تعمیر و نگهداری هوشمند زیرساخت راهی برای کاهش سوانح ریلی

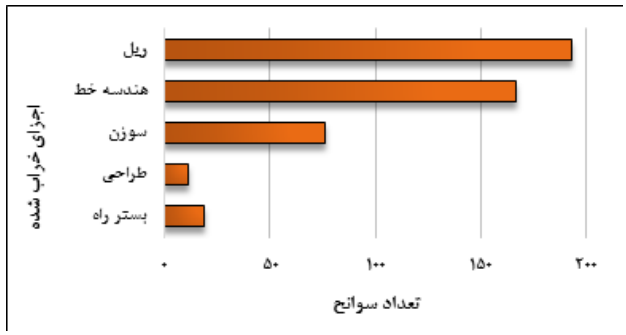
نقش حیاتی و تأثیرگذار راه‌آهن در رشد و توسعه اقتصادی- اجتماعی کشورها ازیک‌طرف و هزینه‌های بالای نوسازی و تعمیر زیرساخت‌های آن از طرف دیگر، وجود یک سامانه جامع مدیریت نگهداری و تعمیر خطوط را به یک ضرورت تبدیل کرده است تا ضمن نگهداری سطح سرویس، قابلیت اعتماد و ایمنی خط در یک حد مطلوب، هزینه‌های نگهداری را حداقل کند. مدل‌سازی مناسب زوال خط، به‌عنوان یکی از اجزای تشکیل‌دهنده این سامانه بسیار حائز اهمیت است. بدین منظور، لازم است از فناوری‌های نوین در این حوزه بهره گرفت. یکی از زمینه‌های هوش مصنوعی که علاقه دانشمندان را به خود جلب کرد، موضوع یادگیری ماشین بوده است. یادگیری ماشینی با مطالعه و ساخت مدل‌هایی قادر به "یادگیری" از تعداد زیادی داده است. در این مقاله به کاربرد یادگیری ماشین در تعمیر و نگهداری زیرساخت راه‌آهن پرداخته شده است.

مهدی عبدالملکی
کارشناس حمل‌ونقل

حانیه جابری
دانشجوی کارشناسی ارشد خط و سازه‌های ریلی

همان‌طورکه خط مهم‌ترین مؤلفه زیرساخت راه‌آهن است، هندسه خط نیز تأثیر قابل‌توجهی در خطوط ریلی دارد و راحتی و ایمنی سفر با بالا رفتن عمر و افزایش تعداد عبور قطارکاهش می‌یابد. به‌منظور حفظ کیفیت هندسه خط، فعالیت‌های نگهداری و تعمیر انجام می‌شود. لازم به ذکر است اگر به بررسی عیوب ایجادشده مانند تغییر شکل خط و یافتن روش‌های رفع آن عیوب پرداخته نشود، این فعالیت‌ها بی‌اثر خواهند شد. خرابی‌های هندسی، درعین‌حال که به ناوگان و کالاهای موجود در قطار آسیب می‌رساند، راحتی سفر را نیز تحت تأثیر قرار خواهد داد؛ بنابراین پیش‌بینی این نقایص در مراحل اولیه ممکن است از سوانح فاجعه‌بار جلوگیری کند.

مطابق شکل زیر، بر اساس تحقیقات به‌دست‌آمده از اداره راه‌آهن فدرال ایالات‌متحده آمریکا خرابی‌های هندسی خطوط و خرابی‌های ریل بزرگ‌ترین علت خروج از خط قطار در ایالات‌متحده آمریکا است.



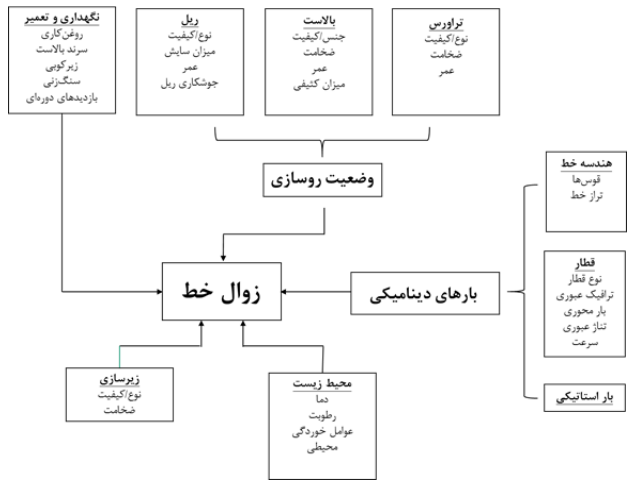
به‌طورکلی، نقایص خطوط ریلی را می‌توان به خرابی‌های سازه‌ای و خرابی‌های هندسی خط تقسیم کرد. خرابی‌های هندسی خط مانند دیلم، پیچش، تنگی یا گشادی عرض خط، اضافه یا کسری دور و افتادگی، از انحراف معیار پارامترهای هندسی ریل که طراحی بر اساس آن‌ها انجام شده‌است مشخص می‌شود. خرابی سازه‌ای، عیوب مربوط به خرابی ساختاری اجزای خط مانند ریل، بالاست، اتصالات و ... را توصیف می‌کند. عیوب ریل می‌تواند در بخش‌های مختلف خط راه‌آهن توسعه یابد و بنابراین آن‌ها به روش‌های مختلفی توسط محققان طبقه‌بندی‌شده‌اند. بااین‌حال، باید توجه داشت که نه‌تنها خرابی‌های هندسی خط، یکی از اصلی‌ترین عوامل سوانح هستند و مستقیماً بر ایمنی شبکه راه‌آهن تأثیر می‌گذارند، بلکه می‌توانند منجر به ایجاد عیوب سازه‌ای نیز شوند.

بازرسی خط

خطوط راه‌آهن باید به‌صورت دوره‌ای بازرسی شود. روش‌ها و ابزارهای غیر مخرب متعددی در صنعت راه‌آهن برای بررسی شرایط ریل‌های راه‌آهن و جمع‌آوری داده‌ها مورداستفاده قرار می‌گیرند. این تکنیک‌ها شامل بازرسی دستی، دستگاه‌های مافوق صوت، دوربین‌های ویدیویی با وضوح‌بالا، دوربین‌های لیزری سه‌بعدی، بازرسی جریان گردابی، نشت شار مغناطیسی و غیره هستند بااین‌حال، در سال‌های اخیر، سیستم‌های بازرسی بصری و به‌ویژه دوربین‌های ویدیویی به یکی از مهم‌ترین و مؤثرترین ابزارهای بازرسی برای پایش خودکار و انعطاف‌پذیر ریل تبدیل‌شده‌اند. دوربین‌های ویدیویی نصب‌شده بر روی قطارهای ویژه می‌توانند تصاویر با وضوح‌بالا از خطوط راه‌آهن را از زوایای مختلف بگیرند. در این حالت، تعداد زیادی از تصاویر جمع‌آوری می‌شوند که بعداً می‌تواند برای آموزش الگوریتم‌های یادگیری ماشین برای تشخیص بی‌قاعدگی‌ها در خطوط ریلی مورد استفاده قرار گیرد. بااین‌حال، استقرار دوربین‌های ویدئویی در مقیاس بزرگ می‌تواند برخی از چالش‌های فنی را ارائه دهد زیرا آن‌ها به یک زیرساخت کلیدی برای ذخیره‌سازی کارآمد و پردازش داده‌های جاری نیاز دارند. برای مثال، هرسال دوربین‌های ویدئویی تقریباً ۱۰ ترابایت داده تصویری را در سیستم راه‌آهن هلند جمع‌آوری می‌کنند. علاوه بر این، وجود برخی از باقیمانده‌ها مانند نفت و گردوغبارکه ممکن است در تصاویر جمع‌آوری‌شده وجود داشته باشند، می‌تواند تأثیر منفی بر عملکرد الگوریتم‌های یادگیری ماشین داشته باشد.

عوامل مؤثر بر زوال خط

زوال خط فرآیندی پیچیده می‌باشد که عوامل متعددی همچون بارمحوری، سرعت ترافیک عبوری، ویژگی‌های خط، شرایط آب و هوایی و توپوگرافی منطقه بر مکانیزم آن تأثیرگذارند. در شکل زیر عوامل مؤثر بر زوال خط مشاهده می‌شود.



عوامـل فیزیکی می‌تواند بر نرخ زوال تأثیرگذار باشـد. بر این اسـاس سـه پارامتـر نیروهای دینامیکی، بارمحوری و سـرعت قطار سـبب کاهش کیفیت خط می‌شـوند. ازآنجایی‌که در سـرعت‌های بالا نیروهای دینامیکی افزایش و در سـرعت‌های پایین این نیروها کاهش می‌یابند؛ این سـرعت درروند زوال تأثیرگذار اسـت. بارگذاری سـازه‌ای خط سـبب افزایش خستگی چرخ و کرنش ریل و تراورس می‌شود. درنتیجه آن، ترک‌خوردگی ریل، فرسایش کلاهک ریل، شـل شـدگی سیسـتم اتصالات ریل و به هم خوردن آرایش بالاست صورت می‌گیرد. این شرایط منجر به کاهش راحتی و ایمنی سیر، افزایش زوال اجزای خط و تأخیر درحرکت قطارها می‌گردد.

نگهداری و تعمیرات خطوط آهن

در ایالات متحده آمریکا بودجه سالانه برای راه‌آهن حدود ۱۵ میلیارد دلار اسـت. یک سانحه در راه‌آهن غالباً بسیار ویران‌کننده و گاه کشنده است. فقط در ایالات‌متحده، حوادث ناشی از سیستم ریلی ۳۰-۴۰٪ ازکل تصادفات دهه گذشته را تشکیل می‌دهد. در سال ۲۰۱۸، هزینه‌های نگهداری و تعمیر راه‌آهن در اتحادیه اروپا حدودا ۲۰/۶ میلیارد یورو تخمین زده شـد، که بیش از نیمی ازکل هزینه‌های زیرساخت راه‌آهن را شامل می‌شد. راه‌آهن یکی از بادوام‌ترین دارایی‌های هرکشـور اسـت و حتی پیشـرفت‌های جزئی در هزینه نگهداری و تعمیر می‌تواند اثرات قابل‌توجهی برکل هزینه‌های چرخه عمر داشـته باشـد. بنابرایـن، یـک سیسـتم مدیریت نگهداری بـرای اطمینـان از عملکرد صحیح سیسـتم زیرسـاخت ریلی ضروری اسـت. فرآیندهای برنامه‌ریزی و زمان‌بندی در هسته بهبود عملکرد مدیریت نگهداری قرار دارند. صاحبان زیرساخت‌های راه‌آهن و پیمانکاران نگهداری و تعمیر به ابزارها و مدل‌های تصمیم‌گیری برای برنامه‌ریزی مؤثر منابع و حفظ خط با برنامه‌ریزی دقیق نیاز دارند.

سیاسـت نگهداری به تصمیم مدیریتی یا دوره عمل پیشنهادشـده توسط مدل‌های نگهداری اشاره دارد تا اطمینان حاصل شود که سیستم وظایف خود را انجام می‌دهد. دو نوع اصلی سیاست تعمیر و نگهداری عبارتند از:

نگهداری و تعمیر پیشگیرانه

نگهـداری پیشـگیرانه را می‌توان بـه دو گروه از پیش تعیین‌شـده و مبتنی بر شـرایط تقسـیم کرد. بازه‌های زمانی از پیش تعیین‌شده اقدامات مربوط به نگهداری و تعمیر را بدون در نظرگرفتن شرایط دارایی کنترل می‌کند. بااین‌حال، محققـان معمولاً نگهداری از پیش تعیین‌شـده را به‌عنوان نگهداری مبتنی بر زمان تعریف می‌کنند. در سیاست نگهداری مبتنی بر شرایط، شرایط اندازه‌گیری شـده اقدامات را هدایت می‌کنند. بنابراین، مشـاهدات شـرایط دارایی پایه و اسـاس برنامه مداخله نگهداری هستند. نگهداری و تعمیر مبتنی بر شرایط به دو دسته پیشگویانه و غیر پیشگویانه تقسیم می‌شود، بسته به این‌که تصمیم نگهداری و تعمیر شامل پیش‌بینی زوال باشد یا خیر.

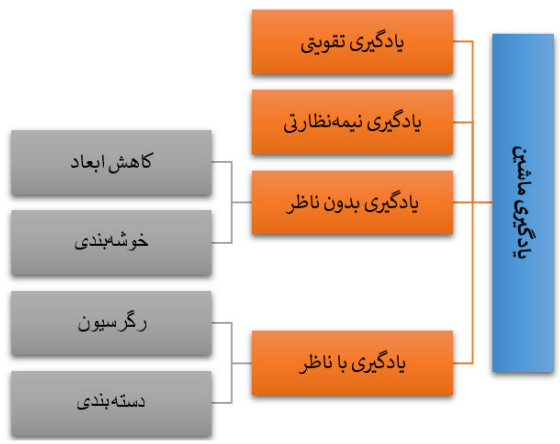
نگهداری و تعمیر اصلاحی

طبـق اسـتاندارد EN ۱۳۳۰۶، نگهداری و تعمیر اصلاحی پس از شـناخت خرابـی انجام می‌شـود و مقصود آن قـرار دادن یک آیتم در حالتی اسـت که بتواند کارکرد لازمش را داشته باشد. فعالیت‌های نگهداری و تعمیر پیشگیرانه زمان‌بر هسـتند، درحالی‌که فعالیت‌های نگهـداری و تعمیر اصلاحی این‌گونه نیسـتند. بنابراین، نگهداری برنامه‌ریزی‌شـده یا برنامه‌ریزی نشده یک اصطلاح دیگر است که محققان از آن برای اجتناب از پیچیدگی‌های برنامه‌ریزی نگهداری و تعمیر اصلاحی استفاده می‌کنند.

هدف از نگهداری پیشگیرانه و اصلاحی بازگرداندن یک ویژگی، مانند کیفیت خط، به سـطح عملیاتی مطلوب است. اقدامات نگهداری شامل تعمیر کامل تا تعمیر جزئی را شامل می‌شود. محققان نگهداری و تعمیر کامل را جایگزین کـردن تمـام اجزای یک بخش از یک خط راه‌آهـن با اجزای جدید یا جایگزین کـردن تنها یک جز خط تعریـف کرده‌اند. فعالیت‌های نگهداری و تعمیر جزئی در اجزای مختلف خط راه‌آهن شـامل زیرکوبی بالاسـت، سنگ‌زنی ریل، سرند بالاسـت، و کارهای نگهداری و تعمیر معمول کوچک اسـت. نگهداری حداقل یک اقدام اصلاحی اسـت زمانی که یک خرابی وجود دارد، و شـرایط فراتر از شرایط دارایی قبل از خرابی را بهبود نمی‌دهد. لازم به ذکر است، برخی اقدامات نگهداری و تعمیر حتی منجر به بدتر شـدن شـرایط می‌شـود. به‌عنوان‌مثال، زیرکوبی بیش‌ازحد بالاسـت باعث می‌شـود ذرات بالاسـت شکسـته شـوند، درنتیجه شرایط زیرساخت خط نامطلوب‌تر شود.

تعریف یادگیری ماشین[1]

یادگیری ماشـینی یک‌رشـته از علوم کامپیوتر اسـت و به حوزه وسـیع‌تری از هـوش مصنوعـی تعلـق دارد که با مطالعه یا سـاخت مدل‌هایـی که قادر بـه "یادگیـری" از تعـداد زیـادی داده هسـتند، سـروکار دارد. الگوریتم‌هـای یادگیری ماشـین می‌تواننـد از داده‌ها یاد بگیرند و بـرای داده‌های جدیدی که پیش‌بینی‌نشـده‌اند، پیش‌بینی‌هـای لازم را انجام دهند. شـاخص‌های ارزیابی یادگیری ماشـین دقت، صحت راه‌حل و کیفیت و سـرعت عملکرد آن است. الگوریتم‌های یادگیری ماشین معمولاً به چهار دسته نظارت‌شده، نظارت‌نشده،



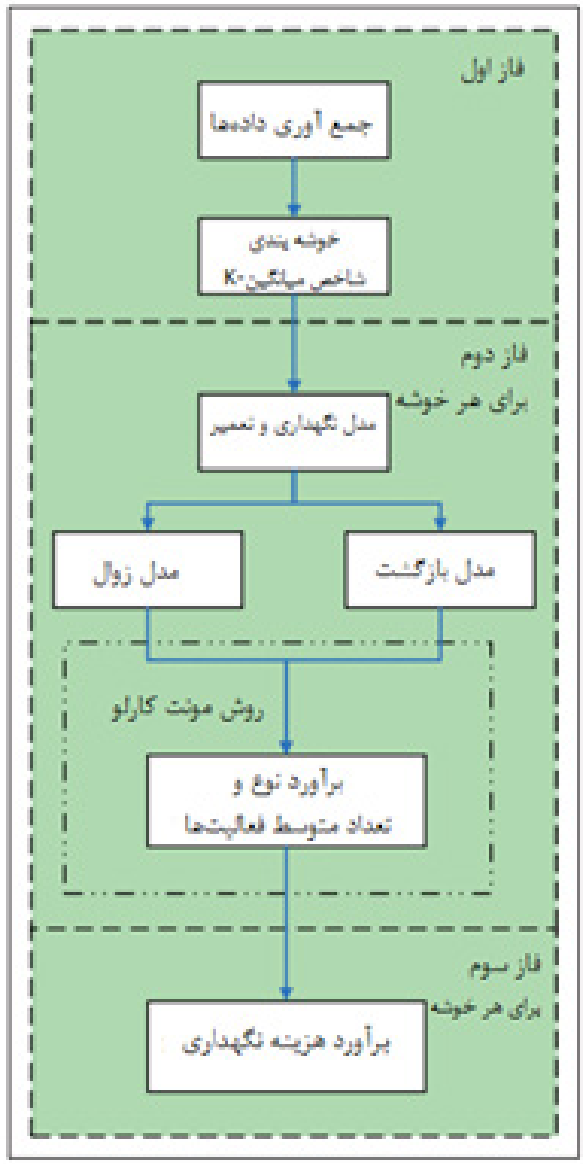
نیمه نظارتی و تقویتی دسته‌بندی می‌شوند.

نمونه‌هایی ازکاربرد یادگیری ماشین در نگهداری و تعمیر بهینه خطوط ریلی

تعیین حد بهینه نگهداری هندسه خط نگرانی اصلی تعدادی از مطالعات در سال‌های اخیر بوده است. بدین منظور در مقاله‌ای، کسرایی و همکاران، به تعیین حد نگهداری بهینه برای خط تهران - مشهد، یکی از خطوط اصلی راه‌آهن ایران، به‌منظور به حداقل رساندن هزینه‌های نگهداری و تعمیر پرداخته‌اند.

هدف این مقاله تعریف حد هشدار بهینه برای برنامه‌ریزی نگهداری و تعمیر با به حداقل رساندن هزینه‌های نگهداری و تعمیر است. ازآنجایی‌که همیشه عدم قطعیت در مدل‌سازی وجود دارد، یکی از روش‌های یادگیری ماشین، به نام خوشه‌بندی K - means، برای به حداقل رساندن آن استفاده شده است. شکل رو به رو فرآیند مورد استفاده در این مقاله را توصیف می‌کند.

فلوچارت سه مرحله‌ای مورد استفاده در این مطالعه بدین شرح است:



مرحله اول، جمع‌آوری داده‌ها و خوشه‌بندی، مرحله دوم، ایجاد مدل نگهداری شامل مدل زوال و بازیابی خط و مرحله سوم تخمین هزینه‌های نگهداری.

مجموعه داده‌هایی از افتادگی در طول خط بر حسب میلی متر جمع‌آوری شده است. این داده‌ها به ۹ خوشه بهینه تقسیم‌بندی شده‌اند. پس از بررسی تعداد داده‌ها در هر خوشه، دو خوشه به دلیل تعداد کم داده‌ها نسبت به سایرین حذف شده‌اند. تعداد نهایی داده‌های خوشه‌های ۷ گروه انتخاب‌شده، شامل ۸۹٪ داده‌های اولیه است.

با مشخص کردن تعداد خوشه‌ها، مدل زوال و مدل بازگشت با استفاده از مدل رگرسیون خطی برای هر یک از ۷ خوشه توسعه داده شده‌است. با استفاده از مدل نگهداری و تعمیر توسعه‌یافته برای هر خوشه، تعداد عملیات نگهداری شامل تعداد بازرسی‌ها، تعداد اقدامات نگهداری پیشگیرانه، و تعداد اقدامات نگهداری اصلاحی، برای سناریوهای مختلف حد هشدار تخمین زده شده‌است. به‌منظور ارزیابی سناریوهای مختلف محدوده هشدار، تابع هزینه شامل هزینه بازرسی، عملیات نگهداری و تعمیر پیشگیرانه و اصلاحی محاسبه‌شده است. درنهایت، با ترکیب هزینه تمام خوشه‌ها، هزینه‌های عملیات نگهداری خط موردمطالعه برای حد هشدارهای مختلف محاسبه‌شده است. حد هشدار بهینه با در نظرگرفتن هزینه‌های عملیات نگهداری و تعمیر مربوط به هر یک از محدوده‌های هشدار مختلف، بر روی ۱.۵ میلی‌متر تنظیم‌شده است. براساس مدلسازی عملیات نگهداری در منطقه مورد نظر اگر انحراف معیار داده‌ها از ۱.۵ میلی‌متر تجاوز کند انجام عملیات نگهداری و تعمیر برای به حداقل رساندن هزینه‌های نگهداری و تعمیر در بلند مدت ضروری است. ازآنجاکه در مطالعه حاضر، تغییرات حد هشدار از ۱.۲ تا ۱.۸ میلی‌متر در نظرگرفته‌شده است، هزینه نگهداری کل برای حد هشدار ۱.۲ میلی‌متر و ۱.۸ میلی‌متر در مقایسه با حد هشدار بهینه به ترتیب ۲۷٪ و ۵۷٪ افزایش می‌یابد، که نشان می‌دهد تعیین استراتژی مناسب برای برنامه‌ریزی نگهداری و اقدام مناسب از اهمیت زیادی برخوردار است.

در مقاله‌ای دیگر، جان اس.لی و همکاران (۲۰۱۸)، به پیش‌بینی زوال خطوط پرسرعت با استفاده از داده‌های نگهداری و متدهای یادگیری ماشین پرداختند. آن‌ها مدل‌های مبتنی برداده مانند شبکه عصبی مصنوعی (ANN[2]) و رگرسیون بردار پشتیبان (SVR[3])، که از ترکیبات اصلی فناوری یادگیری ماشین هستند، در این مطالعه به کاربردند تا پدیده‌های زوال خط را بهتر نشان دهند و ادعا کردند که نتایج را می‌توان به‌طور مستقیم در طرح‌های بهینه‌سازی تعمیر و نگهداری استفاده کرد.

جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

حفظ و ترمیم به موقع و مناسب خطوط ریلی می تواند موجبات حفظ سرمایه های ملی را فراهم آورده و از پیش آمدن سوانحی که هزینه‌های جانی و مالی به بار می‌آورند جلوگیری نماید. بنابراین ایجاد برنامه ریزی مناسب و دقیق برای نگهداری و تعمیرات زیرساخت ریلی و بازرسی‌های روتین انجام شده می تواند مانع زوال و فرسودگی پیش از موعد خط شود. از این رو تشخیص به موقع خرابی ها، طبقه بندی آنها و تشخیص نوع و شدت آنها در صنعت ریلی امری ضروری به نظر می رسد. در همین راستا هوش مصنوعی به عنوان یکی از زیرشاخه‌های علوم کامپیوتری می‌تواند کمک شایانی به برنامه‌ریزی بهینه و به حداقل رساندن هزینه‌های نگهداری و تعمیرات زیرساخت ریلی بکند.

پاورقی:

1. Machine learning
2. Artificial neural network
3. Support vector regression