

ارزیابی مدل‌های رگرسیونی مختلف پیش‌بینی دمای عمق لایه‌های آسفالتی با

استفاده از برداشت‌های میدانی روسازی راه‌های کشور

محمد صدیق‌ان فرد، کارشناسی ارشد، گروه مهندسی عمران، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران

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

Email: n.solatifar@urmia.ac.ir

پذیرش: ۱۴۰۰/۰۶/۰۳

دریافت: ۱۴۰۰/۰۲/۰۳

چکیده

در این پژوهش با استفاده از نتایج آزمایش‌های میدانی در شش سایت روسازی آسفالتی واقع در پنج استان کشور با شرایط آب و هوایی مختلف، دمای عمق لایه‌های آسفالتی تعیین شده است. در این راستا از چهار مدل رگرسیونی پیش‌بینی دمای عمق لایه‌های آسفالتی شامل مدل‌های گدافا و همکاران، البیاتی و علانی، BELLS و همچنین پارک و همکاران استفاده شده است. برای ارزیابی عملکرد و قابلیت این مدل‌ها در پیش‌بینی دمای عمق لایه‌های آسفالتی از پارامترهای آماری دقت و بایاس بهره گرفته شده است. بررسی نتایج مقایسه مقادیر دمای عمق پیش‌بینی شده با مقادیر اندازه‌گیری در حین انجام آزمایش افت و خیز سنج وزنه افتان (FWD) نشان می‌دهد این مدل‌ها از دقت و توانایی مناسبی برای پیش‌بینی دمای عمق لایه‌های آسفالتی روسازی راه‌های کشور برخوردار نیستند. از این رو افزایش دقت و کاهش خطای پیش‌بینی با پرداخت و کالیبراسیون این مدل‌ها و ارائه مدل‌های جدید برای استفاده در تعیین دمای عمق لایه‌های آسفالتی روسازی راه‌های کشور ضروری است. در نهایت، مدل البیاتی و علانی با بیشترین دقت و آریب پیش‌بینی پایین (همبستگی خوب بین مقادیر پیش‌بینی و اندازه‌گیری دمای عمق) به عنوان بهترین مدل پیش‌بینی دمای عمق لایه‌های آسفالتی از بین مدل‌های مورد بررسی انتخاب شده است.

کلمات کلیدی: روسازی آسفالتی، دمای عمق لایه‌های آسفالتی، مدل‌های پیش‌بینی، عملکرد روسازی، آزمایش FWD

۱. مقدمه

روسازی به عنوان سازه‌ای که در فضای آزاد ساخته می‌شود، در معرض عوامل محیطی بوده که بر عملکرد و عمر مفید آن تأثیر می‌گذارند. دمای روسازی تحت تأثیر این عوامل مانند دمای هوا، سرعت باد، تابش آفتاب و ... تغییر می‌کند. یکی از پارامترهای مهم محیطی که تغییر شکل روسازی‌های آسفالتی را تحت تأثیر قرار می‌دهد، دمای عمق لایه‌های آسفالتی است؛ که این تأثیر به دلیل رفتار ویسکوالاستیک مخلوط آسفالتی می‌باشد [Kim and Lee, 1995; Park, Kim and Park, 2002; Shao, Park and Kim, 1997].

دمای عمق لایه‌های آسفالتی عموماً متأثر از ویژگی‌های جذب و انعکاس انرژی خورشیدی لایه‌ها و مشخصات حرارتی مخلوط آسفالتی می‌باشد [Petersen and Mahura, 2012]. از طرف دیگر تغییرات دمایی روزانه و فصلی در شکل‌گیری تنش‌های حرارتی نقش به سزایی دارند. این تغییرات می‌تواند باعث ترک‌خوردگی لایه رویه آسفالتی شود که این امر در پیش‌بینی دوره عمر لایه‌های آسفالتی تأثیرگذار است. در مناطقی که تغییرات دمایی زیادی را تجربه می‌کنند، شرایط حرارتی لایه‌ها نقشی مهم در ترک‌خوردگی سیستم روسازی چندلایه‌ای دارد [Diefenderfer, Al-Qadi and Reubush, 2002].

سختی لایه‌های آسفالتی تأثیر زیادی بر روی ظرفیت سازه‌ای روسازی‌های انعطاف‌پذیر دارد. این سختی وابسته به دمای لایه بوده و به صورت روزانه و فصلی تغییر می‌کند. با افزایش دما سختی لایه آسفالتی کاهش می‌یابد که این امر باعث تشدید تنش در لایه‌های مختلف روسازی به خصوص در لایه‌های اساس و زیراساس می‌شود [Diefenderfer, Al-Qadi and Reubush, 2002; Diefenderfer, 2006]. با افزایش دما، مخلوط آسفالتی مانند مایع ویسکوز و با کاهش آن مانند جامد الاستیک عمل می‌کند [Diefenderfer, Al-Qadi and Reubush, 2002; Diefenderfer, Al-Qadi and Diefenderfer, 2006]. در نتیجه دما تأثیر قابل توجهی بر پاسخ روسازی به بارهای وارد

دارد. دمای عمق یکی از پارامترهای لازم و ضروری در فرآیند تحلیل، طراحی و ارزیابی روسازی است. این دما و نیز فرکانس بارگذاری از پارامترهای تأثیرگذار بر عملکرد روسازی‌های آسفالتی می‌باشند [Clark, Gallage and Yeaman, 2020].

برای بررسی تأثیر دما بر رفتار لایه‌های آسفالتی، تعیین نحوه توزیع دما در عمق‌های مختلف لایه در طول شبانه‌روز ضروری است. با استفاده از این توزیع دمایی، بررسی اثرات دما بر روسازی به خصوص برای طراحی روکش و مطالعات بهسازی راه انجام می‌شود. توزیع دما در روسازی‌های انعطاف‌پذیر متأثر از شرایط محیطی از جمله تابش نور آفتاب، انعکاس تابش توسط سطح روسازی، بارش باران، سرعت باد، امواج جوی موج بلند، انتقال گرما بین لایه‌ها و تبخیر بوده [Fajing et al., 2015] و به دلیل رفتار ویسکوالاستیک مصالح آسفالتی، مقاومت و مدول سختی آن در دماهای مختلف، متفاوت است که در نتیجه این رفتار باعث بروز خرابی‌ها به شکل‌های مختلف در روسازی می‌شود. به عنوان مثال ترک‌خوردگی روسازی در دماهای پایین و شیارشدگی در دماهای بالا رخ می‌دهد [Herb et al., 2011].

مدل‌ها و روش‌های مختلفی برای پیش‌بینی دمای عمق لایه‌های آسفالتی توسط پژوهشگران ارائه شده است. مدل‌های تحلیلی تعادل گرمایی (انتقال حرارت) توسط رایبر [Rayer, 1987] و چاپمن و همکاران [Chapman, Thornes and Bradley, 2001] توسعه یافته‌اند. این مدل‌ها پارامترهای حرارت دریافتی و از دست رفته سطح روسازی مرتبط با عبور وسایل نقلیه را مورد بررسی قرار نمی‌دهند [Akihito, Akira and Teruyuki, 2012]. کین و هیلر [Qin and Hiller, 2011] مدل انتقال گرمای یک بعدی را برای پیش‌بینی نحوه توزیع دما در روسازی توسعه داده‌اند.

متیچ و همکاران [Matic et al., 2014] مدلی را برای پیش‌بینی دمای عمق روسازی با استفاده از شبکه‌های عصبی ارائه

Velasquez et al., [Alani, 2015], ولاسکوئز و همکاران [Asefzadeh, Hashemian, 2008], آصف‌زاده و همکاران [Li, Liu and Sun, and Bayat, 2017], لی و همکاران [2018] و مدل BELLS [Stubstad et al., 1994] در این خصوص توسعه یافته است. در این پژوهش‌ها دمای عمق لایه آسفالتی با استفاده از داده‌های آب و هوایی پیش‌بینی شده است. در مطالعه انجام شده توسط صدیقیان فرد و صولتی‌فرد [Sedighian-Fard and Solatifar, 2020], عملکرد، دقت پیش‌بینی و همچنین تحلیل حساسیت دوازده مدل رگرسیونی توسعه یافته برای پیش‌بینی دمای عمق لایه‌های آسفالتی به طور جامع مورد بررسی و تحلیل قرار گرفته است. پیش‌بینی مستقیم، سریع و عدم نیاز به انجام اندازه‌گیری‌های میدانی از جمله مهم‌ترین مزایای به کارگیری مدل‌های پیش‌بینی دمای عمق لایه‌های آسفالتی است. هدف این پژوهش امکان‌سنجی استفاده و ارزیابی عملکرد چهار مدل پیش‌بینی دمای عمق لایه‌های آسفالتی مبتنی بر رگرسیون شامل مدل‌های گدافا و همکاران [Gedafa, Hossain and Romanoschi, 2014], البیاتی و علانی [Albayati and Alani, 2015], مدل BELLS [Stubstad et al., 1994] و پارک و همکاران [Park, Buch and Chatti, 2001] در تعیین دمای عمق لایه‌های آسفالتی در روسازی راه‌های کشور می‌باشد. استفاده از داده‌های لایه‌های آسفالتی روسازی‌هایی با مشخصات مختلف (مانند دانه‌بندی، نوع قیر، روسازی بهسازی شده یا جدید (تازه ساخت) و ...)، انتخاب محل جغرافیایی روسازی‌ها با شرایط آب و هوایی متنوع (مناطق سرد و مرطوب، معتدل و گرم و خشک) و همچنین استفاده از داده‌های زیاد (حدود ۱۲۵۰ سری داده) از جنبه‌های نوآوری پژوهش حاضر می‌باشد.

کرده‌اند. نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که دمای روسازی وابسته به دمای سطح، زمان روز و عمق مورد نظر در روسازی می‌باشد. همچنین مدل شبکه عصبی پسانتشار^۱ توسعه یافته توسط صدیقیان فرد و صولتی‌فرد [Sedighian-Fard and Solatifar, 2021b] دمای عمق لایه‌های آسفالتی را بر اساس پارامترهای زمان روز، عمق از سطح روسازی، دمای هوا، میانگین سرعت و جهت باد، حداقل رطوبت نسبی هوا و تابش کل آفتاب پیش‌بینی می‌کند. نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که مدل شبکه عصبی عملکرد بهتر و خطای پیش‌بینی کمتری نسبت به مدل رگرسیونی غیرخطی [Sedighian-Fard and Solatifar, 2021a] دارد. همچنین پیش‌بینی دمای عمق لایه‌های آسفالتی با مدل شبکه عصبی پرسپترون چندلایه^۲ (MLP) [Godoy et al., 2018] نشان می‌دهد که شبکه عصبی MLP دمای عمق لایه‌های آسفالتی را با دقت خوبی پیش‌بینی می‌کند و کارایی بهتری نسبت به مدل رگرسیونی BELLS [Stubstad et al., 1994] دارد.

روابط رگرسیونی برای پیش‌بینی دمای عمق لایه‌های آسفالتی جایگزین کم‌هزینه و سریع برای تعیین دمای روسازی در محل می‌باشند [Minhoto, Pais and Pereira, 2005]. این روش‌ها به دلیل ساده‌تر بودن کار با نرم‌افزارهای آن، امکان به دست آوردن رابطه ریاضی و ... توسط بسیاری از پژوهشگران برای پیش‌بینی دمای عمق لایه‌های آسفالتی مورد استفاده قرار گرفته است. مدل‌های مختلفی از جمله رم‌دان و وهاب [Ramadhan and Wahhab, 1997], دیفندرِفر و همکاران [Diefenderfer, Al-Qadi and Reubush, 2002; Diefenderfer, Al-Qadi and Diefenderfer, 2006], حسن و همکاران [Hassan et al., 2005], طباطبایی و همکاران [Tabatabaie, Ziari and Khalili, 2008], گدافا و همکاران [Gedafa, Hossain and Romanoschi, 2014], اسلام و همکاران [Islam, Ahsan and Tarefder, 2015], البیاتی و علانی [Albayati and

۲. مدل‌های پیش‌بینی دمای عمق لایه‌های

آسفالتی

چهار مدل رگرسیونی توسعه یافته توسط پژوهشگران مختلف که در این پژوهش برای پیش‌بینی دمای عمق لایه‌های آسفالتی مورد استفاده قرار گرفته‌اند به شرح زیر می‌باشد:

۲-۱ مدل گدافا و همکاران

گدافا و همکاران [Gedafa, Hossain and Romanoschi, 2014] با طراحی و ساخت چهار سیستم روسازی ضخیم در کانزاس، که ضخامت لایه‌های آسفالتی مشابه روش طراحی سازه‌ای دپارتمان حمل و نقل آن ایالت است، آزمایش افت و خیزسنج وزنه افتان^۳ (FWD) را انجام داده‌اند. دماسنج‌ها درون حفرات ایجاد شده در لایه آسفالتی قرار داده شده است. داخل حفرات برای جلوگیری از یخ‌زدگی، با روغن مناسب پر شده و نیز از حسگر مادون قرمز FWD برای اندازه‌گیری دمای سطح لایه آسفالتی بهره گرفته شده است. در این پژوهش، دمای نیمه عمق هر لایه (لایه آسفالتی و لایه اساس) به عنوان متغیر وابسته و دمای سطح، میانگین دمای هوای روز قبل، زمان روز در حین اندازه‌گیری و مقدار نیمه عمق هر لایه به عنوان متغیرهای مستقل در نظر گرفته شده‌اند. رابطه ۱ برای پیش‌بینی دمای نیمه عمق لایه‌های روسازی ارائه شده است:

$$T_{pave} = -5.374 - 0.752T_{sur} + 0.022T_{sur}^2 + 2.016T_{ave} - 0.032T_{sur} \times T_{ave} + 1.549t_d - 0.022D \quad (1)$$

که در این رابطه T_{pave} دمای نیمه عمق لایه، درجه سلسیوس؛ T_{sur} دمای سطح روسازی، درجه سلسیوس؛ T_{ave} میانگین دمای هوای روز قبل، درجه سلسیوس؛ t_d زمان اندازه‌گیری دما، به صورت اعشاری؛ و D عمق از سطح روسازی، میلی‌متر است. مدل گدافا و همکاران دمای نیمه عمق روسازی را با دقت خوبی پیش‌بینی می‌کند. همچنین دقت^۴ خوب (ضریب تعیین^۵ (R^2) برابر ۰/۹۴) و آریب^۶ کم پیش‌بینی مدل نشان از عملکرد مناسب

آن در تعیین دمای نیمه عمق لایه‌های آسفالتی می‌باشد [Sedighian-Fard and Solatifar, 2020].

۲-۲ مدل آلبیاتی و علانی

در پژوهش انجام شده توسط آلبیاتی و علانی [Albayati and Alani, 2015] از تحلیل رگرسیون مدل پیش‌بینی دمای عمق لایه‌های آسفالتی بر اساس پارامتر دمای هوا بهره گرفته شده است. داده‌های دمای هوا از سازمان هواشناسی کشور عراق اخذ شده و داده‌های دمای عمق با انجام آزمایش میدانی در پارکینگ دانشکده مهندسی عمران دانشگاه بغداد از ۲۷ آوریل تا ۱۶ دسامبر ۲۰۰۹ جمع‌آوری شده است. سازه روسازی شامل لایه روکش، لایه توپکا، لایه بیندر، لایه اساس آسفالتی و نیز لایه زیراساس با مصالح دانه‌ای به ترتیب با ضخامت‌های چهار، پنج، شش، ۱۰ و ۳۰ سانتی‌متر بوده است. دماسنج‌ها در عمق‌های دو، هفت و ۱۲ سانتی‌متر از سطح روسازی جایگذاری شده‌اند. مدل توسعه یافته بر اساس پارامتر دمای هوا و عمق از سطح روسازی به صورت رابطه ۲ می‌باشد:

$$T_{pave} = 1.217T_{air} - 0.354Z \quad (2)$$

که در این رابطه T_{pave} دمای روسازی، درجه سلسیوس؛ T_{air} دمای هوا، درجه سلسیوس؛ و Z عمق از سطح روسازی، سانتی‌متر است. دقت این مدل (R^2) برابر ۰/۹۹ و انحراف استاندارد آن برابر ۳/۴۹ می‌باشد [Albayati and Alani, 2015].

۲-۳ مدل BELLS

عبارت BELLS نیز از دسته مدل‌های رگرسیونی بوده و از پنج حرف ابتدای نام توسعه‌دهندگان آن (Baltzer, Ertman, Larsen, Lukanen, Stubstad) تشکیل شده است [Stubstad et al., 1994]. در مطالعات انجام گرفته [Stubstad et al., 1994; Baltzer and Jansen 1994]، دمای موثر لایه آسفالتی در یک-سوم عمق لایه به جای نیمه عمق آن پیشنهاد شده است. بعدها مدل BELLS توسط اداره راه فدرال آمریکا و بر اساس داده‌های فصلی برداشت شده در برنامه

فصلنامه مهندسی حمل‌ونقل / سال چهاردهم / شماره اول (۵۴) / پاییز ۱۴۰۱

ارزیابی مدل‌های رگرسیونی مختلف پیش‌بینی دمای عمق لایه‌های آسفالتی با استفاده از برداشت‌های میدانی روسازی راه‌های کشور

BELLS3 برای کاربرد در آزمایش‌های معمول FWD، که سطح روسازی عموماً برای مدت کمتر از یک دقیقه در سایه بوده و بارگذاری کمتر از ۳۰ ثانیه می‌باشد، توسعه داده شده است [Marshall, Mier and Welch, 2001].

این مدل با استفاده از تعداد ۱۰۳۰۴ داده LTTP توسعه داده شده است که ضریب تعیین آن برابر ۰/۹۷۵ می‌باشد. همچنین برای بررسی بیشتر عملکرد این مدل، می‌توان به پژوهش صولتی‌فر و همکاران [Solatifar et al., 2018] اشاره کرد. برای روسازی‌های قدیمی (بهبودی شده)، مدل با ضریب تعیین ۰/۹۸ دارای دقت بسیار خوب و با شیب^۸ و عرض از مبدأ خط روند^۹ به ترتیب برابر ۰/۹۵۶ و ۱/۳۷۵ دارای اُریب پیش‌بینی کم است. در حالی که این مدل در پیش‌بینی دمای عمق لایه‌های آسفالتی در روسازی‌های تازه ساخت، دارای خطا می‌باشد. به طوری که مدل با ضریب تعیین ۰/۹۶ دارای دقت خوب و با شیب و عرض از مبدأ خط روند به ترتیب برابر ۰/۸۹۸ و ۰/۸۷۴ دارای اُریب پیش‌بینی زیادی است. همچنین همچنین مقدار خطای جذر میانگین مربعات^{۱۰} (RMSE) نیز برای روسازی‌های تازه ساخت برابر ۵/۶۰۴ و برای روسازی‌های قدیمی برابر ۱/۰۹۶ درجه سلسیوس می‌باشد [Sedighian-Fard and Solatifar, 2020].

۲-۴ مدل پارک و همکاران

پارک و همکاران [Park, Buch and Chatti, 2001] مدل رگرسیونی برای پیش‌بینی دمای عمق روسازی آسفالتی را در هر زمان از روز توسعه داده‌اند. این مدل با هدف پیش‌بینی و بررسی بهتر نیمرخ دمایی لایه‌های آسفالتی در زمان‌های مختلف روز برای بهبود و افزایش دقت محاسبات بازگشتی مشخصات سازه‌ای لایه‌های روسازی حاصل از نتایج آزمایش FWD انجام شده است. استفاده از متغیرهای دمای سطح روسازی و زمان روز و در نتیجه ساده بودن رابطه رگرسیونی آن از مزایای این مدل (رابطه ۴) می‌باشد:

عملکرد بلندمدت روسازی^۷ (LTTP) مورد استفاده قرار گرفته است [FHWA, 1994]. مدل توسعه داده شده به صورت رابطه ۳ می‌باشد:

$$T_d = \beta_0 + \beta_1 IR + [\log(d) - 1.25][\beta_2 IR + \beta_3 T_{(1-day)} + \beta_4 \sin(hr_{18} - 15.5)] + \beta_5 IR \sin(hr_{18} - 13.5) \quad (3)$$

که در این رابطه T_d دمای روسازی در عمق d لایه آسفالتی، درجه سلسیوس؛ IR دمای اندازه‌گیری سطح با استفاده از حسگر مادون قرمز دستگاه FWD، درجه سلسیوس؛ d عمق مورد نظر، میلی‌متر؛ $T_{(1-day)}$ میانگین حداقل و حداکثر دمای هوای روز قبل، درجه سلسیوس؛ و hr_{18} زمان روز در سیستم زمانی ۱۸ ساعته است. محاسبات از یک سیستم ۱۸ ساعته زمان‌های صعودی و نزولی که توسط [Stubstad et al., 1994] ارائه شده، استفاده می‌کند. همچنین $\beta_0, \beta_1, \beta_2, \beta_3, \beta_4, \beta_5$ ضرایب متغیرهای مدل بوده که در جدول ۱ ارائه شده است.

جدول ۱. ضرایب روابط BELLS2 و BELLS3

[AASHTO T317, 2009]

ضریب	BELLS2	BELLS3
β_0	+۲/۷۸۰	+۰/۹۵۰
β_1	+۰/۹۱۲	+۰/۸۹۲
β_2	-۰/۴۲۸	-۰/۴۴۸
β_3	+۰/۵۵۳	+۰/۶۲۱
β_4	+۲/۶۳۰	+۱/۸۳۰
β_5	+۰/۰۲۷	+۰/۰۴۲

مدل اولیه BELLS در دماهای پایین، دمای لایه آسفالتی را بیشتر و در دماهای بالا، دمای لایه آسفالتی را کمتر پیش‌بینی می‌کند (دارای خطا است). مدل BELLS2 برای اصلاح خطای مادون قرمز، در نظر گرفتن اثر سایه و همچنین گسترش داده‌ها، بسط یافته است [Solatifar et al., 2018; Marshall, Mier and Welch, 2001]. در این مدل، برای کاهش داده‌های مورد نیاز از میانگین حداقل و حداکثر دمای هوا در روز قبل انجام آزمایش FWD استفاده می‌شود. همچنین مدل

همچنین نام محورهای آنها در جدول ۲ ارائه شده است. این سایت‌های آزمایشی در مناطق با شرایط اقلیمی و آب و هوایی متنوع (سرد و مرطوب، معتدل و گرم و خشک) واقع شده‌اند. در این پژوهش از ۱۲۵۰ سری داده برای پیش‌بینی دمای عمق لایه‌های آسفالتی بهره گرفته شده است. ضخامت لایه‌های آسفالتی و لایه‌های اساس و زیراساس، دمای هوا، دمای هوای یک روز قبل از انجام آزمایش FWD، دمای سطح لایه آسفالتی، دما در عمق ۱۰ سانتی‌متری از سطح روسازی و زمان اندازه‌گیری دما داده‌های بانک اطلاعاتی مورد استفاده را تشکیل می‌دهد. محدوده داده‌های موجود در جدول ۳ ارائه شده است.

جدول ۲. کد سایت و نام شش محور روسازی‌های تحت آزمایش

کد سایت	نام محور
S1	اردبیل - سرچم (اردبیل)
S2	چالوس - مرزن آباد (آزادراه تهران - شمال)
S3	عسلویه - سیراف (بوشهر)
S4	قم - گرمسار (قم)
S5	سه راهی خنداب (مرکزی)
S6	سه راهی شهابیه - محلات (مرکزی)

جدول ۳. محدوده داده‌های پژوهش حاضر

متغیر	واحد	محدوده داده‌ها
ضخامت لایه‌های آسفالتی	mm	۸۰ - ۲۵۹
دمای هوا	°C	۱/۹ - ۴۲/۵
دمای هوای یک روز قبل	°C	۴ - ۲۸
دمای سطح لایه آسفالتی	°C	۵/۱ - ۴۵/۱
دما در عمق ۱۰ سانتی‌متری	°C	۰/۱ - ۴۶/۷

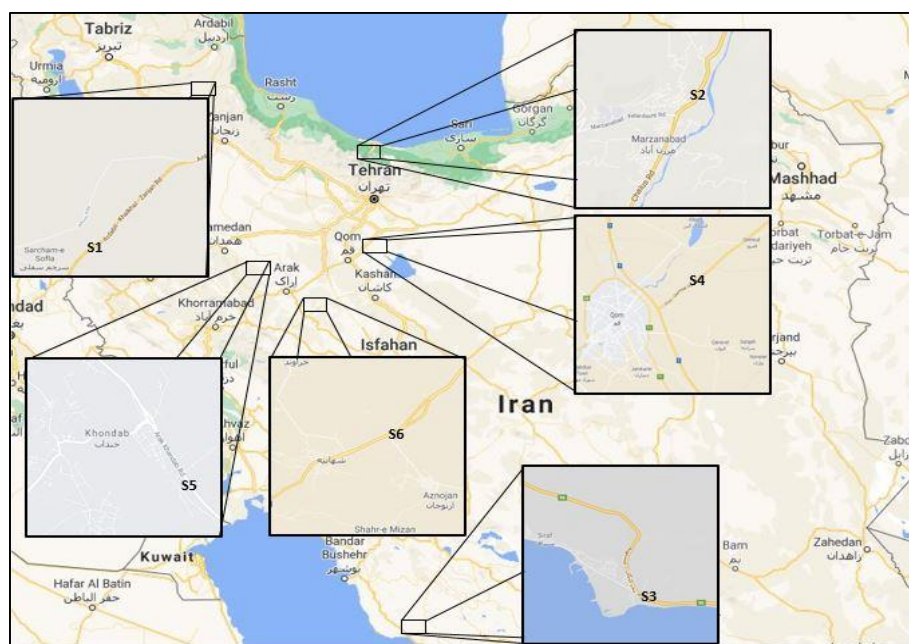
$$T_z = T_{surf} + (-0.3451z - 0.0432z^2 + 0.00196z^3) \sin(-6.3252t + 5.0967) \quad (4)$$

که در این رابطه T_z دمای عمق لایه آسفالتی، درجه سلسیوس؛ T_{surf} دمای سطح، درجه سلسیوس؛ z عمق مورد نظر از سطح روسازی، سانتی‌متر؛ و t زمان اندازه‌گیری دما در کسری از روز می‌باشد. مدل توسعه یافته از R^2 بیشتر از ۰/۹۰ برخوردار می‌باشد. همچنین این مدل توسط آصف‌زاده و همکاران [Asefzadeh, Hashemian and Bayat, 2017] کالیبره شده است. در این پژوهش داده‌ها به دو دسته ماه‌های گرم و سرد سال تفکیک شده و کالیبراسیون بر اساس مدل‌هایی برای ماه‌های گرم و سرد سال انجام شده است. نتایج این پژوهش نشان می‌دهد مدل‌های کالیبره شده از همبستگی و دقت خوبی با ضریب تعیین ۰/۹۳ برای ماه‌های گرم و سرد سال برخوردار هستند. شیب خط روند با مقدار ۰/۹۷۸، اُریب پیش‌بینی کمی برای مدل ارائه کرده است [Sedighian-Fard and Solatifar, 2020].

۳. روش شناسی

بر اساس دسترسی به داده‌های راه‌های پُرتردد کشور، سایت‌های آزمایشی این پژوهش تعیین شده است. توجه به تنوع و گستره آب و هوایی، وضعیت ترافیکی (پُرتردد بودن)، گستردگی محل جغرافیایی روسازی‌ها و مشخصات آنها (اعم از دانه‌بندی، تاریخچه ساخت و سایر خصوصیات لایه‌ها و مخلوط‌های آسفالتی) از جمله معیارها در انتخاب روسازی‌های مورد آزمایش بوده است. داده‌های مورد نیاز از روسازی راه‌های استان‌های اردبیل، مازندران، بوشهر، قم و مرکزی به عنوان مناطق انجام آزمایش FWD و برداشت داده‌های دمای عمق از آزمایشگاه فنی و مکانیک خاک کشور دریافت شده است. موقعیت جغرافیایی شش سایت آزمایشی (با کدهای S1 تا S6) در شکل ۱ و

ارزیابی مدل‌های رگرسیونی مختلف پیش‌بینی دمای عمق لایه‌های آسفالتی با استفاده از برداشت‌های میدانی روسازی راه‌های کشور



شکل ۱. محل جغرافیایی شش سایت آزمایشی در روسازی راه‌های آسفالتی واقع در پنج استان کشور

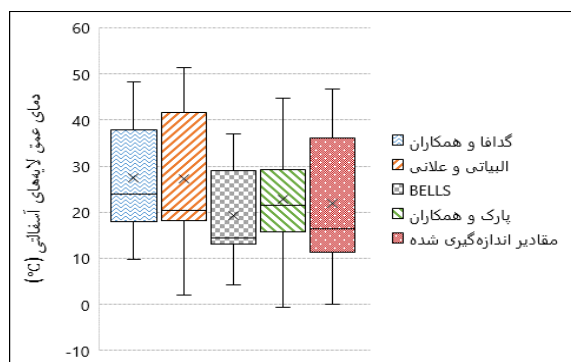
۴. پیش‌بینی دمای عمق لایه‌های آسفالتی

چهار مدل رگرسیونی شامل مدل‌های گدافا و همکاران، البیاتی و ELLS، پارک و همکاران برای پیش‌بینی دمای عمق لایه‌های آسفالتی روسازی‌های سایت‌های آزمایشی این پژوهش مورد استفاده قرار گرفته‌اند. با توجه به متغیرهای ورودی هر یک از مدل‌ها، دمای عمق لایه‌های آسفالتی با استفاده از پایگاه داده توسعه یافته پیش‌بینی شده و نتایج در قالب نمودار در شکل ۲ ارائه شده است.

همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود مدل گدافا و همکاران و مدل البیاتی و ELLS دارای حدود مقادیر پیش‌بینی بزرگ‌تری نسبت به مقادیر اندازه‌گیری هستند. همچنین مدل BELLS و مدل پارک و همکاران نیز مقادیر پیش‌بینی کمتری نسبت به مقادیر اندازه‌گیری و همچنین سایر مدل‌ها دارند. در ادامه عملکرد و دقت پیش‌بینی مدل‌ها مورد بررسی و ارزیابی قرار گرفته است.

۵. ارزیابی عملکرد مدل‌ها

در این بخش عملکرد مدل‌های مورد استفاده در پیش‌بینی دمای عمق لایه‌های آسفالتی توسط معیارهای دقت، آریب پیش‌بینی و نتایج آنالیز واریانس 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:



شکل ۲. پیش‌بینی دمای عمق لایه‌های آسفالتی توسط چهار مدل رگرسیونی در مقایسه با مقادیر اندازه‌گیری

$$SSE = \sum (y - \hat{y})^2 \quad (5)$$

$$S_e = \sqrt{\frac{SSE}{n-1}} \quad (6)$$

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, Kavussi and Abbasghorbani, 2021].

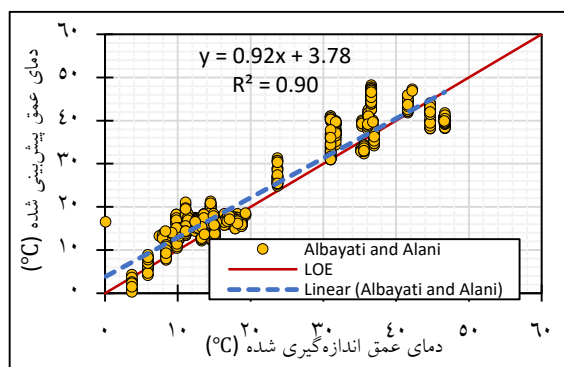
شکل ۳ (الف) تا (د) مقادیر دمای عمق پیش‌بینی را به ترتیب توسط مدل‌های گدافا و همکاران، البیاتی و علانی، BELLS و پارک و همکاران در برابر دمای عمق اندازه‌گیری ارائه می‌کند. همان‌طور که مشاهده می‌شود مقادیر داده‌های پیش‌بینی توسط مدل گدافا و همکاران و مدل البیاتی و علانی در بالای خط برابری (LOE) قرار گرفته‌اند که این نشان‌دهنده بیش‌پیش‌بینی^{۱۲} این مدل‌ها در تعیین دمای عمق لایه‌های آسفالتی روسازی‌های راه‌های کشور می‌باشد. از سوی دیگر دو مدل BELLS و مدل پارک و همکاران نیز دارای مقادیر بیش‌پیش‌بینی در دماهای پایین و کم‌پیش‌بینی^{۱۳} در دماهای بالا هستند.

$$S_y = \sqrt{\frac{\sum [y - \bar{y}]^2}{n-1}} \quad (7)$$

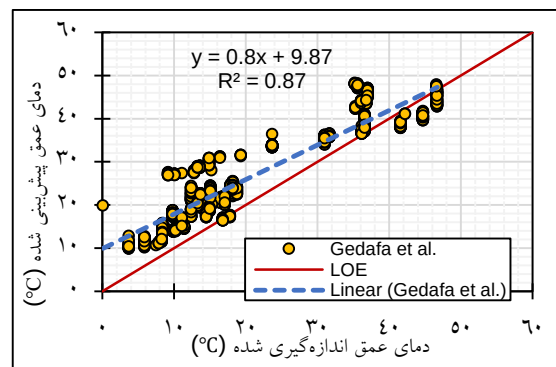
که در این روابط SSE مجموع مربعات خطا، y دمای عمق اندازه‌گیری شده، $\hat{y}$ دمای عمق اندازه‌گیری شده، $\bar{y}$ میانگین مقادیر دمای عمق اندازه‌گیری شده، S_e خطای استاندارد (انحراف معیار خطاها)، S_y انحراف معیار مقادیر اندازه‌گیری و n تعداد نمونه یا مشاهدات است. برای ارزیابی دقت پیش‌بینی مدل از پارامترهای S_e/S_y نسبت خطای استاندارد به انحراف معیار مقادیر اندازه‌گیری و R^2 ضریب تعیین نسبت به خط برابری^{۱۱} (LOE) به صورت رابطه ۸ و برای محاسبه آریب پیش‌بینی مدل از پارامترهای شیب و عرض از مبدأ خط روند مقادیر پیش‌بینی در مقابل مقادیر اندازه‌گیری استفاده شده است:

$$R^2 = 1 - \frac{n-p}{n-1} \left(\frac{S_e}{S_y} \right)^2 \quad (8)$$

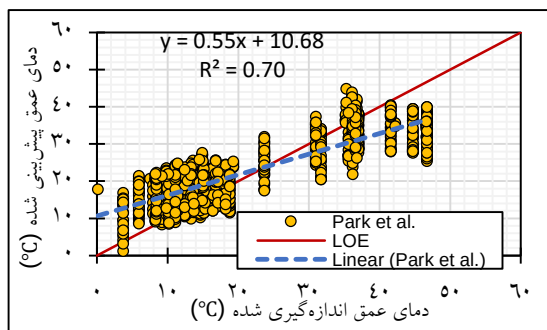
که در این رابطه p تعداد پارامترهای مدل است. بدیهی است هر چه نسبت S_e/S_y کم و به صفر نزدیک باشد و نیز مقدار R^2 به



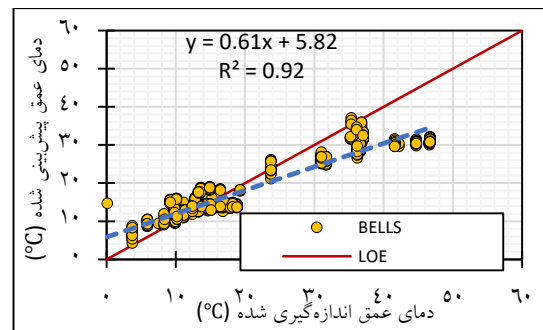
(ب)



(الف)



(د)



(ج)

شکل ۳. دمای عمق پیش‌بینی در برابر مقادیر اندازه‌گیری: (الف) مدل گدافا و همکاران؛ (ب) مدل البیاتی و علانی؛ (ج) مدل BELLS؛ و (د) مدل پارک و همکاران

ارزیابی مدل‌های رگرسیونی مختلف پیش‌بینی دمای عمق لایه‌های آسفالتی با استفاده از برداشت‌های میدانی روسازی راه‌های کشور

۹۵ درصد قرار گرفته است. دلیل زیاد بودن مقدار P-value و همچنین عدم به دست آمدن آن (محاسبه) برای مورد مدل البیاتی و علانی برای متغیر عمق از سطح روسازی، محدود بودن داده‌ها (داده‌های عمق و ...) است.

مدل‌های BELLS، البیاتی و علانی، پارک و همکاران و گدافا و همکاران، به ترتیب دارای خطای ۳۲/۰۲، ۳۴/۶۸، ۵۹/۷۲ و ۷۳/۴۳ درصد در پیش‌بینی دمای عمق لایه‌های آسفالتی راه‌های کشور بوده که این مقادیر نشان دهنده دقت پایین این مدل‌ها است. همچنین معیارهای آماری ارزیابی عملکرد مدل‌های پیش‌بینی در جدول ۸ و همچنین پارامترهای ارزیابی عملکرد این مدل‌ها در جدول ۹ ارائه شده است.

همچنین در این شکل خط روند بین مقادیر پیش‌بینی و اندازه‌گیری رسم شده و معادله آن به همراه ضریب تعیین (R^2) ارائه شده است. از این رابطه می‌توان برای اصلاح مقادیر پیش‌بینی با مقادیر اندازه‌گیری استفاده نمود. همان طور که در این شکل دیده می‌شود، خط روند در مدل BELLS و مدل پارک و همکاران با ضرایب تعیین ۰/۹۲ و ۰/۷۰ به ترتیب قوی‌ترین و ضعیف‌ترین رابطه خطی مقادیر پیش‌بینی دمای عمق لایه‌های آسفالتی را در برابر مقادیر اندازه‌گیری دارند. نتایج آنالیز واریانس بر اساس داده‌های پیش‌بینی شده برای هر یک از مدل‌ها در جدول‌های ۴، ۵، ۶ و ۷ ارائه شده است. همان طور که در این جداول مشاهده می‌شود مقدار P-value تمامی متغیرها به غیر از عمق از سطح روسازی برای هر چهار مدل، در سطح اطمینان

جدول ۴. نتایج آنالیز واریانس برای مدل گدافا و همکاران

-	درجه آزادی	مجموع مربعات تعدیل یافته	میانگین مربعات تعدیل یافته	F-value	P-value
دمای سطح روسازی	۲۳۵	۱۳۱	۰/۵۶	۳/۰۷	۰/۰۰۰
میانگین دمای هوای روز قبل	۸	۹۳۵۳	۱۱۶۹/۰۷	۶۴۵۷/۱۰	۰/۰۰۰
زمان اندازه‌گیری دما	۱۰	۳۷۴۲	۳۷۴/۲۳	۲۰۶۶/۹۵	۰/۰۰۰
عمق از سطح روسازی	۱	۰	۰/۰۴	۰/۲۴	۰/۶۲۳
خطا	۹۹۵	۱۸۰	۰/۱۸	-	-
نقص برازش	۴۹۰	۱۳۲	۰/۲۷	۲/۸۰	۰/۰۰۰
خطای محض	۵۰۵	۴۸	۰/۱۰	-	-
جمع	۱۲۴۹	۱۵۵۵۳۵	-	-	-

جدول ۵. نتایج آنالیز واریانس برای مدل البیاتی و علانی

-	درجه آزادی	مجموع مربعات تعدیل یافته	میانگین مربعات تعدیل یافته	F-value	P-value
دمای هوا	۲۷۸	۱۹۷۴۲۴	۷۱۰/۱۶۰	-	-
عمق از سطح روسازی	۱	۰	۰/۰۰۰	-	-
خطا	۹۷۰	۰	۰/۰۰۰	-	-
جمع	۱۲۴۹	-	-	-	-

جدول ۶. نتایج آنالیز واریانس برای مدل BELLS

	درجه آزادی	مجموع مربعات تعدیل یافته	میانگین مربعات تعدیل یافته	F-value	P-value
دمای سطح روسازی	۲۳۵	۵۶۸۰/۷	۲۴/۱۷۲۳	۸۹۴/۶۸	۰/۰۰۰
میانگین دمای هوای روز قبل	۸	۱۴۵/۷	۱۸/۲۱۳۷	۶۷۴/۱۱	۰/۰۰۰
عمق از سطح روسازی	۱	۰/۱	۰/۱۲۰۵	۴/۴۶	۰/۰۵۳
خطا	۱۰۰۰۵	۲۷/۲	۰/۰۲۷۰	–	–
نقص برازش	۱۰۰۳	۲۷/۲	۰/۰۲۷۱	–	–
خطای محض	۲	۰/۰	۰/۰۰۰	–	–
جمع	۱۲۴۹	۴۶۳۹۰/۴	–	–	–

جدول ۸. معیارهای ارزیابی مدل‌های پیش‌بینی [Pellinen, 2001]

معیار	R^2	S_e/S_y
عالی	$\geq ۰/۹۰$	$\leq ۰/۳۵$
خوب	$۰/۷۰ - ۰/۸۹$	$۰/۳۶ - ۰/۵۵$
متوسط	$۰/۴۰ - ۰/۶۹$	$۰/۵۶ - ۰/۷۵$
ضعیف	$۰/۲۰ - ۰/۳۹$	$۰/۷۶ - ۰/۹۰$
خیلی ضعیف	$\leq ۰/۱۹$	$\geq ۰/۹۰$

شکل ۴ مقایسه بین دقت مدل‌های پیش‌بینی دمای عمق لایه‌های آسفالتی نمونه‌های روسازی راه‌های کشور را ارائه می‌کند. در این شکل تفاضل عدد یک و ضریب تعیین ($1-R^2$) و همچنین نسبت خطای استاندارد پیش‌بینی به انحراف معیار مقادیر اندازه‌گیری (S_e/S_y) به عنوان دو پارامتر ارزیابی دقت مدل‌ها در نظر گرفته شده‌اند که کمترین مقدار برای آنها بیان‌گر دقت بالای مدل است [Solatifar, Kavussi and Abbasghorbani, 2021].

همان طور که در این شکل مشاهده می‌شود، مدل‌های مورد استفاده در کل دارای دقت بالایی برای پیش‌بینی دمای عمق لایه‌های آسفالتی روسازی راه‌های کشور نیستند. با این حال، در بین مدل‌های مورد بررسی در این پژوهش، مدل البیاتی و علانی به عنوان مدل با بالاترین دقت پیش‌بینی دمای عمق لایه‌های آسفالتی معرفی می‌شود.

همان طور که مشاهده می‌شود، بیشترین مقدار R^2 نسبت به LOE برای مدل البیاتی و علانی با مقدار ۰/۸۸ و کمترین این مقدار نیز برای مدل پارک و همکاران با مقدار ۰/۶۷ است. در مورد نسبت خطای استاندارد پیش‌بینی به انحراف معیار اندازه‌گیری (S_e/S_y) نیز کمترین مقدار برای مدل البیاتی و علانی با مقدار ۰/۳۵ و بیشترین مقدار نیز برای مدل پارک و همکاران می‌باشد (۰/۵۸). بنابراین با توجه به جدول ۹، مدل البیاتی و علانی و مدل BELLS همبستگی خوب، و مدل گدافا و همکاران و مدل پارک و همکاران همبستگی متوسطی بین مقادیر پیش‌بینی و مقادیر اندازه‌گیری دمای عمق لایه‌های آسفالتی از خود نشان داده‌اند. همچنین در جدول ۹ پارامترهای خط روند مقادیر پیش‌بینی و مقادیر اندازه‌گیری ارائه شده است. همان طور که مشاهده می‌شود مدل البیاتی و علانی با شیب ۰/۹۲ نزدیک‌ترین مقدار به یک و مدل پارک و همکاران با مقدار شیب ۰/۵۵ بیشترین اختلاف با مقدار شیب یک را دارا می‌باشند. همچنین مدل البیاتی و علانی با مقدار ۳/۷۸، کمترین و مدل پارک و همکاران با مقدار ۱۰/۶۸، بیشترین مقدار عرض از مبدأ رابطه خطی روند بین مقادیر پیش‌بینی و اندازه‌گیری دمای عمق لایه‌های آسفالتی را دارا هستند.

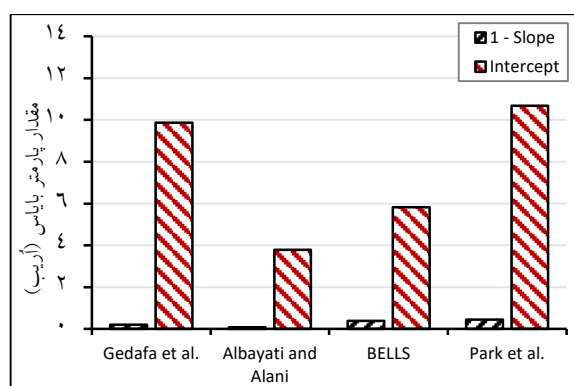
ارزیابی مدل‌های رگرسیونی مختلف پیش‌بینی دمای عمق لایه‌های آسفالتی با استفاده از برداشت‌های میدانی روسازی راه‌های کشور

جدول ۷. نتایج آنالیز واریانس برای مدل پارک و همکاران

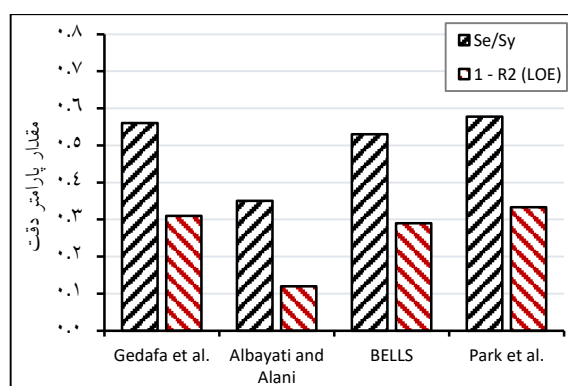
-	درجه آزادی	مجموع مربعات تعدیل یافته	میانگین تعدیل یافته	F-value	P-value
دمای سطح روسازی	۲۳۵	۴۵۷۸۱/۸	۱۹۴/۸۲	۱۲/۵۸	۰/۰۰۰
عمق از سطح روسازی	۱	۱۳/۰	۱۳/۰۳	۰/۸۴	۰/۳۵۹
زمان اندازه‌گیری دما	۱۰	۳۹۴/۲	۳۹/۴۲	۲/۵۴	۰/۰۰۰۴۵
خطا	۱۰۰۳	۱۵۵۳۵/۱	۱۵/۴۹	-	-
نقص برازش	۳۲۵	۶۱۰۹/۶	۱۸/۸۰	۱/۳۵	۰/۰۰۱
خطای محض	۶۷۸	۹۴۲۵/۵	۱۳/۹۰	-	-
جمع	۱۲۴۹	۹۲۴۱۱/۳	-	-	-

جدول ۹. پارامترهای ارزیابی عملکرد مدل‌های پیش‌بینی

پارامتر عملکرد	گدافا و همکاران	البیاتی و علانی	مدل BELLS	پارک و همکاران
SSE	۶۶۰۳۳/۷	۲۶۰۲۰	۴۷۶۹۴/۶	۷۰۵۳۱
S_e	۷/۲۷	۴/۵۶	۶/۱۷	۷/۵۰
S_e/S_y	۰/۵۶	۰/۳۵	۰/۵۳	۰/۵۸
R^2 (LOE)	۰/۶۹	۰/۸۸	۰/۷۱	۰/۶۷
همبستگی	متوسط	خوب	خوب	متوسط
شیب	۰/۸۰	۰/۹۲	۰/۶۱	۰/۵۵
عرض از مبدأ	۹/۸۷	۳/۷۸	۵/۸۲	۱۰/۶۸



شکل ۵. ارزیابی آریب پیش‌بینی چهار مدل رگرسیونی تعیین دمای عمق لایه‌های آسفالتی روسازی راه‌های کشور



شکل ۶. ارزیابی دقت پیش‌بینی چهار مدل رگرسیونی تعیین دمای عمق لایه‌های آسفالتی روسازی راه‌های کشور

پارک و همکاران، امکان استفاده از این مدل‌ها را برای تعیین دمای عمق لایه‌های آسفالتی نشان می‌دهد؛ با این حال افزایش دقت و کاهش خطای پیش‌بینی با پرداخت و کالیبراسیون این مدل‌ها برای استفاده در تعیین دمای عمق لایه‌های آسفالتی روسازی راه‌های کشور ضروری است. نتایج این پژوهش نشان می‌دهد بهترین عملکرد پیش‌بینی به ترتیب به مدل‌های البیاتی و علانی، BELLS، گدافا و همکاران و پارک و همکاران تعلق دارد. همچنین در بین مدل‌های مورد بررسی، مدل البیاتی و علانی با بیشترین دقت (ضریب تعیین ۰/۸۸) و اُریب پیش‌بینی پایین (همبستگی خوب بین مقادیر پیش‌بینی و اندازه‌گیری دمای عمق) به عنوان بهترین مدل پیش‌بینی دمای عمق لایه‌های آسفالتی معرفی می‌شود.

۷. تشکر و قدردانی

از دفتر مهندسين مشاور شرکت آزمایشگاه فنی و مکانیک خاک کشور در راستای فراهم نمودن داده‌های مورد نیاز این پژوهش، قدردانی می‌شود.

۸. پی‌نوشت‌ها

1. Back-Propagation
2. Multilayer Perceptron
3. Falling Weight Deflectometer
4. Goodness-of-Fit
5. Coefficient of Determination
6. Bias
7. Long-Term Pavement Performance
8. Slope
9. Trend Line
10. Root Mean Squared Error
11. Line of Equality
12. Overpredict
13. Underpredict

۹. مراجع

- صدیقیان فرد، م. و صولتی فر، ن. (۲۰۲۰). "تحلیل مدل‌های رگرسیونی پیش‌بینی دمای عمق لایه‌های آسفالتی - مطالعه

همچنین مقایسه اُریب مدل‌های پیش‌بینی نیز در شکل ۵ ارائه شده است. در این شکل نیز دو پارامتر تفاضل عدد یک و شیب خط روند (1-Slope) و نیز عرض از مبدأ این خط (Intercept)، برای ارزیابی اُریب پیش‌بینی مدل‌ها در نظر گرفته شده است که کمترین مقادیر این پارامترها نشان دهنده اُریب کمتر پیش‌بینی می‌باشد [Solatifar, Kavussi and Abbasghorbani, 2021]. همان طور که مشاهده می‌شود، اُریب پیش‌بینی این مدل‌ها هم زیاد بوده که در این میان، مدل البیاتی و علانی دارای اُریب پیش‌بینی نسبتاً کم و قابل قبول است. بررسی نتایج نشان می‌دهد که مدل البیاتی و علانی از دقت نسبتاً خوب و اُریب کمتر برای پیش‌بینی دمای عمق لایه‌های آسفالتی روسازی راه‌های کشور برخوردار است؛ با این حال می‌توان گفت که هیچ کدام از مدل‌های مورد بررسی دارای عملکرد مناسبی نبوده و قابل اطمینان نیستند. از این رو توسعه مدل‌های جدید بومی با پرداخت و کالیبراسیون این مدل‌ها ضروری است. به عنوان نمونه در این خصوص صولتی فر و همکاران [Solatifar et al., 2018] پس از بررسی عملکرد ضعیف مدل BELLS در پیش‌بینی دمای عمق لایه‌های آسفالتی، این مدل را برای روسازی‌های تازه ساخت در مناطق با آب و هوای گرم کشور کالیبره کرده و مدل جدیدی توسعه داده‌اند. مدل توسعه یافته دارای دقت بسیار خوبی (ضریب تعیین ۰/۹۷) می‌باشد.

۶. نتیجه‌گیری

در این پژوهش از نتایج آزمایش‌های میدانی در روسازی‌های راه‌های شش محور پرتدد مواصلاتی کشور برای پیش‌بینی دمای عمق لایه‌های آسفالتی استفاده شده است. سایت‌های روسازی در مناطق مختلف با شرایط آب و هوایی متفاوت قرار دارند. با استفاده از داده‌های جمع‌آوری شده، عملکرد چهار مدل رگرسیونی پیش‌بینی دمای عمق لایه‌های آسفالتی ارزیابی شده است.

بررسی عملکرد مدل‌های پیش‌بینی دمای عمق لایه‌های آسفالتی شامل مدل‌های گدافا و همکاران، البیاتی و علانی، BELLS و

Procedia Engineering, Vol. 125, pp. 474-480.
doi:

<https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.11.126>

- Asefzadeh, A., Hashemian, L. and Bayat, A. (2017) "Development of Statistical Temperature Prediction Models for a Test Road in Edmonton, Alberta, Canada", International Journal of Pavement Research and Technology, Vol. 10, Issue. 5, pp. 369-382. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijprt.2017.05.004>

- Chapman, L., Thornes, J. E. and Bradley, A. V. (2001). "Modeling of Road Surface Temperatures from a Geographical Parameter Database. Part. 1: Statistical", Meteor. Appl., Vol. 8, pp. 409-419. doi: <https://doi.org/10.1017/S1350482701004030>

- Clark, B. R., Gallage, C. and Yeaman, J. (2020). "Temperature Variation Through Deep Multigrade Asphalt Pavements and Proposed Method for Accounting for Fluctuations", Journal of Materials in Civil Engineering, Vol. 32, Issue. 3. doi: [https://doi.org/10.1061/\(asce\)mt.1943-5533.0003059](https://doi.org/10.1061/(asce)mt.1943-5533.0003059)

- 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))

- Fajing, P., Lei W., Jinke, J. and Wang, J. (2015). "A Research Review of Flexible Pavement Temperature Profile", International

مروری، "مهندسی عمران امیرکبیر، دوره ۵۳، شماره ۹، صفحات ۲۱-۲۱. شناسه دیجیتال (doi):

[10.22060/CEEJ.2020.18131.6793](https://doi.org/10.22060/CEEJ.2020.18131.6793)

- صدیقیان فرد، م. و صولتی‌فر، ن. (۲۰۲۱a). "توسعه مدل رگرسیونی غیرخطی پیش‌بینی دمای عمق لایه‌های آسفالتی با استفاده از داده‌های LTPP - مطالعه موردی: ایالت اوهایو - آمریکا"، فصلنامه مهندسی حمل و نقل، در حال چاپ. شناسه دیجیتال (doi): [10.22119/JTE.2021.217101.2426](https://doi.org/10.22119/JTE.2021.217101.2426)

- صدیقیان فرد، م. و صولتی‌فر، ن. (۲۰۲۱b). "توسعه مدل شبکه عصبی مصنوعی پیش‌بینی دمای عمق لایه‌های آسفالتی با استفاده از داده‌های LTPP"، مجله مهندسی عمران مدرس، دوره ۲۱، شماره ۳، صفحات ۹۱-۱۰۵.

<https://mcej.modares.ac.ir/article-16-43065-fa.html>

- AASHTO T317. (2009). "Prediction of Asphalt-Bound Pavement Layer Temperatures", American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, D.C., USA.

- 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. doi: <https://doi.org/10.1175/JAMC-D-11-0156.1>

- Albayati, A. H. K. and Alani, A. M. M. (2015). "Temperature Prediction Model for Asphalt Concrete Pavement", 14th Annual International Conference on Pavement Engineering and Infrastructure, Liverpool, UK.

- Ariawan, A., Sugeng Subagio, B. and Hario Setiadji, B. (2015). "Development of Asphalt Pavement Temperature Model for Tropical Climate Conditions in West Bali Region",

Asphalt-Aggregate Mixtures”, Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists, Vol. 64, pp. 575–609

- Li, Y., Liu, L. and Sun, L. (2018). “Temperature Predictions for Asphalt Pavement with Thick Asphalt Layer”, Construction and Building Materials, Vol. 160, pp. 802-809. doi:

<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.12.145>

- Matic, B., Matic, D., Sremac, S., Radovic, N. and Vidikant, P. (2014). “A Model for the Pavement Temperature Prediction at Specified Depth Using Neural Networks”, Metalurgija, Vol. 53, No. 4.

- Minhoto, J. C., Pais, J. C. and Pereira, A. A. (2005). “Asphalt Pavement Temperature Prediction”, Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, Vol. 1, No. 1919. pp. 96-110. doi: <https://doi.org/10.3141/1919-11>

- Park, D. Y., Buch, N. and Chatti. K. (2001). “Effective Layer Temperature Prediction Model and Temperature Correction via Falling Weight Deflectometer Deflections”, Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, Vol. 1764, Issue. 1, pp. 97–111. doi: <https://doi.org/10.3141/1764-11>

- Park, H. M., Kim, Y. R. and Park, S. (2002). “Temperature Correction of Multiload-Level Falling-Weight Deflectometer Deflections”, Transportation Research Record, Vol. 1806, pp. 3–8. doi: <https://doi.org/10.3141/1806-01>

- Pellinen, T. K. (2001). “Investigation of the Use of Dynamic Modulus as an Indicator of Hot-Mix Asphalt Performance”, Ph.D. Thesis, School of Sustainable Engineering and the Built Environment, Arizona State University.

Forum on ‘Energy, Environment Science and Materials’ (IFEESM), Shenzhen, China.

- FHWA. (1994). “LTPP Seasonal Monitoring Program: Instrumentation Installation and Data Collection Guidelines”, Report No. FHWA-RD-94-110. McLean, VA.

- Gedafa, D. S., Hossain, M. and Romanoschi, S. A. (2014). “Perpetual Pavement Temperature Prediction Model”, Journal of Road Materials and Pavement Design, Vol. 15, No. 1, pp. 55–65, doi: <http://dx.doi.org/10.1080/14680629.2013.852610>

- Godoy, J., Haber, R., Muñoz, J. J., Matía, F. and García, Á. (2018). “Smart Sensing of Pavement Temperature Based on Low-Cost Sensors and V2I Communications”, Sensors (Basel), Vol. 18, No. 7. doi: <https://doi.org/10.3390/s18072092>

- Hassan, H. F., Al-Nuaimi, A. S., Taha, R. and Jafar, T. M. A. (2005). “Development of Asphalt Pavement Temperature Models for Oman”, Journal of Engineering Research, Vol. 2, No. 1. pp. 32-42.

- Herb, W., Velasquez, R., Stefan, H., Marasteanu, M. O. and Clyne, T. (2011). “Simulation and Characterization of Asphalt Pavement Temperatures”, Road Mater. Pavement Design, Vol. 10, Issue. 1, pp. 233–247. doi: <https://doi.org/10.1080/14680629.2009.9690190>

- Islam, M. R., Ahsan, S. and Tarefder, R. A. (2015). “Modeling Temperature Profile of Hot-Mix Asphalt in Flexible Pavement”, Journal of Pavement Research and Technology (JPRT), Vol. 8, Issue. 8, No. 1, pp. 47-52.

- Kim, Y. R. and Lee, Y. C. (1995). “Interrelationships among Stiffnesses 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>

- Solatifar, N., Kavussi, A. and Abbasghorbani, M. (2021). “Dynamic Modulus Predictive Models for In-Service Asphalt Layers in Hot Climate Areas”, Journal of Materials in Civil Engineering, Vol. 33, Issue. 2. doi: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0003511](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0003511)

- Stubstad, R. N., Baltzer, S., Lukanen, E. O. and Ertman-Larsen, H. J. (1994). “Prediction of AC Mat Temperatures for Routine Load-Deflection Measurements, In 4th International Conference on the ‘Bearing Capacity of Roads and Airfields’, Minneapolis, Minnesota, USA.

- Tabatabaie, S. A., Ziari, H. and Khalili, M. (2008). “Modeling Temperature and Resilient Modulus of Asphalt Pavements for Tropic Zones of Iran”, Asian Journal of Scientific Research, Vol. 1, pp. 579-588. doi: [10.3923/ajsr.2008.579.588](https://doi.org/10.3923/ajsr.2008.579.588)

- Velasquez, R., Marasteanu, M., Clyne, T. R. and Worel, B. (2008). “Improved Model to Predict Flexible Pavement Temperature Profile”, In 3rd International Conference on Accelerated Pavement Testing (APT) ‘Impacts and Benefits from APT Programs’, Madrid, Spain.

- 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://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.04.015>

- Ramadhan, R. H. and Wahhab, A. H. (1997). “Temperature Variation of Flexible and Rigid Pavements in Eastern Saudi Arabia”, Journal of Building and Environment, Vol. 32, No. 4, pp. 367-373, Printed in Great Britain. doi: [https://doi.org/10.1016/S0360-1323\(96\)00072-8](https://doi.org/10.1016/S0360-1323(96)00072-8)

- Rayer, P. J. (1987). “The Meteorological Office Forecast Road Surface Temperature Model”, Meteor. Magazine, Vol. 116, pp. 180–191.

- Shao, L., Park, S. W. and Kim, Y. R. (1997). “Simplified Procedure for Prediction of Asphalt Pavement Subsurface Temperatures Based on Heat Transfer Theories”, Transportation Research Record, Vol. 1568, pp. 114–123. doi: <https://doi.org/10.3141/1568-14>

- Solatifar, N., Abbasghorbani, M., Kavussi, A. and Sivilevičius, H. (2018). “Prediction of

محمد صدیقیان فرد، درجه کارشناسی در رشته مهندسی عمران را در سال ۱۳۹۷ از دانشگاه آزاد اسلامی اخذ نمود. در سال ۱۳۹۹ موفق به کسب درجه کارشناسی ارشد در رشته مهندسی عمران - راه و ترابری از دانشگاه ارومیه شد. 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.

