌ای کیفی از خانواده‌های مهم الگوریتمی ارائه می‌نماید.

جدول ۱. مقایسه کیفی خانواده‌های الگوریتمی در مدیریت پل‌ها

خانواده روش	کاربرد مناسب در مدیریت پل	مزیت اصلی	محدودیت یا ملاحظه
درخت تصمیم	طبقه‌بندی وضعیت و پشتیبانی از قواعد تصمیم	تفسیر نسبتاً ساده	احتمال بیش‌برازش و ناپایداری
جنگل تصادفی	طبقه‌بندی وضعیت، پیش‌بینی شاخص‌ها و رتبه‌بندی ویژگی‌ها	توانایی مدل‌سازی روابط غیرخطی و مقاومت نسبی در برابر بیش‌برازش	تفسیر کل مدل دشوارتر از درخت منفرد
SVM[1]/SVR	طبقه‌بندی و رگرسیون با داده‌های محدود یا ویژگی‌های مهندسی‌شده	کارایی مناسب در برخی مسائل با ابعاد بالا	حساسیت به انتخاب هسته و تنظیم پارامترها
XGBoost و روش‌های تقویتی	پیش‌بینی وضعیت و تحلیل داده‌های جدولی	توانایی مناسب در مدل‌سازی روابط پیچیده	نیاز به تنظیم دقیق و کنترل بیش‌برازش
CNN	تشخیص ویژگی‌های تصویری و طبقه‌بندی عیوب	استخراج خودکار ویژگی از تصویر	نیاز به داده تصویری نماینده و برچسب‌گذاری
YOLO و Faster R-CNN	تشخیص محل عیب در تصویر	شناسایی هم‌زمان نوع و موقعیت عیب	توازن میان سرعت و دقت؛ حساسیت به شرایط تصویر
U-Net و روش‌های بخش‌بندی	تعیین مرز، شکل و گستره ترک یا آسیب	خروجی مکانی با جزئیات بالا	نیاز به برچسب‌گذاری پیکسلی پرهزینه
LSTM و سایر مدل‌های زمانی	پیش‌بینی سری زمانی و تحلیل روند تغییرات	مدل‌سازی وابستگی زمانی	حساسیت به کیفیت داده و تغییر شرایط بهره‌برداری
خودرمزگذارها	تشخیص ناهنجاری و یادگیری الگوی رفتار عادی	امکان استفاده در شرایط کمبود نمونه آسیب	ناهنجاری شناسایی‌شده الزاماً آسیب واقعی نیست
Transformer/ViT	تحلیل تصویر و الگوهای پیچیده	ظرفیت یادگیری روابط گسترده در داده	نیاز احتمالی به داده و منابع محاسباتی بیشتر
شبکه‌های عصبی گرافی	تحلیل ارتباط میان اجزا، حسگرها و اعضای سازه	نمایش ساختار و ارتباطات مکانی	نیاز به تعریف مناسب گراف و داده‌های مرتبط
الگوریتم ژنتیک و بهینه‌سازی	جانمایی حسگرها و انتخاب برنامه نگهداری	جست‌وجوی گزینه‌های متعدد تحت قیود	نتیجه به تابع هدف، قیود و تنظیمات وابسته است
AHP و TOPSIS	وزن‌دهی معیارها و رتبه‌بندی گزینه‌های نگهداری	شفافیت نسبی در ساختار تصمیم چندمعیاره	وابستگی به کیفیت معیارها و وزن‌های تعیین‌شده

منابع مرتبط با پایش سلامت پل‌ها نشان می‌دهند که الگوریتم‌ها باید متناسب با وظیفه مورد نظر انتخاب شوند و هیچ خانواده‌ای برای تمام مسائل برتری عمومی ندارد (Sun et al., 2020; Sonbul & Rashid, 2023; Xu et al., 2023).

در مسائل تصویری نیز پژوهش‌های مربوط به تشخیص و بخش‌بندی ترک نشان می‌دهند که معماری‌های مختلف باید با داده‌ها و معیارهای ارزیابی سازگار مقایسه شوند (Luo et al., 2023; Ma et al., 2023; Shahin et al., 2024). شواهد پژوهش‌های داخلی نیز این تنوع کاربرد را تأیید می‌کنند، رضویان امرئی و حاجی‌زاده امینی (۱۴۰۰) مسئله جانمایی بهینه حسگرها را بررسی کرده‌اند و ترابی و همکاران (۱۴۰۰)نیز به استفاده از یادگیری عمیق برای پایش سلامت پل‌ها بر پایه داده‌های موجود پرداخته‌اند. همچنین غلامی و همکاران (۱۴۰۵) در گزارش مطالعاتی که در مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی تدوین شده به انواع الگوریتم ها و مدل های هوش مصنوعی و کاربرد آنها در پایش سلامت پل ها پرداخته اند.

۳-۵- پیش‌بینی وضعیت و نگهداری پیش‌بینانه

نگهداری پیش‌بینانه به استفاده از اطلاعات موجود برای برآورد روند تغییر وضعیت و پشتیبانی از زمان‌بندی مناسب اقدامات نگهداری اشاره دارد. این رویکرد با نگهداری صرفاً واکنشی تفاوت دارد. زیرا تلاش می‌کند قبل از رسیدن وضعیت عضو به سطح نامطلوب، نشانه‌های تغییر را شناسایی کند. داده‌های تاریخی بازرسی، سوابق تعمیرات، نتایج آزمون‌ها، داده‌های محیطی و در صورت وجود، اندازه‌گیری‌های حسگر می‌توانند در این تحلیل استفاده شوند. با این حال، پیش‌بینی وضعیت با قطعیت پیش‌بینی زمان خرابی یکسان نیست. در بسیاری از موارد، داده‌های تاریخی محدود، تغییر روش‌های بازرسی یا تفاوت شرایط پل‌ها مانع از برآورد دقیق عمر باقیمانده می‌شود. بنابراین، خروجی مدل باید به‌صورت برآورد همراه با عدم‌قطعیت ارائه شود و در کنار قضاوت مهندسی مورد استفاده قرار گیرد. مرورهای حوزه مدیریت سلامت پل‌ها نیز بر اهمیت پیوند تحلیل هوشمند با ارزیابی عملکرد و ریسک تأکید دارند(Di Mucci et al., 2024; Sun et al., 2020).

۳-۶- اولویت‌بندی تعمیرات و تخصیص منابع

در سطح شبکه، تصمیم‌گیری درباره نگهداری پل‌ها تنها به شدت عیب وابسته نیست. پیامد احتمالی خرابی، اهمیت مسیر، حجم ترافیک، امکان مسیر جایگزین، هزینه تعمیر، محدودیت بودجه و زمان اجرای عملیات نیز باید لحاظ شوند. ازاین‌رو، خروجی مدل‌های تشخیص آسیب لازم است به فرایند ارزیابی ریسک و اولویت‌بندی اقدامات متصل شود. روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره مانند AHP و TOPSIS می‌توانند برای ساختاربندی معیارها و رتبه‌بندی گزینه‌ها استفاده شوند. الگوریتم‌های بهینه‌سازی نیز برای بررسی ترکیب‌های مختلف پروژه‌های نگهداری تحت محدودیت بودجه، نیروی انسانی و زمان قابل استفاده‌اند. در این کاربردها، کیفیت نتیجه به تعریف شفاف تابع هدف، قیود اجرایی و داده‌های هزینه وابسته است. بنابراین، الگوریتم بهینه‌سازی جایگزین تعیین سیاست نگهداری یا تصمیم کارشناسی نیست، بلکه ابزاری برای مقایسه منظم گزینه‌هاست.

۴- چارچوب یکپارچه پیشنهادی برای مدیریت هوشمند نگهداری پل‌ها

چارچوب پیشنهادی، کاربردهای هوش مصنوعی را در قالب شش لایه مرتبط سازمان‌دهی می‌کند. این لایه‌ها به‌صورت یک زنجیره یک‌طرفه در نظر گرفته نشده‌اند، زیرا خروجی اقدامات نگهداری و بازرسی‌های بعدی باید به لایه‌های داده و تحلیل بازگردد. هدف، ایجاد ارتباط میان اطلاعات فنی پل، تحلیل‌های الگوریتمی و تصمیم‌های مدیریتی در سطح هر پل و کل شبکه است.

۴-۱- لایه نخست: گردآوری داده‌ها

نخستین لایه وظیفه گردآوری و ثبت منظم اطلاعات مورد نیاز برای ارزیابی وضعیت پل را بر عهده دارد. این اطلاعات از منابعی با ماهیت و تناوب متفاوت به دست می‌آیند و لازم است به‌گونه‌ای ثبت شوند که امکان پیوند دادن آن‌ها به پل، عضو سازه‌ای و زمان وقوع یا اندازه‌گیری فراهم باشد.

مهم‌ترین منابع داده عبارت‌اند از:

-**اطلاعات شناسنامه‌ای و هندسی**: نوع پل، طول دهانه‌ها، سیستم سازه‌ای، نوع مصالح، مشخصات اعضا، نقشه‌ها و اطلاعات طراحی

-**داده‌های بازرسی**: نوع و محل خرابی، شدت و گستره آسیب، وضعیت اجزا، نظر بازرس و توصیه‌های نگهداری

-**تصاویر و ویدئوها**: تصاویر زمینی، تصاویر ثبت‌شده با دوربین‌های تخصصی و تصاویر پهپادی از عرشه، زیر پل، تکیه‌گاه‌ها و سایر اجزا

-**داده‌های حسگرها**: شتاب، کرنش، تغییرمکان، دما و سایر متغیرهایی که بر اساس شرایط پل و هدف پایش اندازه‌گیری می‌شوند

-**داده‌های محیطی و بهره‌برداری**: بارندگی، دما، رطوبت، شرایط هیدرولیکی، بار ترافیکی و در صورت دسترس بودن، بارهای ویژه یا عبور وسایل نقلیه سنگین

-**سوابق تعمیر و نگهداری**: نوع عملیات انجام‌شده، تاریخ اجرا، هزینه، مصالح مصرفی و نتیجه بازرسی پس از تعمیر

برای استفاده مؤثر از این منابع، هر رکورد باید شناسه پل و عضو مربوط، تاریخ ثبت، روش برداشت، واحد اندازه‌گیری و اطلاعات مربوط به کیفیت داده را داشته باشد. در تصاویر نیز مشخص بودن محل تصویربرداری، زاویه برداشت و مقیاس تقریبی تصویر می‌تواند در تحلیل و مقایسه تغییرات مؤثر باشد. در داده‌های حسگری، ثبت زمان اندازه‌گیری و شرایط محیطی اهمیت ویژه دارد؛ زیرا تغییرات محیطی ممکن است به‌اشتباه به‌عنوان تغییر ناشی از آسیب تفسیر شوند. لازم نیست در مرحله آغازین برای همه پل‌ها حسگر دائمی نصب شود. در بسیاری از موارد، می‌توان کار را با داده‌های موجود بازرسی و تصاویر آغاز کرد و تجهیزات پایش را به پل‌هایی اختصاص داد که اهمیت راهبردی، وضعیت نامطمئن یا ریسک بالاتری دارند. این رویکرد از تحمیل هزینه‌های اولیه گسترده پیش از شناخت نیاز واقعی جلوگیری می‌کند.

٤-٢- لایه دوم: مدیریت، یکپارچه‌سازی و آماده‌سازی داده‌ها

داده‌های گردآوری‌شده معمولاً از نظر قالب، دقت، تناوب و میزان جزئیات یکسان نیستند. ممکن است یک پل در چند دوره بازرسی شده باشد، اما نام خرابی یا نحوه ثبت شدت آن تغییر کرده باشد، یا داده حسگر و تصاویر مربوط به زمان‌ها و مکان‌های متفاوت باشند. لایه دوم باید این تفاوت‌ها را مدیریت کند و داده قابل اتکا برای تحلیل فراهم آورد. وظایف این لایه شامل موارد زیر است:

- **استانداردسازی ساختار اطلاعات**: تعیین شناسه یکتا برای پل و اعضای آن، واژگان مشترک خرابی‌ها و مقیاس‌های یکسان برای ثبت وضعیت

- **کنترل کیفیت داده**: شناسایی اطلاعات ناقص، تکراری، ناسازگار یا غیرواقعی و ثبت مواردی که نیازمند بازبینی کارشناسی هستند

- **آماده‌سازی تصاویر**: اصلاح کنترل‌شده روشنایی و کنتراست، حذف نویز، تنظیم وضوح و استخراج ناحیه مورد بررسی، بدون ایجاد یا حذف نشانه‌های واقعی آسیب

-**آماده‌سازی داده‌های حسگری**: بررسی نقاط پرت، مدیریت داده‌های مفقود، هم‌زمان‌سازی اندازه‌گیری‌ها و ثبت شرایط محیطی مرتبط

- **برچسب‌گذاری و ایجاد مجموعه‌های آموزشی**: ثبت نوع عیب، موقعیت، شدت و در صورت امکان ابعاد آن با استفاده از معیارهای مشخص و تأیید کارشناسی

- **مدیریت نسخه و دسترسی**: نگهداری سوابق تغییر داده‌ها، نسخه مدل‌ها، نتایج ارزیابی و سطح دسترسی کاربران

یکی از اصول مهم این لایه، جلوگیری از نشت اطلاعات میان مجموعه‌های آموزش و نمونه آزمایشی است. برای مثال، تصاویر متعدد و بسیار مشابه از یک پل نباید به‌گونه‌ای میان دو مجموعه تقسیم شوند که مدل در نمونه آزمون با نمونه‌هایی تقریباً یکسان با داده‌های آموزشی مواجه شود. چنین وضعیتی می‌تواند عملکرد مدل را بهتر از توان واقعی آن نشان دهد. در صورت امکان، بخشی از پل‌ها باید به‌طور کامل برای ارزیابی مستقل کنار گذاشته شوند. خروجی این لایه، یک پایگاه داده ساخت‌یافته و قابل ردیابی است که بتواند به‌صورت مستمر به‌روزرسانی شود و مبنای آموزش، ارزیابی و اجرای مدل‌ها قرار گیرد.

٤-٣- لایه سوم: تحلیل هوشمند و انتخاب مدل متناسب با مسئله

در این لایه، داده‌های آماده‌شده بر اساس نوع مسئله به مدل‌های مناسب ارجاع داده می‌شوند. به‌کارگیری یک مدل واحد برای همه مسائل توصیه نمی‌شود، زیرا داده تصویری، سری زمانی حسگر و اطلاعات جدولی بازرسی، ویژگی‌های متفاوتی دارند

و نیازمند روش‌های تحلیلی متناسب هستند. کارکردهای اصلی این لایه عبارت‌اند از:

-تشخیص و مکان‌یابی ترک، خوردگی، پوسته‌شدگی و سایر عیوب قابل مشاهده در تصاویر

-بخش‌بندی عیب و برآورد ابعاد یا گستره ظاهری آن، در صورت مناسب بودن کیفیت تصویر

-تحلیل داده‌های حسگر و شناسایی تغییرات غیرعادی در رفتار سازه

-طبقه‌بندی وضعیت اعضا یا پیش‌بینی شاخص‌های کمی بر اساس داده‌های بازرسی و سوابق تاریخی

-پیش‌بینی روند تغییر وضعیت، در صورت وجود داده‌های تاریخی کافی و سازگار

-استخراج روابط و الگوهای مؤثر در وضعیت پل با استفاده از اطلاعات سازه‌ای، محیطی و بهره‌برداری

انتخاب مدل باید از تعریف مسئله آغاز شود. برای تشخیص ترک در تصویر، مدل تشخیص شیء یا بخش‌بندی تصویری قابل بررسی است، اما برای تحلیل وضعیت بر اساس سوابق بازرسی، مدل‌های مبتنی بر داده‌های جدولی مانند جنگل تصادفی و XGBoost می‌توانند نقطه شروع مناسب‌تری باشند. برای داده‌های زمانی حسگر نیز روش‌های آماری، مدل‌های یادگیری ماشین و شبکه‌های زمانی باید متناسب با حجم و کیفیت داده ارزیابی شوند. این لایه باید علاوه بر خروجی اصلی، اطلاعاتی درباره کیفیت پیش‌بینی و میزان اطمینان مدل نیز ارائه کند. در صورت پایین بودن کیفیت داده یا قرار گرفتن ورودی خارج از دامنه داده‌های آموزشی، سامانه باید از ارائه نتیجه قطعی خودداری کند یا نیاز به بررسی تکمیلی را اعلام کند. این ویژگی برای کاربردهای مرتبط با ایمنی اهمیت ویژه دارد.

٤-٤- لایه چهارم: ارزیابی وضعیت، اهمیت آسیب و ریسک

خروجی مستقیم مدل‌های هوش مصنوعی معمولاً برای تصمیم مدیریتی کافی نیست. برای مثال، تشخیص یک ترک در تصویر نشان می‌دهد که الگوریتم احتمال وجود یک عیب را یافته است، اما به‌تنهایی مشخص نمی‌کند که آیا عیب از نظر سازه‌ای بحرانی است، چه زمانی باید تعمیر شود یا آیا محدودیت ترافیکی لازم است. لایه چهارم خروجی‌های تحلیلی را در چارچوب ارزیابی مهندسی تفسیر می‌کند. این لایه باید دست‌کم چهار موضوع را بررسی کند:

الف) اعتبار خروجی مدل: احتمال خطای تشخیص، کیفیت داده ورودی، میزان اطمینان مدل و نیاز به بازبینی کارشناس باید مشخص شود.

ب) ویژگی‌های عیب: محل عیب، نوع عضو، گستره ظاهری، تغییرات آن در بازرسی‌های متوالی و ارتباط آن با عیوب قبلی بررسی شود.

ج) وضعیت عضو و پل: نتایج مدل با داده‌های بازرسی، اطلاعات حسگر و معیارهای ارزیابی وضعیت تلفیق شود. شاخص وضعیت باید بر اساس روش تعریف‌شده و متناسب با نظام مدیریت پل محاسبه شود، نه بر اساس وزن‌های دلخواه یا خروجی یک الگوریتم منفرد.

د) ریسک و پیامد خرابی: اهمیت مسیر، وجود مسیر جایگزین، حجم ترافیک، پیامد احتمالی اختلال و اطلاعات فنی مرتبط در تعیین اولویت بررسی شوند.

ارزیابی وضعیت و ارزیابی ریسک دو مفهوم مرتبط اما متفاوت‌اند. وضعیت نامطلوب یک عضو لزوماً به معنی بالاترین ریسک در سطح شبکه نیست. همان‌طور که یک پل با وضعیت ظاهراً مناسب ممکن است به دلیل اهمیت راهبردی یا پیامد بالای اختلال، نیازمند توجه ویژه باشد. بنابراین، تصمیم درباره فوریت مداخله باید وضعیت فنی را با پیامد احتمالی خرابی ترکیب کند. خروجی این لایه می‌تواند شامل وضعیت پیشنهادی عضو، سطح اطمینان، اولویت بررسی تکمیلی، طبقه ریسک و دلایل اصلی تصمیم باشد. این خروجی باید برای کارشناس قابل فهم و قابل پیگیری باشد.

٤-٥- لایه پنجم: پشتیبانی از تصمیم‌های نگهداری و تخصیص منابع

در این لایه، نتایج ارزیابی وضعیت و ریسک به گزینه‌های عملیاتی تبدیل می‌شوند. گزینه‌ها ممکن است شامل بازرسی مجدد، آزمون غیرمخرب، پایش دقیق‌تر، تعمیر موضعی، عملیات نگهداری پیشگیرانه یا بررسی تخصصی‌تر باشند.

تعیین نوع اقدام باید بر اساس ضوابط فنی، شرایط واقعی پل و تأیید مسئولان مربوط صورت گیرد. سامانه تصمیم‌یار می‌تواند در موارد زیر کمک کند:

-اولویت‌بندی پل‌ها و اجزای نیازمند بازرسی یا مداخله

-مقایسه گزینه‌های نگهداری از نظر هزینه، زمان و اثر مورد انتظار

-بررسی سناریوهای مختلف تخصیص بودجه در سطح شبکه
-تعیین ترکیب مناسب پروژه‌ها تحت محدودیت بودجه، نیروی انسانی و زمان
-شناسایی پل‌هایی که برای تصمیم‌گیری به داده تکمیلی یا بازرسی تخصصی نیاز دارند
-ثبت دلیل پیشنهاد سامانه و امکان بازبینی تصمیم نهایی

روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره مانند AHP و TOPSIS می‌توانند برای رتبه‌بندی گزینه‌ها استفاده شوند. الگوریتم‌های بهینه‌سازی مانند الگوریتم ژنتیک نیز برای بررسی ترکیب پروژه‌های نگهداری در شرایط محدودیت منابع قابل استفاده‌اند. با این حال، استفاده از این روش‌ها مستلزم تعریف معیارهای روشن، وزن‌دهی مستند و تعیین قیود واقعی اجرایی است. خروجی سامانه باید ماهیت پیشنهادی داشته باشد. در موارد مرتبط با ایمنی، تشخیص وضعیت بحرانی یا تصمیم‌های دارای پیامد قابل توجه، نظر کارشناسان و ضوابط مصوب باید بر پیشنهاد خودکار مقدم باشد. همچنین سامانه باید مشخص کند که پیشنهاد آن بر چه داده‌ها و معیارهایی استوار است تا امکان دفاع فنی از تصمیم فراهم شود.

٤-٦- لایه ششم: اجرا، بازخورد و بهبود مستمر

در این لایه، نتیجه واقعی اقدامات نگهداری به سامانه بازگردانده می‌شود. اگر پس از شناسایی یک عیب، بازرسی تکمیلی انجام شود یا تعمیر خاصی صورت گیرد، نتیجه باید همراه با تاریخ، هزینه، نوع اقدام و وضعیت پس از اجرا ثبت شود. این اطلاعات برای ارزیابی صحت پیش‌بینی‌ها و بهبود برنامه‌ریزی آینده اهمیت دارند. فرایند بازخورد باید شامل مراحل زیر باشد:

- ثبت اقدام پیشنهادی سامانه و تصمیم نهایی کارشناس
- ثبت اقدام انجام‌شده و دلایل هرگونه تفاوت با پیشنهاد سامانه
- ثبت نتیجه بازرسی یا آزمون پس از اقدام
- مقایسه خروجی مدل با یافته‌های واقعی
- بررسی خطاهای تشخیص، هشدارهای کاذب و موارد شناسایی‌نشده
- به‌روزرسانی داده‌ها و ارزیابی مجدد مدل در صورت لزوم

بازآموزی مدل نباید بدون کنترل انجام شود. هر نسخه جدید باید روی مجموعه داده مستقل ارزیابی شود و تغییر عملکرد آن نسبت به نسخه قبلی مشخص باشد. در کاربردهای ایمنی‌محور، تغییر مدل و استفاده عملیاتی از آن باید دارای سابقه مستند، فرایند تأیید و امکان بازگشت به نسخه قبلی باشد. حلقه بازخورد موجب می‌شود سامانه به ابزاری صرفاً برای تولید هشدار تبدیل نشود، بلکه بتواند از نتایج واقعی بازرسی و نگهداری برای اصلاح فرایندهای تحلیل و تصمیم‌گیری استفاده کند.

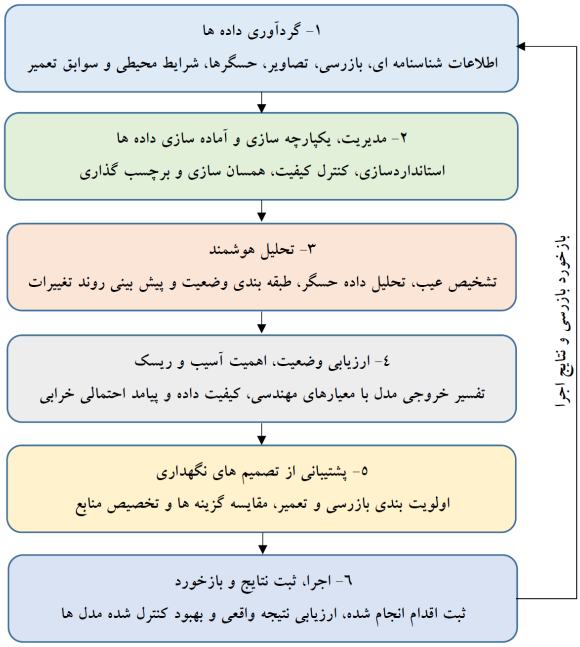
٤-٧- جمع‌بندی ساختار و خروجی لایه‌ها

جدول ۲ وظایف، ورودی‌ها و خروجی‌های مورد انتظار هر لایه را بطور خلاصه ارائه می دهد.

جدول ۲. ساختار و وظایف چارچوب یکپارچه پیشنهادی

لایه	ورودی‌های اصلی	وظایف کلیدی	خروجی مورد انتظار
گردآوری داده	اطلاعات شناسنامه‌ای، بازرسی، تصاویر، حسگرها، سوابق تعمیر	ثبت منظم داده، شناسه‌گذاری، ثبت زمان و شرایط برداشت	داده خام همراه با فراداده
مدیریت و آماده‌سازی	داده خام از منابع مختلف	استانداردسازی، کنترل کیفیت، پاک‌سازی، برچسب‌گذاری و مدیریت نسخه	پایگاه داده ساخت‌یافته و قابل ردیابی
تحلیل هوشمند	داده آماده‌شده و مسئله تعریف‌شده	تشخیص عیب، تحلیل حسگر، طبقه‌بندی و پیش‌بینی	خروجی مدل همراه با معیارهای اطمینان
ارزیابی وضعیت و ریسک	نتایج مدل، داده‌های مهندسی و اطلاعات مسیر	بررسی اعتبار، تفسیر عیب، ارزیابی وضعیت و پیامد	وضعیت پیشنهادی، سطح ریسک و اولویت بررسی
تصمیم‌یار نگهداری	وضعیت، ریسک، هزینه و محدودیت منابع	رتبه‌بندی گزینه‌ها، تحلیل سناریو و تخصیص منابع	برنامه پیشنهادی بازرسی و نگهداری
اجرا و بازخورد	تصمیم نهایی، اقدامات اجراشده و نتایج بعدی	ثبت نتایج، ارزیابی خطا و به‌روزرسانی کنترل‌شده	داده معتبرتر و بهبود تدریجی سامانه

این شش لایه به‌صورت یک چرخه عمل می‌کنند. داده‌های حاصل از اجرا و بازرسی‌های بعدی به پایگاه داده بازمی‌گردند و مبنای ارزیابی عملکرد مدل‌ها و اصلاح تصمیم‌های آینده قرار می‌گیرند. شکل ۱ چارچوب پیشنهادی مدیریت هوشمند پل‌ها و لایه‌های مختلف آن را نشان می‌دهد.



شکل ۱. چارچوب پیشنهادی مدیریت هوشمند پل‌ها

۵- الزامات و چالش‌های پیاده‌سازی در ایران

استقرار سامانه هوش مصنوعی برای مدیریت نگهداری پل‌ها، صرفاً یک پروژه نرم‌افزاری نیست، بلکه به هماهنگی میان نظام بازرسی، مدیریت دارایی، زیرساخت داده، تخصص مهندسی و فرایند تصمیم‌گیری نیاز دارد. در ایران، مناسب است اجرای این فناوری به‌صورت مرحله‌ای انجام شود و اولویت‌ها بر اساس نیاز واقعی شبکه پل‌ها، آمادگی داده‌ها و امکان ارزیابی نتایج تعیین شوند.

۵-۱- استانداردسازی اطلاعات و ایجاد پایگاه داده یکپارچه

یکی از مهم‌ترین الزامات، وجود ساختار مشترک برای ثبت اطلاعات پل و اجزای آن است. تفاوت در نام‌گذاری خرابی‌ها، مقیاس ارزیابی وضعیت، قالب گزارش‌های بازرسی و نحوه ثبت تعمیرات می‌تواند مانع تجمیع داده‌ها شود. بدون رفع این مشکل، آموزش مدل‌های قابل تعمیم دشوار خواهد بود. اقدام پیشنهادی، تدوین واژگان و فرم‌های استاندارد برای ثبت خرابی‌ها و تعریف شناسه یکتا برای پل و اعضای آن است. این استاندارد باید مشخص کند که هر خرابی با چه ویژگی‌هایی ثبت می‌شود، شدت آن چگونه تعیین می‌گردد، چه اطلاعاتی برای مقایسه دوره‌ای لازم است و مسئول ثبت و تأیید اطلاعات چه کسی است. همچنین لازم است اطلاعات تاریخی تا حد امکان به ساختار مشترک تبدیل شوند. این فرایند نباید با حذف سوابق یا یکسان‌سازی غیرمستند داده‌های متفاوت انجام شود؛ بلکه باید تفاوت‌های تاریخی حفظ و موارد نامطمئن مشخص شوند. در غیر این صورت، مدل ممکن است تفاوت شیوه ثبت اطلاعات را به‌عنوان تفاوت واقعی وضعیت پل یاد بگیرد.

۵-۲- کمبود داده‌های برچسب‌گذاری‌شده و کیفیت اطلاعات

داده‌های تصویری و حسگری زمانی برای آموزش مدل مناسب‌اند که برچسب‌های قابل اتکا داشته باشند. برای مثال، در تشخیص ترک، صرف وجود تصویر کافی نیست، باید مشخص باشد که تصویر مربوط به کدام عضو است، عیب در کدام ناحیه قرار دارد و برچسب آن با چه روشی تأیید شده است. برچسب‌های نادرست یا متناقض می‌توانند عملکرد مدل را کاهش دهند.

در ایران، یکی از مسیرهای عملی می‌تواند آغاز کار با تصاویر و گزارش‌های بازرسی موجود و انتخاب مجموعه‌ای محدود از پل‌ها برای برچسب‌گذاری دقیق باشد. در این فرایند، کارشناسان باید درباره تعریف انواع خرابی، نحوه ثبت شدت و شیوه حل اختلاف میان ارزیابان توافق داشته باشند. برای آموزش مدل‌های بخش‌بندی تصویری نیز باید مشخص شود که آیا تعیین مرز دقیق عیب از نظر هزینه و زمان توجیه دارد یا مدل تشخیص شیء برای هدف مورد نظر کفایت می‌کند. استفاده از داده‌های مصنوعی یا افزایش داده می‌تواند در برخی شرایط به آموزش کمک کند، اما جایگزین داده‌های واقعی و متنوع نیست. هر روش افزایش داده باید به‌گونه‌ای اعمال شود که ماهیت فیزیکی خرابی حفظ شود و عملکرد مدل در نهایت بر داده‌های مستقل و واقعی ارزیابی گردد.

۵-۳- تعمیم‌پذیری مدل‌ها به شرایط اقلیمی و سازه‌ای ایران

عملکرد مدل‌های هوش مصنوعی ممکن است تحت تأثیر تفاوت در نوع پل، مصالح، شرایط محیطی، روش ساخت، کیفیت نگهداری و شیوه تصویربرداری تغییر کند. مدلی که بر تصاویر یک منطقه یا نوع خاصی از پل آموزش دیده است، لزوماً در منطقه‌ای دیگر عملکرد مشابهی ندارد. به همین ترتیب، تغییرات دما و شرایط بهره‌برداری ممکن است بر داده‌های حسگر اثر بگذارد.

برای کاهش این مسئله، مجموعه داده‌ها باید تا حد امکان تنوع انواع پل، مصالح، اقلیم و شرایط برداشت را پوشش دهند. ارزیابی مدل نیز باید به‌گونه‌ای طراحی شود که بخشی از پل‌ها یا شرایط بهره‌برداری در مرحله آموزش حضور نداشته باشند. در صورت مشاهده افت عملکرد، باید مشخص شود که آیا مشکل از تغییر دامنه داده، کیفیت ورودی، تفاوت نوع عیب یا نقص در مدل ناشی شده است. در سامانه‌های حسگری، ثبت دما و شرایط بهره‌برداری و بررسی اثر آن‌ها بر رفتار اندازه‌گیری‌شده اهمیت ویژه‌ای دارد. مدل نباید هر تغییر در داده را آسیب تلقی کند، بلکه باید میان تغییرات طبیعی و تغییرات مشکوک به آسیب تمایز قائل شود.

۵-۴- اعتبارسنجی فنی و مدیریت عدم‌قطعیت

پیش از استفاده عملیاتی از مدل، باید معیارهای ارزیابی متناسب با مسئله تعریف شوند. در تشخیص عیب، معیارهایی مانند حساسیت، ویژگی، نرخ هشدار کاذب و در صورت استفاده از مدل تشخیص شیء، دقت تعیین محل عیب قابل استفاده‌اند. در پیش‌بینی وضعیت نیز باید خطای پیش‌بینی، توانایی تعمیم و پایداری مدل در دوره‌های زمانی مختلف بررسی شود.

یک مسئله مهم، تفاوت میان عملکرد آماری مدل و قابلیت استفاده مهندسی آن است. ممکن است مدلی در مجموع دقت بالایی داشته باشد، اما در تشخیص عیوب کم‌تعداد و پرخطر عملکرد مناسبی نداشته باشد. بنابراین، معیارهای ارزیابی باید اهمیت خطاهای مختلف را در نظر بگیرند. از دست دادن یک عیب بحرانی و تولید هشدار اضافی، پیامد یکسانی ندارند. همچنین لازم است خروجی مدل همراه با سطح اطمینان و وضعیت کیفیت داده ارائه شود. اگر ورودی خارج از محدوده‌ای باشد که مدل برای آن آموزش دیده است، سامانه باید امکان ارجاع به بررسی کارشناسی را فراهم کند. هیچ شاخص آماری به‌تنهایی تضمین‌کننده ایمنی پل نیست و استفاده از خروجی‌ها باید با ضوابط مهندسی و بررسی متخصصان همراه باشد.

۵-۵- زیرساخت پردازش، ذخیره‌سازی و ارتباطات

تصاویر با وضوح بالا، ویدئوها و داده‌های پیوسته حسگرها ممکن است حجم زیادی تولید کنند. ازاین‌رو، طراحی سامانه باید بر اساس حجم داده، تعداد پل‌ها، تناوب بازرسی، نیاز پردازشی و مدت نگهداری اطلاعات انجام شود. ذخیره‌سازی متمرکز، پشتیبان‌گیری، مدیریت دسترسی و امکان تبادل داده با سامانه‌های موجود از الزامات مهم هستند.

برای شروع، همه فرایندها لزوماً به پردازش بلادرنگ یا نصب تجهیزات پیشرفته نیاز ندارند. در کاربردهایی مانند تحلیل تصاویر بازرسی دوره‌ای، پردازش دسته‌ای می‌تواند کافی باشد. در مقابل، برای پل‌هایی که پایش پیوسته آن‌ها ضروری تشخیص داده می‌شود، زیرساخت ارتباطی و پردازش متناسب با نیاز عملیاتی باید در نظر گرفته شود.

انتخاب زیرساخت باید به‌صورت اقتصادی و متناسب با سطح خدمت مورد انتظار انجام شود. استفاده از تجهیزات گران‌قیمت بدون تعریف کاربرد مشخص، معیار عملکرد و برنامه نگهداری می‌تواند هزینه ایجاد کند، بدون آنکه بهبود قابل سنجشی در مدیریت پل به وجود آورد.

۵-۶- یکپارچگی سازمانی و بازطراحی فرایندهای کاری

سامانه هوش مصنوعی زمانی ارزش عملیاتی پیدا می‌کند که در فرایند واقعی بازرسی و نگهداری به کار گرفته شود. اگر نتایج مدل در سامانه‌ای جداگانه باقی بمانند و به سوابق پل، برنامه بازرسی و فرایند تخصیص منابع متصل نشوند، استفاده از آن‌ها محدود خواهد شد. لازم است نقش سازمان‌ها و کارشناسان در تولید داده، تأیید نتایج، تصمیم‌گیری، اجرای اقدامات و ثبت بازخورد روشن باشد. همچنین باید مشخص شود که چه کسی مجاز است نتیجه مدل را تأیید کند، چه شرایطی موجب درخواست بازرسی تکمیلی می‌شود و تصمیم‌های نهایی چگونه ثبت و مستند خواهند شد.

از نظر مدیریت تغییر، آموزش کاربران و مشارکت کارشناسان بازرسی در طراحی سامانه اهمیت دارد. اگر سامانه با نیازهای عملیاتی کاربران سازگار نباشد یا خروجی آن قابل فهم نباشد، احتمال استفاده محدود از آن افزایش می‌یابد. بنابراین، طراحی رابط کاربری، نمایش دلیل پیشنهادها و امکان ثبت نظر کارشناس باید بخشی از الزامات سامانه محسوب شود.

۵-۷- هزینه چرخه عمر و توجیه اقتصادی

ارزیابی اقتصادی سامانه نباید تنها به هزینه خرید نرم‌افزار، دوربین، حسگر یا تجهیزات پردازش محدود شود. هزینه تهیه و برچسب‌گذاری داده، آموزش نیروی انسانی، نگهداری زیرساخت، به‌روزرسانی مدل، کنترل کیفیت و مدیریت امنیت نیز باید در محاسبات لحاظ شوند. در مقابل، منافع احتمالی می‌توانند شامل کاهش زمان تحلیل تصاویر، هدفمندتر شدن بازرسی‌ها، کاهش نیاز به دسترسی‌های پرخطر، بهبود اولویت‌بندی و استفاده مناسب‌تر از بودجه نگهداری باشند. با این حال، میزان این منافع به کاربرد و شرایط اجرا وابسته است و نباید پیش از اجرای مطالعه موردی قطعی فرض شود.

برای ارزیابی اقتصادی، مناسب است وضعیت پایه پیش از استقرار ثبت شود، از جمله زمان انجام بازرسی، هزینه هر بازرسی، تعداد هشدارهای نادرست، میزان نیاز به بازرسی مجدد و زمان تصمیم‌گیری. سپس این شاخص‌ها در دوره آزمایشی با نتایج سامانه مقایسه شوند. چنین رویکردی امکان می‌دهد تصمیم درباره توسعه سامانه بر مبنای شواهد واقعی اتخاذ شود.

۵-۸- امنیت اطلاعات، مسئولیت حرفه‌ای و شفافیت تصمیم

اطلاعات فنی پل‌ها و زیرساخت‌های حمل‌ونقل باید با سطح دسترسی مشخص و سازوکارهای مناسب حفاظت از داده مدیریت شوند. ثبت تاریخچه تغییرات، پشتیبان‌گیری، کنترل دسترسی کاربران و ثبت نسخه مدل‌های مورد استفاده، برای قابلیت ردیابی تصمیم‌ها ضروری است. از منظر مسئولیت حرفه‌ای، باید مشخص باشد که سامانه در چه شرایطی صرفاً پیشنهاد ارائه می‌کند و چه مواردی الزاماً به بررسی متخصص نیاز دارند. مدل نباید بدون نظارت انسانی مبنای تصمیم‌های حساس مانند اعلام ایمنی سازه، محدودیت بهره‌برداری یا رفع محدودیت ترافیکی قرار گیرد. همچنین لازم است خروجی‌های سامانه تا حد امکان قابل توضیح باشند؛ به این معنا که کاربر بتواند داده‌ها، معیارها و دلایل اصلی پیشنهاد را بررسی کند.

۵-۹- اولویت‌بندی اجرای سامانه در ایران

با توجه به تنوع نیازها و محدودیت منابع، اجرای یکباره همه قابلیت‌های هوش مصنوعی در شبکه پل‌ها توصیه نمی‌شود. مناسب است ابتدا کاربردهایی انتخاب شوند که داده‌های لازم برای آن‌ها موجود یا با هزینه قابل قبول قابل تهیه است و نتایج آن‌ها را می‌توان به‌صورت روشن ارزیابی کرد. در گام نخست، استانداردسازی داده‌های بازرسی و تحلیل تصاویر موجود می‌تواند اولویت داشته باشد. در گام بعد، مدل‌های پیش‌بینی وضعیت و تحلیل سوابق تاریخی برای پل‌هایی که داده کافی دارند توسعه داده شوند. نصب حسگرهای دائمی و استفاده از مدل‌های پیچیده‌تر باید بر اساس اهمیت پل، نیاز واقعی به پایش مستمر و امکان تأمین هزینه چرخه عمر انجام شود.

۵-۱۰- الگوریتم‌های پیشنهادی برای کاربرد در ایران

پیشنهاد الگوریتم باید بر اساس نوع داده و کاربرد انجام شود. برای شرایط ایران، به‌ویژه در مراحل آغازین که ممکن است داده‌های حسگری پیوسته و مجموعه‌های آموزشی بزرگ در دسترس نباشند، بهتر است ابتدا از روش‌هایی استفاده شود که با داده‌های موجود قابل ارزیابی‌اند و امکان مقایسه و تفسیر نتایج را فراهم می‌کنند. مدل‌های پیچیده‌تر باید زمانی به کار گرفته شوند که داده، زیرساخت و ضرورت عملیاتی آن‌ها فراهم شده باشد.

الف) تشخیص عیوب در تصاویر بازرسی

برای شروع، مدل‌های CNN و مدل‌های تشخیص شیء از خانواده YOLO گزینه‌های قابل بررسی برای شناسایی ترک، پوسته‌شدگی و برخی عیوب سطحی هستند. مزیت این رویکرد آن است که می‌توان آن را بر روی تصاویر موجود بازرسی آزمود و میزان کاهش زمان غربالگری تصاویر را اندازه‌گیری کرد. در کاربردهایی که تعیین دقیق شکل و گستره ترک اهمیت دارد، U-Net یا روش‌های بخش‌بندی مشابه می‌توانند در مرحله بعد بررسی شوند. انتخاب میان مدل‌ها باید با آزمون روی تصاویر واقعی پل‌های ایران انجام شود. معیار تصمیم نباید فقط سرعت یا دقت کلی باشد؛ بلکه حساسیت در تشخیص عیوب مهم، نرخ هشدار کاذب، نیاز به بازبینی انسانی و عملکرد مدل روی پل‌های جدید نیز باید بررسی شود.

ب) تحلیل سوابق بازرسی و پیش‌بینی وضعیت

برای داده‌های جدولی، مانند سوابق بازرسی، ویژگی‌های پل، نوع خرابی، وضعیت اعضا و سوابق تعمیر، جنگل تصادفی و XGBoostگزینه‌های اولیه مناسبی برای ارزیابی هستند. این مدل‌ها می‌توانند روابط غیرخطی میان متغیرها را بررسی کنند و در مقایسه با برخی مدل‌های عمیق، معمولاً به آماده‌سازی زیرساخت محاسباتی ساده‌تری نیاز دارند. البته استفاده از آن‌ها برای پیش‌بینی وضعیت آینده مستلزم وجود داده‌های تاریخی سازگار و تعریف دقیق متغیر هدف است. اگر فقط یک ارزیابی مقطعی از هر پل موجود باشد، نمی‌توان صرفاً با اجرای یک مدل ادعا کرد که روند زوال یا عمر باقیمانده پل پیش‌بینی شده است. در این حالت، کاربرد مناسب‌تر می‌تواند طبقه‌بندی وضعیت یا شناسایی عوامل مرتبط با وضعیت نامطلوب باشد.

ج) تحلیل داده‌های حسگر و شناسایی ناهنجاری

برای پل‌هایی که داده‌های حسگری پیوسته یا دوره‌ای دارند، پیشنهاد می‌شود ابتدا روش‌های آماری و مدل‌های پایه برای شناخت الگوی عادی داده و تشخیص خطاهای حسگر به کار گرفته شوند. پس از شناخت رفتار داده، خودرمزگذارها یا مدل‌های زمانی مانند LSTM می‌توانند برای شناسایی ناهنجاری و پیش‌بینی روند تغییرات ارزیابی شوند. استفاده از مدل‌های پیچیده زمانی توجیه دارد که حجم، تداوم و کیفیت داده کافی باشد. همچنین لازم است اثر دما، بار ترافیکی و تغییر شرایط بهره‌برداری در تحلیل لحاظ شود تا هشدارهای ناشی از تغییرات عادی کاهش یابند.

د) تحلیل ارتباط میان اجزای سازه

شبکه‌های عصبی گرافی (GNN) می‌توانند برای مدل‌سازی ارتباط میان اعضای سازه یا حسگرها بررسی شوند، زیرا ساختار پل را می‌توان به‌صورت مجموعه‌ای از اجزا و روابط میان آن‌ها نمایش داد. با این حال، کاربرد عملی این روش به وجود مدل ارتباطی مناسب و داده کافی نیاز دارد. ازاین‌رو، GNN بهتر است در مرحله پژوهشی یا برای پل‌هایی با اطلاعات هندسی و حسگری مناسب ارزیابی شود و در آغاز به‌عنوان الگوریتم عمومی همه پل‌ها در نظر گرفته نشود.

هـ) اولویت‌بندی و بهینه‌سازی برنامه نگهداری

برای رتبه‌بندی پل‌ها و گزینه‌های تعمیر، روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره مانند AHP و TOPSIS می‌توانند به‌عنوان ابزارهای شفاف و قابل بررسی مورد استفاده قرار گیرند. در مرحله بعد، برای برنامه‌ریزی نگهداری در سطح شبکه و تخصیص منابع محدود، الگوریتم ژنتیک یا سایر روش‌های بهینه‌سازی قابل بررسی‌اند. این روش‌ها به داده‌های معتبر درباره وضعیت، ریسک، هزینه و محدودیت‌های اجرایی نیاز دارند و باید با معیارهای تصمیم‌گیری مورد تأیید سازمان بهره‌بردار تنظیم شوند.

و) ترنسفورمرهای بینایی و مدل‌های پیشرفته

مدل‌های ViT و معماری‌های جدید یادگیری عمیق می‌توانند در صورت وجود مجموعه‌داده بزرگ‌تر یا امکان استفاده از مدل‌های ازپیش‌آموزش‌دیده بررسی شوند. با این حال، استفاده از این مدل‌ها باید پس از ایجاد خط مبنای معتبر با روش‌های ساده‌تر صورت گیرد. اگر مدل پیچیده‌تر بهبود معناداری در تشخیص عیوب مهم یا کاهش هزینه عملیاتی ایجاد نکند، پیچیدگی و هزینه بیشتر آن توجیه نخواهد داشت. جدول ۳، پیشنهاد مرحله‌ای الگوریتم‌ها را برای کاربردهای اصلی بطور خلاصه ارائه می نماید.

جدول ۳. الگوریتم‌های پیشنهادی برای کاربردهای هوش مصنوعی در مدیریت پل‌های ایران

کاربرد	الگوریتم‌های پیشنهادی برای شروع	گزینه‌های پیشرفته‌تر	شرط اصلی استفاده
غربالگری تصاویر و تشخیص عیوب سطحی	CNN و YOLO	مدل‌های پیشرفته تشخیص شیء و ViT	تصاویر متنوع و برچسب‌گذاری کارشناسی
اندازه‌گیری شکل و گستره عیب	U-Net و روش‌های بخش‌بندی	معماری‌های بخش‌بندی مبتنی بر ترنسفورمر	نیاز به اندازه‌گیری دقیق و وجود برچسب پیکسلی
طبقه‌بندی وضعیت بر اساس سوابق بازرسی	جنگل تصادفی و SVM	XGBoost و روش‌های ترکیبی	داده جدولی معتبر و تعریف روشن وضعیت هدف
پیش‌بینی وضعیت آینده	مدل‌های پایه رگرسیونی و XGBoost	LSTM و سایر مدل‌های زمانی	داده تاریخی کافی و سازگار
تشخیص ناهنجاری در داده‌های حسگر	روش‌های آماری و خودرمزگذار	LSTM و مدل‌های ترکیبی چندمتغیره	داده حسگری پیوسته و اطلاعات محیطی
تحلیل ارتباط اعضا و حسگرها	مدل‌سازی گراف و روش‌های پایه	GNN	اطلاعات ارتباطی سازه و داده کافی
رتبه‌بندی پل‌ها و گزینه‌های نگهداری	AHP و TOPSIS	روش‌های تصمیم‌گیری ترکیبی	معیارها و وزن‌های مستند
بهینه‌سازی بودجه و برنامه نگهداری	روش‌های بهینه‌سازی پایه	الگوریتم ژنتیک و روش‌های فراابتکاری	اطلاعات هزینه، قیود اجرایی و تابع هدف روشن

بر این اساس، پیشنهاد اصلی برای ایران، آغاز کار با "مدل‌های تشخیص تصویری، الگوریتم‌های یادگیری ماشین برای داده‌های جدولی و روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره" است. این ترکیب امکان می‌دهد بدون وابستگی اولیه به سامانه‌های حسگری گسترده، از اطلاعات موجود بهره‌برداری شود. مدل‌های زمانی، GNN و معماری‌های پیشرفته‌تر تصویری باید در مرحله‌های بعد و بر اساس نیاز و آمادگی داده توسعه یابند.

۶- نتیجه‌گیری

بررسی مطالعات و تحلیل کاربردهای هوش مصنوعی نشان می‌دهد که این فناوری می‌تواند در مراحل مختلف مدیریت پل، از گردآوری و تحلیل داده‌های بازرسی تا تشخیص عیوب، ارزیابی وضعیت، پیش‌بینی تغییرات و اولویت‌بندی نگهداری، نقش مکملی ایفا کند. با این حال، ارزش عملی هوش مصنوعی تنها به دقت یک الگوریتم وابسته نیست؛ بلکه به کیفیت داده، قابلیت تعمیم مدل، نحوه تفسیر خروجی‌ها و ارتباط آن‌ها با تصمیم‌های فنی و مدیریتی بستگی دارد.

در این مقاله، چارچوبی یکپارچه با شش لایه گردآوری داده، مدیریت و آماده‌سازی داده، تحلیل هوشمند، ارزیابی وضعیت و ریسک، پشتیبانی از تصمیم‌های نگهداری و بازخورد حاصل از اجرا ارائه شد. این چارچوب، تشخیص الگوریتمی را از تصمیم مدیریتی متمایز می‌کند و مسیر انتقال اطلاعات از مرحله گردآوری تا اقدام نگهداری و ارزیابی نتایج را مشخص می‌سازد. مزیت این رویکرد آن است که خروجی مدل‌ها به‌صورت مستقل و بدون زمینه مهندسی مورد استفاده قرار نمی‌گیرد، بلکه در ارتباط با وضعیت عضو، پیامد احتمالی خرابی، محدودیت منابع و نیاز به بازرسی تکمیلی تفسیر می‌شود.

از نظر انتخاب الگوریتم، نتایج تحلیل نشان می‌دهد که روش‌های مختلف باید متناسب با نوع داده و هدف کاربرد به کار گرفته شوند. مدل‌های تشخیص تصویری مانند CNN و YOLO برای غربالگری تصاویر و شناسایی عیوب سطحی قابل بررسی‌اند. U-Net و روش‌های مشابه برای تعیین دقیق‌تر مرز عیب کاربرد دارند. جنگل تصادفی و XGBoost می‌توانند در تحلیل سوابق بازرسی و داده‌های جدولی نقطه شروع مناسبی باشند و مدل‌های زمانی یا خودرمزگذارها برای داده‌های حسگری، در صورت وجود داده کافی قابل ارزیابی هستند. در سطح مدیریت شبکه نیز AHP، TOPSIS و الگوریتم‌های بهینه‌سازی می‌توانند در رتبه‌بندی و برنامه‌ریزی اقدامات نگهداری به کار روند. این پیشنهادها به معنای برتری قطعی الگوریتم‌های مذکور نیستند، بلکه مسیرهایی برای شروع ارزیابی در شرایط داده‌ای و اجرایی ایران فراهم می‌کنند.

برای پیاده‌سازی در ایران، استانداردسازی اطلاعات پل‌ها، توسعه مجموعه‌داده‌های بومی، تعریف معیارهای روشن اعتبارسنجی، اتصال خروجی مدل‌ها به سامانه‌های مدیریت پل و آموزش

نیروی انسانی باید در اولویت قرار گیرند. همچنین اجرای مرحله‌ای، از کاربردهای کم‌هزینه‌تر و قابل ارزیابی آغاز شود و گسترش آن به پایش حسگری پیشرفته و مدل‌های پیچیده‌تر بر اساس نتایج واقعی صورت گیرد. در همه مراحل، تصمیم‌های مرتبط با ایمنی باید با نظارت کارشناسی، مستندسازی و رعایت ضوابط مهندسی همراه باشند.

در نهایت، پیشنهاد می‌شود نخست یک طرح آزمایشی در مجموعه‌ای منتخب از پل‌ها اجرا شود. در این طرح، عملکرد مدل‌های تصویری و یادگیری ماشین بر مبنای داده‌های واقعی ارزیابی و نتایج با فرایند متداول بازرسی و نگهداری مقایسه شود. شاخص‌هایی مانند زمان تحلیل، کیفیت تشخیص، نرخ هشدار کاذب، میزان نیاز به بازرسی تکمیلی و هزینه عملیاتی می‌توانند مبنای تصمیم درباره توسعه سامانه قرار گیرند. توسعه هوش مصنوعی در مدیریت پل‌ها زمانی توجیه‌پذیر است که به بهبود قابل سنجش کیفیت اطلاعات، تصمیم‌های نگهداری و استفاده از منابع منجر شود.

۷-مراجع

-رضویان امرئی، سیدعلی و حاجی‌زاده امینی، امین (۱۴۰۰). جانمایی بهینه حسگرها جهت پایش سلامت سازه پل‌ها با استفاده از الگوریتم ژنتیک. مهندسی سازه و ساخت، ۸(۶)، ۵-۲۳.

doi.org/10.22065/JSCE.2020.201830.1948

-ترابی، محمدصادق، قدرتی، غلامرضا و درویشان، احسان (۱۴۰۰). پایش سلامت پل‌ها با استفاده از داده‌های موجود بر مبنای یادگیری عمیق. *مهندسی سازه و ساخت، ۸(۵۳)*، ۴۵۹-۴۷۷.

-غلامی، مهران، پوریاری، مقصود و گواشیری، زهرا (۱۴۰۵). مطالعه تطبیقی کاربرد هوش مصنوعی در نگهداری و پایش سلامت پل‌ها. گزارش پژوهشی. مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی.

-AASHTO. (2019). Manual for bridge element inspection *(*2nd ed.). *American Association of State Highway and Transportation Officials.*

-Ataei, S., Ataei, S. T., Rahmani, Z., Ghajari, E., Mohammadagha, M., Khodadadi, N., et al. (2026). Artificial intelligence in bridge structural health monitoring: A comprehensive systematic analysis of methods, models, and applications. *Archives of Computational Methods in Engineering, 33*, 7507–7538. **doi.org/10.1007/s11831-026-10566-y**

-Cha, Y. J., Choi, W., & Büyüköztürk, O. (2017). Deep learning-based crack damage detection using convolutional neural networks. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering, 32*(5), 361–378. **doi.org/10.1111/mice.12263**

-Chu, H., Deng, L., Yuan, H., Long, L., & Guo, J. (2024). A transformer and self-cascade operation-based architecture for segmenting high-resolution bridge cracks. *Automation in Construction, 158*, Article 105194. **doi.org/10.1016/j.autcon.2023.105194**

-Di Mucci, V. M., Cardellicchio, A., Ruggieri, S., Nettis, A., Renò, V., & Uva, G. (2024). Artificial intelligence in structural health management of existing bridges. *Automation in Construction, 167*, Article 105719. **doi.org/10.1016/j.autcon.2024.105719**

-Federal Highway Administration. (2023). *Bridge preservation guide*. U.S. Department of Transportation.

-Federal Highway Administration. (2025). Methodology for bridge asset management decision-making. *U.S. Department of Transportation.*

-Luo, K., Kong, X., Zhang, J., Hu, J., Li, J., & Tang, H. (2023). Computer vision-based bridge inspection and monitoring: A review. *Sensors, 23*(18), Article 7863. **doi.org/10.3390/s23187863**

-Ma, K., Meng, X., Hao, M., Huang, G., Hu, Q., & He, P. (2023). Research on the efficiency of bridge crack detection by coupling deep learning frameworks with convolutional neural networks. *Sensors, 23*(16), Article 7272. **doi.org/10.3390/s23167272**

Structural Engineering, 146(5). **doi.org/10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0002535**

-Xu, D., Xu, X., Forde, M. C., & Caballero, A. (2023). Concrete and steel bridge structural health monitoring—Insight into choices for machine learning applications. *Construction and Building Materials, 402*, Article 132596. **doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.132596**

-Yeum, C. M., & Dyke, S. J. (2015). Vision-based automated crack detection for bridge inspection. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering, 30*(10), 759–770. **doi.org/10.1111/mice.12141**

-Zinno, R., Shaffiee Haghshenas, S., Guido, G., Rashvand, K., Vitale, A., & Sarhadi, A. (2023). The state of the art of artificial intelligence approaches and new technologies in structural health monitoring of bridges. *Applied Sciences, 13*(1), Article 97. **doi.org/10.3390/app13010097**

-Shahin, M., Chen, F. F., Maghanaki, M., Hosseinzadeh, A., Zand, N., & Khodadadi Koodiani, H. (2024). Improving the concrete crack detection process via a hybrid visual transformer algorithm. *Sensors, 24*(10), Article 3247. **doi.org/10.3390/s24103247**

-Sonbul, O. S., & Rashid, M. (2023a). Algorithms and techniques for the structural health monitoring of bridges: Systematic literature review. *Sensors, 23*(9), Article 4230. **doi.org/10.3390/s23094230**

-Sonbul, O. S., & Rashid, M. (2023b). Towards the structural health monitoring of bridges using wireless sensor networks: A systematic study. *Sensors, 23*(20), Article 8468. **doi.org/10.3390/s23208468**

-Sun, L., Shang, Z., Xia, Y., Bhowmick, S., & Nagarajaiah, S. (2020). Review of bridge structural health monitoring aided by big data and artificial intelligence: From condition assessment to damage detection. *Journal of*

An Integrated Framework for Applying Artificial Intelligence to Bridge Health Monitoring and Maintenance Management: Emphasis on Implementation Requirements in Iran

Mehran Gholami, *Assistant Professor, Road, Housing and Urban Development Research Center, Tehran, Iran.*

Moghsood Pouryari, Assistant Professor, Road, Housing and Urban Development Research Center, Tehran, Iran.

E-mail: m.gholami@bhrc.ac.ir

Received: May 2026- Accepted: November 2026

ABSTRACT

Bridges are critical infrastructure assets, and their safety, serviceability, and durability depend on effective inspection, condition assessment, and maintenance planning. Artificial intelligence (AI) can support damage detection, structural condition assessment, deterioration prediction, and maintenance prioritization by analyzing images, sensor data, inspection findings, and maintenance records. However, effective implementation requires integrated data and a clear link between technical analysis and management decisions. This study aims to analyze and compare the main applications of AI in bridge health monitoring and maintenance management and to propose a conceptual framework tailored to the needs of Iran's road network. The research adopts an analytical and comparative review of scientific and technical literature and examines major families of AI algorithms. The proposed framework comprises six interconnected layers: data collection; data management and preprocessing; intelligent analysis; condition and risk assessment; maintenance decision support; and implementation feedback. The findings indicate that computer vision can support the detection of visible defects, machine learning and deep learning can facilitate sensor-data analysis and the identification of damage patterns, and optimization and multi-criteria decision-making methods can help prioritize maintenance interventions. Key prerequisites for implementation in Iran include standardizing inspection data, developing reliable datasets, integrating existing information systems, evaluating models under local conditions, and retaining expert involvement in safety-related decisions. The proposed framework provides a conceptual basis for designing and evaluating integrated decision-support systems for bridge maintenance.

Keywords: Artificial Intelligence, Structural Health Monitoring, Bridge Maintenance Management, Predictive Maintenance, Road Asset Management