

توسعه مدل رگرسیونی غیرخطی پیش‌بینی دمای عمق لایه‌های آسفالتی با استفاده از

داده‌های LTPP - مطالعه موردی: ایالت اوهایو - آمریکا

محمد صدیقیان فرد، دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی عمران، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران

نادر صولتی فر (مسئول مکاتبات)، استادیار، گروه مهندسی عمران، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران

Email: n.solatifar@urmia.ac.ir

پذیرش: ۱۳۹۹/۱۲/۱۹

دریافت: ۱۳۹۸/۱۱/۲۹

چکیده

دمای عمق لایه‌های آسفالتی یکی از فاکتورهای مهم در فرآیند تحلیل، طراحی و مطالعات بهسازی (روکش) روسازی‌های آسفالتی است. مدل‌های پیش‌بینی به عنوان جایگزین اندازه‌گیری میدانی و آزمایشگاهی این دما، از روش‌های کم‌هزینه و سریع تعیین دمای عمق لایه‌های آسفالتی هستند. این در حالی است که این مدل‌ها بر اساس داده‌های میدانی و آزمایشگاهی محدود ساخته شده‌اند و نیاز به توسعه مدل‌هایی برای تعیین دمای عمق لایه‌های آسفالتی در شرایط مختلف ترافیکی و آب و هوایی وجود دارد. هدف اصلی این پژوهش توسعه مدلی برای پیش‌بینی دمای عمق لایه‌های آسفالتی بر اساس داده‌های آب و هوایی است. روش مدل‌سازی استفاده شده، مدل رگرسیون غیرخطی درجه دوم گام به گام می‌باشد که دمای عمق لایه‌های آسفالتی را بر اساس سایر متغیرها شامل عمق مورد نظر از سطح روسازی، دمای هوا، میانگین سرعت و جهت باد، حداقل رطوبت هوا و تابش آفتاب پیش‌بینی می‌کند. داده‌ها از پایگاه داده برنامه عملکرد بلندمدت روسازی (LTPP) استخراج شده و برای مدل‌سازی از داده‌های چندین ساله مربوط به ایالت اوهایو آمریکا استفاده شده است. با استفاده از داده‌های موجود، عملکرد مدل توسعه یافته مورد ارزیابی قرار گرفته است. همچنین مدل توسعه داده شده با استفاده از داده‌های مربوط به ایالت مونتانا آمریکا، اعتبارسنجی شده است. نتایج پژوهش قابلیت پیش‌بینی دمای عمق لایه‌های آسفالتی را بر اساس داده‌های آب و هوایی موجود توسط مدل توسعه یافته با دقت پیش‌بینی بسیار خوب (ضریب تعیین ۰/۹۵) و آریب (بایاس) پیش‌بینی بسیار کم نشان می‌دهد.

واژه‌های کلیدی: دمای عمق لایه‌های آسفالتی، مدل پیش‌بینی دما، مدل رگرسیون درجه دوم، برنامه عملکرد بلندمدت روسازی (LTPP)

۱. مقدمه

تغییرات دمایی روزانه و فصلی در شکل‌گیری تنش‌های حرارتی نقش به‌سزایی دارند. این تغییرات می‌تواند باعث ترک‌خوردگی لایه رویه آسفالتی شود که این امر در پیش‌بینی دوره عمر لایه‌های آسفالتی تاثیرگذار است. در مناطقی که تغییرات دمایی زیادی را تجربه می‌کنند، شرایط حرارتی لایه‌ها نقشی مهم در ترک‌خوردگی سیستم روسازی چندلایه‌ای دارد. مشخصات مخلوط آسفالتی اعم از سختی، پیرشدگی و ... نسبت به تغییرات دمایی حساس است. تغییرات دمایی روزانه هوا تاثیر چشمگیری بر وضعیت حرارتی لایه آسفالتی در عمق‌های نزدیک به سطح روسازی دارد [Irwin and Boston, 2005].

برای بررسی تاثیر دما بر رفتار لایه‌های آسفالتی، تعیین نحوه توزیع دما در عمق‌های مختلف لایه در طول شبانه‌روز ضروری است. با داشتن این توزیع دمایی، محاسبه اثرات دما بر روسازی به ویژه در طراحی روکش و مطالعات بهسازی راه انجام می‌شود. با توجه به اهمیت آگاهی از دمای عمق لایه‌های آسفالتی در تحلیل، طراحی، اجرا، ارزیابی و بهسازی روسازی، هدف این مقاله توسعه مدلی برای پیش‌بینی دمای عمق لایه‌های آسفالتی است. مدل توسعه داده شده بر اساس متغیرهایی شامل عمق مورد نظر از سطح روسازی، دمای هوا، حداکثر جهت و سرعت باد، حداکثر رطوبت هوا و تابش آفتاب عمل می‌کند.

۲. مدل‌های پیش‌بینی دمای عمق لایه‌های

آسفالتی

مدل‌ها و روش‌های مختلفی برای پیش‌بینی دمای عمق لایه‌های آسفالتی توسط پژوهشگران ارائه شده است. این مدل‌ها را می‌توان به سه دسته کلی تقسیم کرد: دسته اول، مدل‌هایی هستند که رویکرد تحلیلی^۱ دارند و بر اساس تئوری انتقال حرارت و مشخصات حرارتی روسازی آسفالتی توسعه یافته‌اند. دسته دوم، مدل‌های بر پایه محاسبات نرم^۲ می‌باشند که شامل شبکه‌های عصبی مصنوعی^۳ (ANN)، سیستم استنتاج عصبی-فازی تطبیقی^۴ (ANFIS)، روش کنترل گرومی داده‌ها^۵ (GMDH)، فصلنامه مهندسی حمل‌ونقل / سال سیزدهم / شماره سوم (۵۲) / بهار ۱۴۰۱

در سال‌های اخیر افزایش حجم ترافیک و بارهای وسایل نقلیه سنگین منجر به فرسایش شدید سازه روسازی راه‌ها شده است. این امر به طور مستقیم باعث افزایش هزینه‌های تعمیر و نگهداری سازمان‌های متولی بهره‌برداری از راه‌ها شده است. این روند پیش رو، به همراه خواسته‌های معمول برای زیرساخت‌های حمل و نقل بادوام و ... منجر به نیاز به افزایش عمر روسازی‌های آسفالتی از ۲۰ سال به ۵۰ سال یا بیشتر شده است. مخلوط آسفالتی، ماده‌ای ویسکوالاستیک است و خصوصیات هر دو مصالح ویسکوز و الاستیک را دارا می‌باشد. یکی از فاکتورهای مهم محیطی که تغییر شکل روسازی‌های آسفالتی را تحت تاثیر قرار می‌دهد، دمای عمق لایه‌های آسفالتی می‌باشد؛ که این تاثیر به دلیل همین رفتار ویسکوالاستیک مخلوط آسفالتی است [Kim and Lee, 1995; Park, Kim and Park, 2002;] [Shao, Park and Kim, 1997]

سختی لایه‌های آسفالتی تاثیر قابل توجهی بر روی ظرفیت سازه‌های روسازی‌های انعطاف‌پذیر دارد. این سختی تابعی از دمای لایه بوده و به صورت روزانه و فصلی تغییر می‌کند. با افزایش دما سختی لایه آسفالتی کاهش می‌یابد که این امر باعث افزایش تنش در لایه‌های اساس و زیراساس روسازی می‌شود [Marshall, Mier and Welch, 2001]. مخلوط آسفالتی با افزایش دما، مانند مایع ویسکوز و با کاهش آن مانند جامد الاستیک عمل می‌کند [Diefenderfer, Al-Qadi and Reubush, 2002; Diefenderfer, Al-Qadi and Diefenderfer, 2006]. بنابراین پاسخ روسازی به بارهای وارده، متاثر از دما است. در تحلیل، طراحی و ارزیابی روسازی، پیش‌بینی دما در سطح و عمق لایه‌های آسفالتی ضروری است. دمای عمق لایه‌های آسفالتی عموماً متاثر از ویژگی‌های جذب و انعکاس انرژی خورشیدی لایه‌ها و مشخصات حرارتی مخلوط آسفالتی می‌باشد [Peterson and Mahura, 2012].

افت و خیز اندازه‌گیری شده روسازی در آزمایش افت و خیز سنج وزنه اُفتان^{۱۱} (FWD)، معرف پاسخ لایه‌های آن است. به دلیل رفتار ویسکوالاستیک لایه‌های آسفالتی، مقدار افت و خیز این لایه با دما تغییر می‌کند. برای یکسان سازی و امکان مقایسه نتایج، تحلیل دمایی در محاسبات بازگشتی^{۱۲} نتایج FWD با رویکرد مکانیستیک - تجربی^{۱۳} توسط نرم‌افزار ELMOD^{۱۴} یا مدل تجربی آشتو^{۱۵} در یک دمای مرجع انجام می‌شود [Solatifar et al., 2018].

روش‌های آماری به دلیل ساده‌تر بودن کار با نرم‌افزارهای آن، امکان به دست آمدن رابطه ریاضی و ... توسط بسیاری از پژوهشگران برای پیش‌بینی دمای عمق لایه‌های آسفالتی مورد استفاده قرار گرفته‌اند. دیفنדרفر و همکاران [Diefenderfer, Al-Qadi and Reubush, 2003] و ونگ و روسلر [Wang and Roesler, 2012] میانگین دمای ماهانه روسازی را به عنوان ضریب تصحیح برای گسترش دامنه کاربرد مدل معرفی کرده‌اند. مطالعات مختلفی توسط چاو و همکاران [Cao, Dong and Sun, 2007]، کانگ و همکاران [Kang, Zheng and Cai, 2007]، بای و همکاران [Bai, Qian and Li, 2011] و دانگ و همکاران [Dong, Li and Wen, 2014] نیز در این خصوص صورت گرفته است. در این مطالعات دمای عمق لایه آسفالتی با استفاده از داده‌های آب و هوایی و ... مورد بررسی قرار گرفته شده است. صدیقیان فرد و صولتی‌فر [Sedighian-Fard and Solatifar, 2020] پژوهشی جامع در خصوص انواع مدل‌های رگرسیونی پیش‌بینی دمای عمق لایه‌های آسفالتی را انجام داده‌اند.

در برنامه تحقیقات راهبردی بزرگراه‌ها^{۱۶} (شارپ - SHRP) مدل‌ها و روش‌های متعددی برای پیش‌بینی رفتار حرارتی لایه‌های آسفالتی ارائه شده است. این برنامه و نیز برنامه عملکرد بلندمدت روسازی^{۱۷} (LTPP) از سال ۱۹۸۷ در ایالات متحده آمریکا برای تعیین رفتار دقیق روسازی‌ها اجرا شده است. لوکانن و همکاران [Lukanen, Chunhua, and Skok, 1998]

برنامه‌نویسی عبارتی ژنتیک^{۱۸} (GEP) و ... می‌شود. دسته سوم، روش‌های آماری هستند که از مدل‌های رگرسیونی برای به دست آوردن رابطه بین دمای عمق لایه‌های آسفالتی و داده‌های آب و هوایی استفاده می‌کنند.

مدل‌های تحلیلی تعادل گرمایی توسط شائو و لیستر [Shao and Lister, 1996]، رایبر [Rayer, 1987]، چاپمن و همکاران [Chapman, Thornes and Bradley, 2001] توسعه یافته‌اند. این مدل‌ها فاقد پارامتر حرارت دریافتی و از دست رفته سطح روسازی مرتبط با عبور وسایل نقلیه هستند [Akihito, Akira and Teruyuki, 2012]. هوبر [Huber, 1994] رابطه‌ای قطعی برای تعیین حداکثر دمای روسازی تعریف کرده است. کریستیان و آندرسون [Christison and Anderson, 1972] مدلی که دمای روسازی آسفالتی را بر اساس معادله جریان گرمای یک بعدی پیش‌بینی می‌کند، ارائه کرده‌اند. کین و هیلر [Qin and Hiller, 2011] مدل انتقال گرمای یک بعدی را برای پیش‌بینی نحوه توزیع دما در روسازی توسعه داده‌اند. ویژگی اصلی این مدل به دست آمدن اثرات دمای هوا بر دمای روسازی در عمق‌های مختلف می‌باشد [Jing and Zhang, 2018].

مدل شبکه عصبی پس‌انتشار^{۱۹} توسط شو و همکاران [Xu, Han-Cheng and Li, 2017] جهت پیش‌بینی دمای روسازی در مناطق سرد ارائه شده است. سیستم استنتاج عصبی-فازی تطبیقی از نوع سیستم فازی سوگنو^{۲۰} است که بر اساس یک سری از داده‌های آموزشی موجود و از فرآیند مربوط، قواعد آن به دست آمده و مقادیر بهینه پارامترهای آن تعیین می‌شود. روش کنترل گروهی داده‌ها یک رویکرد خودسازماندهی داده بوده که به تدریج مدل‌های پیچیده‌تری در طول ارزیابی عملکرد مجموعه داده‌های ورودی و خروجی تولید می‌کند. برنامه‌نویسی عبارتی ژنتیک با استفاده از اصول بنیادی الگوریتم ژنتیک^{۲۱} (GA) و برنامه‌نویسی ژنتیک^{۲۲} (GP) که بر اساس تئوری داروین ارائه شده، گسترش یافته است.

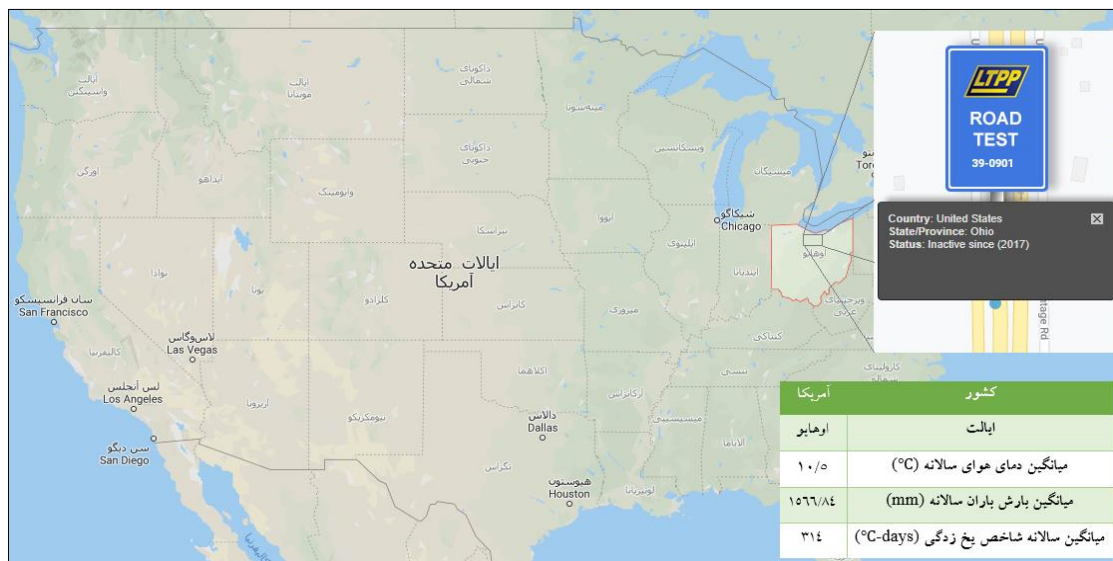
مدلهایی بر اساس داده‌های بسط‌یافته برنامه پایش فصلی^{۱۸} (SMP) جهت پیش‌بینی حداقل و حداکثر دمای روسازی، ارائه کرده‌اند. هدف از برنامه LTPP گردآوری داده‌های با کیفیت بالای مورد نیاز برای فهم دقیق عملکرد روسازی و متغیرهای تاثیرگذار بر آن و همچنین ایجاد پایگاه داده جامعی برای تحقیق و توسعه محصولات ارزشمند در تحلیل و طراحی روسازی بوده است. برنامه LTPP شامل دو نوع مطالعات است که عبارتند از مطالعات عام روسازی^{۱۹} (GPS) و مطالعات خاص روسازی^{۲۰} (SPS). آزمایش‌ها و مطالعات GPS بر روی بسیاری از قطعات روسازی در حال خدمت برای ارزیابی عملکرد کلی روسازی‌ها، ایجاد و توسعه یک بانک اطلاعاتی گسترده انجام شده است. این مطالعات در تحلیل و طراحی روسازی مورد استفاده قرار می‌گیرند [FHWA, 2017; Solatifar and Lavasani, 2020]. آزمایش‌ها و مطالعات SPS برای بررسی تاثیر عوامل مختلف بر عملکرد و ویژگی‌های خاص روسازی نظیر زهکشی، ضخامت لایه‌ها و نیز بهسازی و نگهداری، طراحی و توسعه یافته‌اند. این قطعات به طور خاص برای برنامه LTPP ساخته شده است. مطالعات LTPP از حدود ۲۵۸۱ قطعه روسازی تشکیل شده است. از این تعداد حدود ۸۲ قطعه در ایالات متحده آمریکا و کانادا (همه قطعات روسازی) برای برنامه پایش فصلی (از قطعات SPS) در نظر گرفته شده است.

مورد نیاز بوده‌اند، استخراج شده است. از آن جایی که پژوهش حاضر به دنبال توسعه مدلی عمومی بوده است، تفکیک خاصی در استخراج داده‌ها صورت نگرفته و صرفاً با توجه به مدل‌سازی دمای عمق لایه‌های آسفالتی، تنها فیلتر اعمال شده روسازی‌های بتنی (صلب) بوده‌اند. داده‌های مورد استفاده شامل کد شارپ^{۲۱}، کد ایالت^{۲۲}، شماره ساخت^{۲۳}، عرض، طول و تراز ارتفاعی جغرافیایی، نوع قطعه روسازی، ضخامت کل و مجزای هر یک از لایه‌های آسفالتی، عمق دماسنج مدفون در لایه‌ها و نیز داده‌های آب و هوایی مورد نیاز از جمله دمای عمق لایه‌های آسفالتی، دمای هوا، سرعت و جهت باد، رطوبت هوا و تابش آفتاب می‌شود. با توجه به این که هدف این پژوهش پیش‌بینی دمای عمق لایه‌های آسفالتی می‌باشد، استخراج سایر داده‌ها بر اساس در دسترس بودن داده‌های دمای عمق مرتبط با آنها انجام شده است. داده‌های دمای عمق و دمای هوا از ماژول^{۲۴} آب و هوایی پایگاه داده LTPP، بخش SMP و داده‌های سرعت باد، جهت باد، رطوبت هوا و تابش آفتاب از ماژول آب و هوایی پایگاه داده LTPP، بخش ایستگاه آب و هوایی خودکار^{۲۵} (AWS) استخراج شده‌اند. تناوب زمانی برداشت این داده‌ها به صورت ساعتی است. در شکل ۱ محل قطعه روسازی مورد مطالعه در این پژوهش در ایالت اوهایو آمریکا نشان شده است.

بعد از استخراج و تهیه داده‌های خام، سایر داده‌ها اعم از دمای هوا، سرعت و جهت باد و ... با داده‌های دمای عمق از نظر مطابقت کد سایت، زمان ثبت داده و سایر موارد (شماره ساخت، شماره محل و نمونه و ...) کنترل شده و با استفاده از نرم‌افزار اکسل^{۲۶} مرتب شده‌اند. در فرآیند مطابقت داده‌ها، گپ‌های زمانی موجود در داده‌های دمای عمق تعیین شده است. این گپ‌ها در تمامی داده‌های مستخرج غیر از داده‌های دمای عمق، شناسایی و حذف شده‌اند. در حالت کلی داده‌های دمای عمق با توجه به ضخامت کل لایه‌های آسفالتی، در سه عمق مورد استفاده قرار گرفته‌اند.

۳. استخراج داده‌ها از پایگاه داده LTPP

با توجه به نیاز به یک پایگاه داده جامع و عدم وجود اطلاعات و مشخصات کافی روسازی راه‌های ایران (داده‌های دمای عمق لایه‌های آسفالتی، دمای هوا، سرعت و جهت باد، و رطوبت هوا و تابش آفتاب)، از پایگاه داده برنامه LTPP برای استخراج داده‌های مورد نیاز در این پژوهش استفاده شده است. نوع روسازی خاصی مد نظر پژوهشگران نبوده و داده‌های روسازی واقع در ایالت اوهایو^{۲۱} با کد قطعه ۰۹۰۱-۳۹ که دارای داده‌های



شکل ۱. محل سایت در ایالت اوهایو آمریکا و قطعه روسازی با کد ۳۹-۰۹۰۱

بعد از این مرحله داده‌ها به صورت تصادفی مرتب شده و بانک داده نهایی تهیه شده است. بانک داده شامل ۹ متغیر مستقل (ورودی) و یک متغیر وابسته (پاسخ) است. متغیرهای ورودی عبارتند از: عمق از سطح روسازی، دمای هوا، میانگین و حداکثر جهت باد، میانگین و حداکثر سرعت باد، حداکثر و حداقل میزان رطوبت هوا و تابش آفتاب. متغیر وابسته دمای عمق لایه آسفالتی است. نتایج آزمون همبستگی در جدول ۱ ارائه شده است.

همان طور که در این جدول مشاهده می‌شود، میانگین و حداکثر سرعت باد با همبستگی ۹۶/۸ درصد، میانگین و حداکثر جهت باد با همبستگی ۸۲/۶ درصد و همچنین حداقل و حداکثر میزان رطوبت هوا با همبستگی ۹۶/۹ درصد همبستگی بالایی با یکدیگر دارند. بنابراین برای جلوگیری از چندخطی بودن در مدل، حداکثر سرعت باد با همبستگی ۱- درصد، حداکثر جهت باد با همبستگی ۱۱/۹- درصد و نیز حداکثر میزان رطوبت هوا با همبستگی ۲۴- درصد با دمای عمق لایه‌های آسفالتی از بانک داده حذف شده است. در نهایت شش متغیر مستقل برای مدل‌سازی پژوهش حاضر عبارتند از: عمق از سطح روسازی (X_1) ، دمای هوا (X_2) ، میانگین سرعت باد (X_3) ، میانگین جهت باد (X_4) ، حداقل میزان رطوبت هوا (X_5) و تابش آفتاب (X_6) .

لازم است ذکر شود که داده‌های دمای عمق لایه‌های آسفالتی برنامه SMP از اوت ۱۹۹۴ تا اکتبر ۲۰۰۴ و داده‌های آب و هوایی AWS از اوت ۱۹۹۴ تا دسامبر ۲۰۰۸ در پایگاه داده LTPP در دسترس هستند. در نهایت برای توسعه مدل پیش‌بینی دمای عمق لایه‌های آسفالتی این پژوهش از تعداد ۳۴۶۷۶ مجموعه داده استفاده شده است.

۴. تحلیل داده‌ها و توسعه مدل

در این بخش فرآیند تحلیل داده‌ها مورد بررسی قرار گرفته است. ابتدا آزمون همبستگی پیرسون بین متغیرها برای تشخیص وجود یا عدم وجود چندخطی بودن متغیرها با استفاده از نرم‌افزار SPSS نسخه ۲۵ انجام شده است. متغیرهایی که همبستگی زیادی با یکدیگر داشته تعیین شده و از بین آنها متغیری که تاثیر بیشتری بر پیش‌بینی پاسخ دارد در مدل‌سازی در نظر گرفته شده است. متغیر دیگر جهت جلوگیری از چندخطی بودن در مدل، حذف شده است. عموماً اگر میزان همبستگی بین دو متغیر یا چند متغیر نزدیک به ۸۰ درصد باشد، می‌توان اظهار داشت که هم‌خطی یا چندخطی وجود دارد [Shrestha, 2020].

جدول ۱. نتایج آزمون همبستگی پیرسون با سطح اطمینان ۹۵ درصد روی داده‌های پژوهش

متغیرها	عمق از سطح روسازی	دمای هوا	میانگین سرعت باد	میانگین جهت باد	حداکثر سرعت باد	حداکثر جهت باد	حداکثر میزان رطوبت هوا	حداقل میزان رطوبت هوا	تابش آفتاب	دمای عمق لایه آسفالتی
عمق از سطح روسازی	۱	-۰/۰۳۵	۰/۰۰۵	۰/۰۱۴	۰/۰۰۶	۰/۰۱۳	۰/۰۰۲	۰/۰۰۵	-۰/۰۱۲	-۰/۰۵۷
دمای هوا	-۰/۰۳۵	۱	-۰/۰۲۶	-۰/۱۳۱	۰/۰۴۶	-۰/۱۲۴	-۰/۱۸۶	-۰/۲۳۱	۰/۳۷۵	۰/۹۵۲
میانگین سرعت باد	۰/۰۰۵	-۰/۰۲۶	۱	۰/۱۹۵	۰/۹۶۸	۰/۱۸۲	۰/۲۷۷	-۰/۲۵۵	۰/۲۱۹	-۰/۰۹۰
میانگین جهت باد	۰/۰۱۴	-۰/۱۳۱	۰/۱۹۵	۱	۰/۱۹۳	۰/۸۲۶	۰/۰۸۸	-۰/۰۷۹	۰/۰۳۵	-۰/۱۲۶
حداکثر سرعت باد	۰/۰۰۶	۰/۰۴۶	۰/۹۶۸	۰/۱۹۳	۱	۰/۱۸۴	-۰/۳۰۶	-۰/۳۰۲	۰/۲۷۶	-۰/۰۱۰
حداکثر جهت باد	۰/۰۱۳	-۰/۱۲۴	۰/۱۸۲	۰/۱۹۳	۰/۱۸۴	۱	-۰/۰۷۲	-۰/۰۶۷	۰/۰۲۴	-۰/۱۱۹
حداکثر میزان رطوبت هوا	۰/۰۰۲	-۰/۱۸۶	-۰/۲۷۷	-۰/۰۸۸	-۰/۳۰۶	-۰/۰۷۲	۱	۰/۹۶۹	-۰/۵۴۲	-۰/۲۴۰
حداقل میزان رطوبت هوا	۰/۰۰۵	-۰/۲۳۱	-۰/۲۵۵	-۰/۰۷۹	-۰/۳۰۲	-۰/۰۶۷	۰/۹۶۹	۱	-۰/۶۰۲	-۰/۲۸۹
تابش آفتاب	-۰/۰۱۲	۰/۳۷۵	۰/۲۱۹	۰/۰۳۵	۰/۲۷۶	۰/۰۲۴	-۰/۵۴۲	-۰/۶۰۲	۱	۰/۴۱۶
دمای عمق لایه آسفالتی	-۰/۰۵۷	۰/۹۵۲	-۰/۰۹۰	-۰/۱۲۶	-۰/۰۱۰	-۰/۱۱۹	-۰/۲۴۰	-۰/۲۸۹	۰/۴۱۶	۱

که در این رابطه y متغیر پاسخ (وابسته)، x متغیرهای مستقل، k تعداد متغیرها و ε خطا است [Bezerra et al., 2008]. نتایج آماری تحلیل رگرسیون غیرخطی درجه دوم در جدول ۲ ارائه شده است. در این جدول، ضرایب متغیرها، P -value و t -value برای هر کدام از عبارات مدل آمده است. t -value آماره محاسبه شده برای هر عبارت است که به منظور محاسبه سطح معنی داری (P -value) ۰/۰۵ استفاده می شود. P -value بیانگر این است که آیا هر یک از عبارات مدل در پیش بینی متغیر وابسته (دمای عمق لایه‌های آسفالتی) تاثیرگذار هستند یا خیر. اگر P -value کمتر از ۰/۰۵ باشد، مقدار آن عبارت تاثیرگذار در نظر گرفته می شود.

همان طور که در جدول ۲ مشاهده می شود تمامی عبارات های مدل توسعه یافته دارای P -value کمتر از ۰/۰۵ هستند که نشان می دهد سطح معنی داری با احتمال بالای ۹۵ درصد با متغیر

مدل سازی با روش رگرسیون درجه دوم 2^9 گام به گام 3^0 با استفاده از نرم افزار Minitab نسخه ۱۹ انجام شده است. در این روش متغیرها یک به یک (جداگانه) وارد مدل می شوند؛ به این صورت که مدل ابتدا متغیری که بیشترین همبستگی را با متغیر وابسته (دمای عمق لایه‌های آسفالتی) دارد، انتخاب می کند. دومین متغیری که وارد مدل (تحلیل) می شود، متغیری است که پس از متغیر اول، باعث افزایش مقدار ضریب تعیین مدل R^2 می شود. در این روش ورود متغیرها به مدل تا زمانی که سطح معنی داری $(p$ -Value) 3^2 به ۹۵ درصد برسد، ادامه یافته و سپس عملیات متوقف می شود. مدل درجه دوم علاوه بر در نظر گرفتن پارامترهای (متغیرهای) اصلی و برهم کنش 3^3 آنها، درجه دوم پارامترها را نیز در نظر می گیرد و از رابطه ۱ به دست می آید.

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} x_i^2 + \sum_{i=1 \leq i < j \leq k} \beta_{ij} x_i x_j + \varepsilon \quad (1)$$

وابسته دارند. دلیل این که تمامی متغیرها دارای P-value کمتر از ۰/۰۵ هستند؛ می‌تواند به دلیل انجام آزمون پیرسون در ابتدای تحلیل داده‌ها باشد. مدل نهایی توسعه یافته برای پیش‌بینی دمای عمق لایه‌های آسفالتی به صورت رابطه ۲ است.

$$T_d = 8.257 - 27.91 x_1 + 1.1424 x_2 - 0.8369 x_3 - 0.042376 x_4 + 0.00671 x_5 + 0.009273 x_6 + 470.7 x_1^2 + 0.011693 x_2^2 + 0.03730 x_3^2 + 0.000119 x_4^2 - 0.000266 x_5^2 + 0.000004 x_6^2 - 1.0542 x_1 \times x_2 - 1.269 x_1 \times x_3 - 0.15824 x_1 \times x_6 - 0.025892 x_2 \times x_3 - 0.000186 x_2 \times x_4 - 0.001212 x_2 \times x_5 - 0.000103 x_2 \times x_6 + 0.001651 x_3 \times x_5 + 0.001356 x_3 \times x_6 + 0.000003 x_4 \times x_6 - 0.000118 x_5 \times x_6 \quad (2)$$

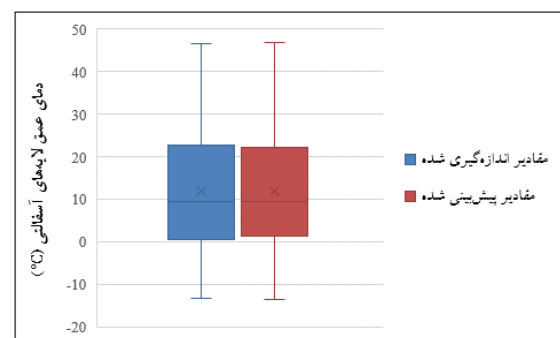
جدول ۲. نتایج آماری تحلیل رگرسیون درجه دوم

عبارت	ضریب	t-value	P-value
ثابت مدل	۶/۲۲۱۸	۸۰/۴۷	۰/۰۰۰
x_1	-۲/۱۵۹۳	-۴۳/۱۰	۰/۰۰۰
x_2	۲۲/۸۴۷	۱۷۹/۷۷	۰/۰۰۰
x_3	۲/۱۲۰	۱۳/۳۴	۰/۰۰۰
x_4	۰/۲۳۶۸	۳/۹۹	۰/۰۰۰
x_5	-۳/۵۷۳	-۲۷/۲۱	۰/۰۰۰
x_6	۴/۰۷۳	۳۰/۵۵	۰/۰۰۰
$x_1 x_1$	۰/۴۰۹۶	۱۳/۳۰	۰/۰۰۰
$x_2 x_2$	۸/۶۱۹۲	۸۷/۶۷	۰/۰۰۰
$x_3 x_3$	۱/۷۰۰	۱۰/۹۵	۰/۰۰۰
$x_4 x_4$	۳/۸۶۸۶	۷۳/۷۶	۰/۰۰۰
$x_5 x_5$	-۰/۵۵۳	-۴/۸۵	۰/۰۰۰
$x_6 x_6$	۱/۱۱۱	۱۰/۲۰	۰/۰۰۰
$x_1 x_2$	-۰/۸۴۴۴	-۱۷/۴۰	۰/۰۰۰
$x_1 x_3$	-۰/۲۵۲۷	-۳/۶۱	۰/۰۰۰
$x_1 x_6$	-۲/۴۸۳۳	-۵۳/۳۷	۰/۰۰۰
$x_2 x_3$	-۴/۷۴۵	-۳۰/۱۲	۰/۰۰۰
$x_2 x_4$	-۰/۹۱۱۲	-۱۱/۴۷	۰/۰۰۰
$x_2 x_5$	-۱/۵۰۲	-۱۱/۳۱	۰/۰۰۰
$x_2 x_6$	۱/۴۸۲	-۱۱/۹۲	۰/۰۰۰
$x_3 x_5$	۰/۵۰۹	۲/۸۴	۰/۰۰۴
$x_3 x_6$	۴/۸۶۹	۲۸/۱۳	۰/۰۰۰
$x_4 x_6$	۰/۲۴۹۷	۳/۶۹	۰/۰۰۰

در این رابطه T_d دمای عمق لایه آسفالتی، درجه سلسیوس؛ x_1 عمق مورد نظر از سطح روسازی، متر؛ x_2 دمای هوا، درجه سلسیوس؛ x_3 میانگین سرعت باد، متر بر ثانیه؛ x_4 میانگین جهت باد، درجه؛ x_5 حداقل رطوبت هوا، درصد؛ و x_6 تابش آفتاب، وات بر مترمربع است. بر اساس مدل توسعه یافته، دمای عمق لایه‌های آسفالتی می‌تواند پیش‌بینی شود.

۵. ارزیابی عملکرد مدل

مقادیر دمای عمق لایه‌های آسفالتی اندازه‌گیری شده و نیز مقادیر دمای پیش‌بینی شده توسط مدل رگرسیونی غیرخطی (درجه دوم) در قالب پارامترهای آماری در شکل ۲ ارائه شده است. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود، دمای عمق پیش‌بینی شده توسط مدل توسعه یافته، محدوده نتایج تقریباً مشابهی با مقادیر دمای اندازه‌گیری شده دارد. بنابراین می‌توان گفت که مدل توسعه یافته قابلیت بسیار خوبی در تعیین و پیش‌بینی دمای عمق لایه‌های آسفالتی دارد.



شکل ۲. دمای عمق لایه‌های آسفالتی اندازه‌گیری شده در مقایسه با مقادیر پیش‌بینی شده توسط مدل توسعه یافته

برای بررسی بیشتر عملکرد مدل از پارامتر خطای جذر میانگین مربعات^{۳۸} (RMSE) استفاده شده است. این پارامتر خطای تفاوت بین مقدار پیش‌بینی شده توسط مدل و مقدار واقعی یا اندازه‌گیری شده می‌باشد که با استفاده از رابطه ۷ محاسبه می‌شود. هر چه مقدار RMSE به صفر نزدیک‌تر باشد، مدل از دقت بالاتری برخوردار است.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (y - \hat{y})^2}{n}} \quad (۷)$$

که تمامی پارامترها قبلاً تعریف شده‌اند.

شکل ۳ مقادیر دمای عمق پیش‌بینی شده را در برابر دمای عمق اندازه‌گیری شده ارائه می‌کند. همان طوری که انتظار می‌رود مدل مقادیر پیش‌بینی را در امتداد خط برابری (LOE) ارائه کرده است که این نشان دهنده عملکرد مناسب این مدل در تعیین دمای عمق لایه‌های آسفالتی است. همچنین پارامترهای ارزیابی عملکرد مدل در جدول ۳ ارائه شده است. همان طوری که در این جدول آمده است مقدار ضریب تعیین (R^2) نسبت به خط برابری (LOE) مقدار ۰/۹۵ را دارا است. در مورد نسبت خطای استاندارد پیش‌بینی به انحراف معیار اندازه‌گیری (S_e/S_y) نیز مقدار ۰/۲۱ به دست آمده است. بنابراین می‌توان گفت این دو مقدار دقت بسیار خوبی را برای عملکرد مدل نشان می‌دهند. شیب و عرض از مبدأ خط روند مقادیر پیش‌بینی و مقادیر اندازه‌گیری نیز به ترتیب برابر ۰/۹۵۳۳ و ۰/۵۴۵۱ می‌باشد که این دو مقدار نیز بیان‌گر وجود آریب کم پیش‌بینی مدل توسعه یافته است. بنابراین، مدل توسعه یافته برای پیش‌بینی دمای عمق لایه‌های آسفالتی دارای دقت بسیار خوب و آریب پیش‌بینی کم می‌باشد.

جدول ۳. پارامترهای ارزیابی عملکرد مدل

پارامتر ارزیابی	مقدار
SSE	۲۶۲۴۴۰
S_e	۲/۷۵
S_e/S_y	۰/۲۱

عبارت	ضریب	t-value	P-value
$x_5 x_6$	-۲/۸۶۸	-۱۸/۶۰	۰/۰۰۰

عملکرد پیش‌بینی مدل توسعه یافته در پیش‌بینی دمای عمق لایه‌های آسفالتی توسط دو معیار دقت^{۳۴} و آریب^{۳۵} پیش‌بینی مورد ارزیابی قرار گرفته است. برای این منظور، دمای عمق لایه آسفالتی به عنوان متغیر مستقل تعریف شده و خطاها به صورت زیر محاسبه شده است.

$$SSE = \sum (y - \hat{y})^2 \quad (۳)$$

$$S_e = \sqrt{\frac{SSE}{n-1}} \quad (۴)$$

$$S_y = \sqrt{\frac{\sum [y - \bar{y}]^2}{n-1}} \quad (۵)$$

که در این روابط SSE مجموع مربعات خطا، y دمای عمق اندازه‌گیری شده، \hat{y} دمای عمق اندازه‌گیری شده، \bar{y} میانگین مقادیر دمای عمق اندازه‌گیری شده، S_e خطای استاندارد (انحراف معیار خطاها)، S_y انحراف معیار مقادیر اندازه‌گیری و n تعداد نمونه یا مشاهدات است.

برای ارزیابی دقت پیش‌بینی مدل از پارامترهای S_e/S_y نسبت خطای استاندارد به انحراف معیار مقادیر اندازه‌گیری و R^2 ضریب تعیین نسبت به خط برابری^{۳۶} (LOE) به صورت رابطه ۶ و برای محاسبه آریب پیش‌بینی مدل از پارامترهای شیب و عرض از مبدأ خط روند^{۳۷} مقادیر پیش‌بینی در مقابل مقادیر اندازه‌گیری استفاده شده است.

$$R^2 = 1 - \frac{n-p}{n-1} \left(\frac{S_e}{S_y} \right)^2 \quad (۶)$$

که در این رابطه p تعداد پارامترهای مدل است. بدیهی است هر چه نسبت S_e/S_y کمتر و به صفر نزدیک باشد و نیز مقدار R^2 به یک میل کند، دقت پیش‌بینی مدل بالاتر است. از سوی دیگر هر چه شیب خط روند به یک و همچنین عرض از مبدأ این خط به صفر نزدیک باشد، مدل دارای آریب پیش‌بینی کمتری خواهد بود [Solatifar and Abbasghorbani, 2019]. همچنین

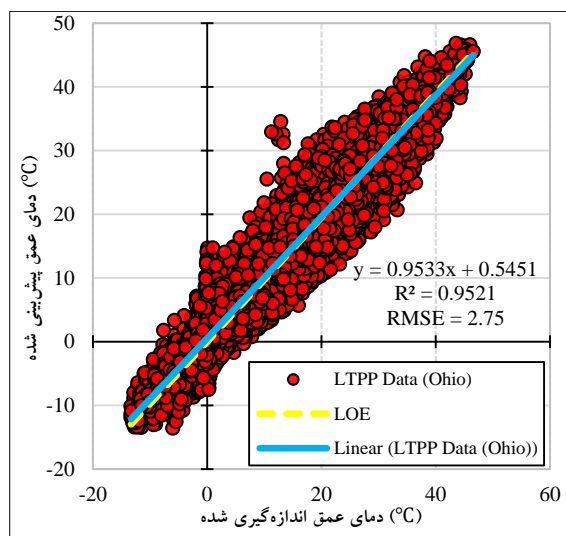
نهایت، از حدود ۳۰۰ داده این ایالت برای اعتبارسنجی مدل توسعه یافته بهره گرفته شده است.

نتایج پیش‌بینی دمای عمق لایه‌های آسفالتی که توسط داده‌های اعتبارسنجی محاسبه شده است، همراه با مقادیر دمای عمق اندازه‌گیری، در قالب پارامترهای آماری در شکل ۴ ارائه شده است. همان طور که مشاهده می‌شود، دمای عمق پیش‌بینی شده توسط مدل توسعه یافته برای داده‌های اعتبارسنجی نیز محدوده نتایج تقریباً مشابهی با دمای عمق اندازه‌گیری شده ارائه کرده است. مقادیر دمای عمق اندازه‌گیری شده در برابر مقادیر پیش‌بینی شده و خطای جذر میانگین مربعات (RMSE) در شکل ۵ و پارامترهای ارزیابی عملکرد مدل (داده‌های اعتبارسنجی) در جدول ۴ ارائه شده است. همان طوری که در شکل ۵ مشاهده می‌شود همانند بخش قبل، مدل مقادیر پیش‌بینی را برای داده‌های اعتبارسنجی نیز در امتداد خط برابری ارائه کرده است. این شکل نشان می‌دهد که در اعتبارسنجی مدل نیز با وجود برخی خطاها دقت خوبی با ضریب تعیین $(R^2 (LOE))$ برابر ۰/۹۳ (دقت نزدیک و مشابه به تحلیل داده‌های مدل‌سازی) حاصل شده است.

با بررسی پارامترهای ارزیابی مدل در جدول ۴، می‌توان نتیجه گرفت مدل دارای دقت بسیار خوبی با استفاده از داده‌های اعتبارسنجی است. شیب و عرض از مبدأ خط روند مقادیر پیش‌بینی و مقادیر اندازه‌گیری نیز نشان‌گر وجود آریب کم پیش‌بینی مدل توسعه یافته است. بنابراین، مدل توسعه یافته برای پیش‌بینی دمای عمق لایه‌های آسفالتی دارای دقت بسیار خوب و آریب پیش‌بینی کم است.

از این رو می‌توان نتیجه گرفت این مدل می‌تواند با عملکرد مناسب برای پیش‌بینی دمای عمق لایه‌های آسفالتی به جای انجام آزمایش در محل در تحلیل روسازی‌های آسفالتی مورد استفاده قرار گیرد.

پارامتر ارزیابی	مقدار
$(LOE) R^2$	۰/۹۵
شیب	۰/۹۵۳۳
عرض از مبدأ	۰/۵۴۵۱
RMSE	۲/۷۵



شکل ۳. مقادیر اندازه‌گیری شده دمای عمق لایه‌های آسفالتی در برابر مقادیر پیش‌بینی شده

۶. اعتبارسنجی مدل

برای اعتبارسنجی مدل توسعه یافته سعی شده است که از داده‌های قطعه روسازی با شرایط مختلف جغرافیایی، آب و هوایی، کلاس عملکردی متفاوت و ... استفاده شود. از این رو از تعداد محدودی از داده‌های مربوط به قطعه روسازی واقع در ایالت مونتانا آمریکا با کد قطعه ۰۱۱۴-۳۰ استفاده شده است. این قطعه روسازی در شمال ایالات متحده آمریکا واقع شده که در منطقه آب و هوایی خشک و دارای یخزدگی است. همچنین مقادیر بارش باران سالانه آن حدود یک سوم قطعه روسازی واقع در ایالت اوهایو بوده که مدل با داده‌های این ایالت توسعه داده شده است (حدود ۳۷۱ میلی‌متر در سال). در حالی که قطعه روسازی در ایالت اوهایو در شرق آمریکا بوده و در منطقه با شرایط اقلیمی مرطوب و دارای یخزدگی قرار گرفته است. در فصلنامه مهندسی حمل‌ونقل / سال سیزدهم / شماره سوم (۵۲) / بهار ۱۴۰۱

هوایی (AWS) و برنامه پایش فصلی (SMP) که در پایگاه داده LTPP در دسترس هستند، انجام شده است. برای مدل سازی از روش رگرسیون درجه دوم گام به گام استفاده شده است. مهم ترین نتایج به دست آمده شامل موارد زیر می شود:

- تعیین دمای عمق لایه های آسفالتی جهت طراحی و بهسازی روسازی مستلزم انجام اندازه گیری در محل است؛ این امر بسیار زمان بر و پرهزینه می باشد. مدل توسعه یافته می تواند برای پیش بینی دمای عمق لایه های آسفالتی با دقت بسیار خوبی مورد استفاده قرار گیرد؛

- مدل رگرسیونی غیرخطی به دلیل دقت بهتر و سادگی انجام آن به خوبی در مدل سازی دمای عمق لایه های آسفالتی مورد استفاده قرار گرفته است؛

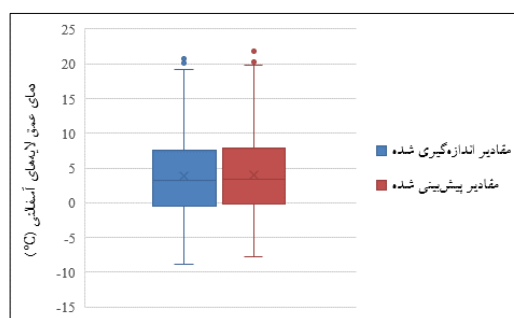
- دمای هوا با توجه به نتایج آزمون همبستگی پیرسون دارای بیشترین تاثیر بر دمای عمق لایه آسفالتی (همبستگی ۹۵/۲ درصد) است. در واقع این فاکتور رابطه مستقیم و نزدیکی با دمای عمق لایه آسفالتی دارد؛

- متغیرهای حداکثر سرعت و جهت باد و حداقل رطوبت هوا به برای جلوگیری از چندخطی بودن مدل از مجموعه داده حذف شده اند؛

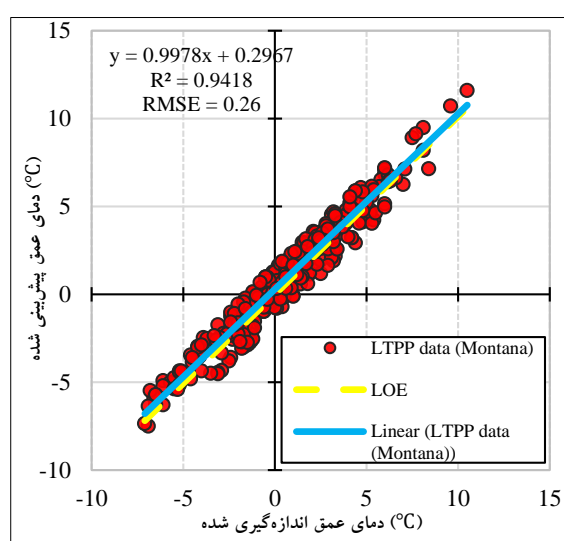
- ارزیابی عملکرد مدل توسعه یافته نشان می دهد که این مدل می تواند دمای عمق لایه های آسفالتی را با دقت بسیار خوب و آریب (با یاس) کم پیش بینی نماید؛

- اعتبارسنجی مدل توسعه یافته با استفاده از داده های مربوط به قطعه روسازی واقع در ایالت مونتانا با کد قطعه ۳۰-۰۱۱۴ که دارای شرایط مختلف آب و هوایی، جغرافیایی و ... می باشد، انجام شده که نشان می دهد مدل از اعتبار بالایی برای پیش بینی دمای عمق لایه های آسفالتی در محل برخوردار است (ضریب تعیین ۰/۹۳)؛

- و عملکرد مدل توسعه یافته برای پیش بینی دمای عمق لایه های آسفالتی دارای محدودیهایی می باشد. اگر چه برای انجام مدل سازی در این پژوهش از ۳۴۶۷۶ مجموعه داده فصلنامه مهندسی حمل و نقل / سال سیزدهم / شماره سوم (۵۲) / بهار ۱۴۰۱



شکل ۴. دمای عمق لایه های آسفالتی اندازه گیری شده در مقایسه با مقادیر پیش بینی شده برای داده های اعتبارسنجی (ایالت مونتانا)



شکل ۵. نتایج اعتبارسنجی مدل توسعه یافته (ایالت مونتانا)

جدول ۴. پارامترهای ارزیابی عملکرد مدل (داده های اعتبارسنجی)

پارامتر ارزیابی	مقدار
SSE	۲۳۰/۱۶
S_e	۰/۷۶
S_e/S_y	۰/۲۶
$(LOE) R^2$	۰/۹۳
شیب	۰/۹۹۷۸
عرض از مبدأ	۰/۲۹۶۷
RMSE	۰/۲۶

۷. نتیجه گیری

در این پژوهش پیش بینی دمای عمق لایه های آسفالتی بر اساس داده های جمع آوری شده به وسیله ایستگاه های خودکار آب و

37. Trend Line

38. Root Mean Squared Error

۹. منابع

- صدیقیان فرد، محمد و صولتی‌فر، نادر (۱۳۹۹). "تحلیل مدل‌های رگرسیونی پیش‌بینی دمای عمق لایه‌های آسفالتی - مطالعه مروری"، مهندسی عمران امیرکبیر، در حال چاپ.

- صولتی‌فر، نادر و عباس قربانی، مجتبی (۱۳۹۸). "کالیبراسیون مدل‌های رگرسیونی مبتنی بر اصول ویسکوالاستیک برای پیش‌بینی مدول دینامیکی لایه‌های آسفالتی در حال بهره‌برداری"، فصلنامه مهندسی حمل و نقل، در حال چاپ.

- Akihiro, F., Akira, S. and Teruyuki, F. (2012). "A New Approach to Modeling Vehicle-Induced Heat and Its Thermal Effects on Road Surface Temperature", Journal of Applied Meteorology and Climatology, Vol. 51, Issue. 1, pp. 1980-1993. doi: <https://doi.org/10.1175/JAMC-D-11-0156.1>

- Bai, Q., Qian, Z. and Li, H. (2011). "Asphalt Pavement Temperature Field Model Based on Statistic Regression Method", Journal of Highway and Transportation Research and Development, Vol. 28, No. 11, pp. 27-31. doi: <https://doi.org/10.1155/2018/1837952>

- Bezerra, M. A., Santelli, R. E., Oliveira, E. P., Villar, L. S. and Escalera, L. A. (2008), "Response Surface Methodology (RSM) as a Tool for Optimization in Analytical Chemistry", Talanta, Vol. 76, Issue. 5, pp. 965-977. doi: <https://doi.org/10.1016/j.talanta.2008.05.019>

- Cao, L., Dong, Z. and Sun, L. (2007). "Research on Permanent Deformation of Asphalt Pavement Considering Pavement

استفاده شده است؛ با این حال برای افزایش گستره عملکرد و جامعیت مدل، می‌توان داده‌های بیشتر و همچنین فاکتورهای دیگری مانند مشخصات مصالح و ... را مورد بررسی و تحلیل قرار داد.

۸. پی‌نوشت‌ها

1. Analytical
2. Soft Computing
3. Artificial Neural Networks
4. Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System
5. Group Method of Data Handling
6. Genetic Expression Programming
7. Back-Propagation
8. Sugeno
9. Genetic Algorithm
10. Genetic Programming
11. Falling Weight Deflectometer
12. Backcalculation
13. Mechanistic-Empirical
14. Evaluation of Layer Moduli and Overlay Design
15. AASHTO
16. Strategic Highway Research Program
17. Long-Term Pavement Performance
18. Seasonal Monitoring Program
19. General Pavement Studies
20. Specific Pavement Studies
21. Ohio
22. SHRP_ID
23. State_Code
24. Construction_No
25. Module
26. Automated Weather Station
27. Excel
28. Pearson Correlation
29. Full Quadratic
30. Stepwise
31. Coefficient of Determination
32. Significance Level
33. Interaction
34. Goodness-of-Fit
35. Bias
36. Line of Equality

فصلنامه مهندسی حمل و نقل / سال سیزدهم / شماره سوم (۵۲) / بهار ۱۴۰۱

- Huber, G. A. (1994). "Weather Database for the SUPERPAVE (Trademark) Mix Design System, Strategic Highway Research Program, SHRP-A-648A, National Research Council, Washington, D.C., USA.
- Irwin, R. S. and Boston, I. (2005). "Rigid and Flexible Pavement Design", Transportation Research Record, Journal of the Transportation Research Board, No.1919, Washington, D.C., USA.
- Jing, C. and Zhang, J. (2018). "Prediction Model for Asphalt Pavement Temperature in High-Temperature Season in Beijing", Advances in Civil Engineering, Vol. 2018, Article ID. 1837952. doi: <https://doi.org/10.1155/2018/1837952>
- Kang, H. G., Zheng, Y. X. and Cai, Y. C. (2007). "Regression Analysis of Actual Measurement of Temperature Field Distribution Rules of Asphalt Pavement", China Journal of Highway and Transport, Vol. 20, No. 6, pp. 13–18.
- Kim, Y. R. and Lee, Y. C. (1995). "Interrelationships among Stiffnesses of Asphalt-Aggregate Mixtures", Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists, Vol. 64, pp. 575–609.
- Lukanen, E. O., Chunhua, H. and Skok, E. L. (1998). "Probabilistic Method of Asphalt Binder Selection Based on Pavement Temperature", J. of the Transportation Research Board, Vol. 1609, Issue. 1, pp. 12-20. doi: <https://doi.org/10.3141/1609-02>
- Marshall, C., Meier, R. and Welch, M. (2001). "Seasonal Temperature Effects on Flexible Pavements in Tennessee", Transportation Research Board, Vol. 1764, Issue. 1, pp. 89-96. doi: <https://doi.org/10.3141/1764-10>
- Temperature Distribution", Journal of Tongji University, Vol. 35, No. 12, pp. 1617–1621.
- Chapman, L., Thornes, J. E. and Bradley, A. V. (2001). "Modeling of Road Surface Temperatures from a Geographical Parameter Database, Part. 1, Stat. Meteor. Appl., Vol. 8, Issue. 4, pp. 409–419. doi: <https://doi.org/10.1017/S1350482701004030>
- Christison, J. T. and K. O. Anderson, K. O. (1972). "The Response of Asphalt Pavements to Low Temperature Climatic Environments", In Proceedings of AIRD International Conference on the Structural Design of Asphalt Pavements, pp. 41–52, Grosvenor House, Park Lane, London, UK.
- Diefenderfer, B. K., Al-Qadi, I. L. and Reubush, S. D. (2002). "Development and Validation of a Model to Predict Pavement 10 Advances in Civil Engineering Temperature Profile", J. of the Transportation Research Board, Washington, D.C., USA.
- Diefenderfer, B. K., Al-Qadi, I. L. and Diefenderfer, S. D. (2006), "Model to Predict Pavement Temperature Profile: Development and Validation", Journal of Transportation Engineering, Vol. 132 Issue. 2. doi: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-947X\(2006\)132:2\(162\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-947X(2006)132:2(162))
- Dong, Z. J., Li, S. I. and Wen, J. Y. (2014). "Real-Time Temperature Field Measurement of Asphalt Pavement Based on Fiber Bragg Grating Measuring Technology", Journal of Traffic and Transportation Engineering, Vol. 14, No. 2, pp. 1–6.
- FHWA. (2017). "The Long-Term Pavement Performance Program", Publication No. FHWA-HRT-15-049, Turner-Fairbank Highway Research Center, 6300 Georgetow Pike, McLean, VA 22101.

- Shrestha, N. (2020). "Detecting Multicollinearity in Regression Analysis", American Journal of Applied Mathematics and Statistics, 2020, Vol. 8, No. 2, 39-42. doi: <https://doi.org/10.12691/ajams-8-2-1>
- Solatifar, N. and Lavasani, S. M. (2020). "Development of An Artificial Neural Network Model for Asphalt Pavement Deterioration Using LTPP Data", Journal of Rehabilitation in Civil Engineering, Vol. 8, No. 1, pp. 121-132. doi: <https://dx.doi.org/10.22075/jrce.2019.17120.1328>
- Solatifar, N., Abbasghorbani, M., Kavussi, A. and Sivilevičius, H. (2018). "Prediction of Depth Temperature of Asphalt Layers in Hot Climate Areas", Journal of Civil Engineering and Management, Vol. 24, No. 7, pp. 516-525. doi: <https://doi.org/10.3846/jcem.2018.6162>
- Wang, D. and Roesler, J. R. (2012). "One-Dimensional Rigid Pavement Temperature Prediction Using Laplace Transformation," Journal of Transportation Engineering, Vol. 138, No. 9, pp. 1171-1177. doi: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)TE.1943-5436.0000413](https://doi.org/10.1061/(ASCE)TE.1943-5436.0000413)
- Xu, B., Dan, Han-Cheng. and Li, L. (2017). "Temperature Prediction Model of Asphalt Pavement in Cold Regions Based on an Improved BP Neural Network", Applied Thermal Engineering, Vol. 120, pp. 568-580. doi: <https://dx.doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2017.04.024>
- Park, H. M., Kim, Y. R. and Park, S. (2002). "Temperature Correction of Multiload-Level Falling-Weight Deflectometer Deflections". J. of the Transportation Research Board, Vol. 1806, pp. 3-8. doi: <https://doi.org/10.3141/1806-01>
- Petersen, C. and Mahura, A. (2012). "Influence of the Pavement Type on the Road Surface Temperature", In 16th International Road Weather Conference, May (23-25), Helsinki, Finland.
- Qin, Y. and Hiller, J. E. (2011). "Modeling Temperature Distribution in Rigid Pavement Slabs: Impact of Air Temperature", Construction and Building Materials, Vol. 25, No. 9, pp. 3753-3761. doi: <https://10.1016/j.conbuildmat.2011.04.015>
- Rayer, P. J. (1987). "The Meteorological Office Forecast Road Surface Temperature Model", Meteor. Magazine, Vol. 116, pp. 180-191.
- Shao, J. and Lister, P. J. (1996). "An Automated Now casting Model of Road Surface Temperature and State for Winter Road Maintenance", Journal of Applied Meteorology and Climatology (JAMC), Vol. 35, pp. 1352-1361. doi: [https://doi.org/10.1175/1520-0450\(1996\)035%3C1352:AANMOR%3E2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0450(1996)035%3C1352:AANMOR%3E2.0.CO;2)
- Shao, L., Park, S. W., & Kim, Y. R. (1997). "Simplified Procedure for Prediction of Asphalt Pavement Subsurface Temperatures Based on Heat Transfer Theories", J. of the Transportation Research Board, Vol. 1568, Issue. 1, pp. 114-123. doi: <https://doi.org/10.3141/1568-14>

محمد صدیقیان فرد، درجه کارشناسی در رشته مهندسی عمران را در سال ۱۳۹۷ از دانشگاه آزاد اسلامی اخذ نمود. در حال حاضر دانشجوی کارشناسی ارشد در رشته مهندسی عمران - راه و ترابری در دانشگاه ارومیه می‌باشد. زمینه‌های پژوهشی مورد علاقه ایشان سیستم مدیریت روسازی (PMS) و مدل‌سازی با استفاده از روش‌های یادگیری ماشین (ML) است.



نادر صولتی فرد، درجه کارشناسی در رشته مهندسی عمران را در سال ۱۳۸۸ از دانشگاه ارومیه و درجه کارشناسی ارشد در رشته مهندسی عمران - راه و ترابری را در سال ۱۳۹۰ از دانشگاه تهران اخذ نمود. در سال ۱۳۹۵ موفق به کسب درجه دکتری در رشته مهندسی عمران - راه و ترابری از دانشگاه تربیت مدرس گردید. زمینه‌های پژوهشی مورد علاقه ایشان سیستم مدیریت روسازی (PMS)، آزمایش‌های غیرمخرب (NDT)، بارگذاری تسریع یافته روسازی (APT) و تکنولوژی قیر و آسفالت بوده و در حال حاضر عضو هیات علمی با مرتبه استادیار در دانشگاه ارومیه است.

