

کالیبراسیون مدل‌های رگرسیونی مبتنی بر اصول ویسکوالاستیک برای پیش‌بینی مدول

دینامیکی لایه‌های آسفالتی در حال بهره‌برداری

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

n.solatifar@urmia.ac.ir

مجتبی عباس قربانی، دکترای تخصصی، شرکت آزمایشگاه فنی و مکانیک خاک، تهران، ایران

پذیرش: ۱۳۹۸/۰۲/۱۷

دریافت: ۱۳۹۷/۱۰/۱۶

چکیده

مدول دینامیکی مشخصه رفتار ویسکوالاستیک مخلوط‌های آسفالتی است که روش طراحی روسازی مکانیستیک - تجربی (MEPDG) نیز از آن به عنوان یکی از ورودی‌های مهم در طراحی و بهسازی روسازی آسفالتی استفاده می‌کند. مدل‌های پیش‌بینی مدول دینامیکی به عنوان جایگزین اندازه‌گیری آزمایشگاهی این مدول، جزئی از روش‌های تعیین مدول دینامیکی لایه‌های آسفالتی در حال بهره‌برداری نیز می‌باشند. این در حالی است که این مدل‌ها بر اساس داده‌های آزمایشگاهی ساخته شده‌اند و نیاز به توسعه مدل‌هایی برای تعیین مدول دینامیکی لایه‌های آسفالتی در حال بهره‌برداری در شرایط مختلف ترافیکی و آب و هوایی وجود دارد. در این پژوهش ده سایت روسازی آسفالتی در راه‌های پرتردد استان‌های خوزستان و کرمان جهت انجام آزمایش‌های میدانی انتخاب شده است. در هر سایت، آزمایش FWD انجام شده و مغزه‌هایی برای تجزیه و تعیین خصوصیات حجمی مخلوط‌ها و مشخصات ویسکوزیته قیرهای بازیابی گرفته شده است. با استفاده از نتایج آزمایش‌ها و با ارزیابی مدول دینامیکی لایه‌های آسفالتی با استفاده از مدل‌های پیش‌بینی جامع و ساده که مدل‌های رگرسیونی توسعه یافته مبتنی بر اصول ویسکوالاستیک هستند، امکان ساخت مدل‌های جدید با کالیبراسیون این مدل‌ها بررسی شده و مدل‌های جدید پیش‌بینی مدول دینامیکی درجای لایه‌های آسفالتی تحت عناوین مدل جامع درجا و مدل جامع ساده درجا توسعه یافته است. با استفاده از داده‌های موجود، مدل‌ها مورد ارزیابی قرار گرفته و اعتبارسنجی شده‌اند. نتایج پژوهش قابلیت پیش‌بینی مدول دینامیکی درجای لایه‌های آسفالتی را توسط مدل‌های جدید درجا با دقت پیش‌بینی بسیار خوب (ضریب تعیین ۰/۹۶) و آریب پیش‌بینی کم نشان می‌دهد.

واژه‌های کلیدی: آزمایش FWD، مدل جامع، مدل جامع ساده، مدل‌های پیش‌بینی مدول دینامیکی، مدول دینامیکی لایه‌های آسفالتی

۱. مقدمه

[Solatifar et al., 2019] با انجام آزمایش‌های میدانی و آزمایشگاهی، روش پیشنهادی MEPDG در بهسازی روسازی‌های آسفالتی را در سه سطح تحلیل و طراحی مورد ارزیابی قرار داده و امکان بهره‌گیری از این روش را جهت تعیین مدول دینامیکی درجای لایه‌های آسفالتی با تصحیحاتی در مدل‌ها و روند آزمایش‌ها پیشنهاد کرده‌اند.

دسته دوم شامل روش‌های تحلیلی و عددی تعیین مدول دینامیکی به طور مستقیم از نتایج آزمایش FWD است. کوتای و همکاران [Kutay, Chatti and Lei, 2011]، وارما و همکاران [Varma, Kutay and Chatti, 2013; Varma, Kutay and Levenberg, 2013] و نیز گوپالاکریشنان و همکاران [Gopalakrishnan et al., 2014; 2015] روش‌هایی برای بهره‌گیری مستقیم از نتایج آزمایش‌های غیرمخرب برای تعیین مدول دینامیکی لایه‌های آسفالتی توسعه داده‌اند.

استفاده از مدل‌های پیش‌بینی برای تعیین مدول دینامیکی مغزه‌های گرفته شده از سایت‌های مورد آزمایش، یکی از مهم‌ترین اجزای روش‌های تعیین مدول دینامیکی لایه‌های آسفالتی در روسازی‌های در حال بهره‌برداری است. ساخت این مدل‌ها بر اساس داده‌های آزمایشگاهی بوده و در نتیجه به طور مستقیم نمی‌توان از آنها برای تعیین مدول دینامیکی درجای لایه‌های آسفالتی در روسازی‌های در حال بهره‌برداری بهره‌جست. از این رو عدم کارایی این مدل‌ها در تعیین مدول دینامیکی درجای لایه‌های آسفالتی در روسازی‌های در حال بهره‌برداری در شرایط مختلف ترافیکی و آب و هوایی، نیاز به توسعه مدل‌های بومی پیش‌بینی مدول دینامیکی درجای لایه‌های آسفالتی را نشان می‌دهد. هدف اصلی این پژوهش بررسی انطباق‌پذیری مدل‌های حاصل از مدل‌های پیش‌بینی رگرسیونی مبتنی بر اصول ویسکوالاستیک با مدول محاسبات بازگشتی FWD و توسعه مدل‌های پیش‌بینی مدول دینامیکی درجای جدید با پرداخت و کالیبراسیون مدل‌های اصلی با استفاده از نتایج آزمایش FWD است.

مدول دینامیکی^۱ ($|E^*|$) به عنوان مشخصه رفتار ویسکوالاستیک لایه‌های آسفالتی یکی از مهم‌ترین ورودی‌های روش طراحی روسازی مکانیستیک - تجربی^۲ (MEPDG) برای طراحی و بهسازی روسازی‌های آسفالتی است [ARA, 2004]. به علت هزینه بالا، نیاز به تجهیزات خاص و گران قیمت، پرسنل متخصص و نیز مدت زمان طولانی مورد نیاز برای انجام آزمایش مدول دینامیکی در آزمایشگاه، مدل‌های تجربی پیش‌بینی مدول دینامیکی مخلوط‌های آسفالتی مختلفی توسط پژوهشگران توسعه یافته است. این مدل‌ها با استفاده از خصوصیات حجمی مخلوط و مشخصات ویسکوزیته قیر، مدول دینامیکی مخلوط‌های آسفالتی را با دقت خوبی پیش‌بینی می‌کنند. مدل‌های معمول توسعه یافته شامل مدل ویتزاک^۳، مدل ویتزاک اصلاح شده^۴، مدل هیرش^۵، مدل الخطیب^۶، مدل‌های رگرسیونی مبتنی بر مفاهیم ویسکوالاستیک و اصل برهم نهی زمان-دما^۷ و نیز مدل‌های مبتنی بر شبکه‌های عصبی مصنوعی^۸ هستند [Solatifar, 2018].

با توجه به تاکید روش MEPDG برای تعیین مدول دینامیکی در ارزیابی سازه‌های لایه‌های آسفالتی در پروژه‌های بهسازی روسازی‌های در حال بهره‌برداری، روش‌های مختلفی توسط پژوهشگران برای تعیین مدول دینامیکی این لایه‌ها ارائه شده است. دسته اول این روش‌ها بر اساس ترکیبی از نتایج آزمایش‌های غیرمخرب روسازی مانند آزمایش افت و خیزسنج وزنه افتان^۹ (FWD) و نیز مغزه‌گیری برای انجام آزمایش‌های آزمایشگاهی از جمله تجزیه مخلوط، دانه‌بندی، تعیین فضای خالی، بازیابی قیر و تعیین مشخصات ویسکوزیته آن می‌باشد. روش پیشنهادی آشتو^{۱۰} در MEPDG [ARA, 2004]، سئو و همکاران [Seo et al., 2013]، گئورگولی و همکاران [Georgouli, et al., 2015] و نیز صولتی‌فر و همکاران [Solatifar et al., 2017] از جمله این روش‌های توسعه یافته هستند. همچنین لولیزی و همکاران [Loulizi, Flintsch and McGhee, 2007]، کاووسی و همکاران [Kavussi, Solatifar and Abbasghorbani, 2016] و نیز صولتی‌فر و همکاران

۲. مدل‌های رگرسیونی مبتنی بر اصول

ویسکوالاستیک

چند متغیر مستقل هستند. از مهم‌ترین مدل‌های رگرسیونی جدید در پیش‌بینی مدول دینامیکی مخلوط‌های آسفالتی، دو مدل جامع^{۱۱} و جامع ساده^{۱۲} هستند که توسط سنخایی فر و همکاران [Sakhaeifar, Kim and Kabir, 2015] توسعه یافته‌اند. رابطه ۱ مدل جامع و رابطه ۲ مدل جامع ساده را ارائه می‌کند.

$$\log|E^*| = 6.1716 - 0.00269\rho_{34} - 0.00137\rho_{38} - 0.10641\rho_{200} - 0.05248V_a - 0.1774V_{beff} + 0.00618V_{beff}^2 + \frac{1.0154+0.08395\rho_{200}+0.0142V_a+0.17103V_{beff}-0.00757V_{beff}^2}{1+e^{(-0.81189-0.54698X_G)}} \quad (1)$$

$$\log|E^*| = 6.4197 - 0.00014\rho_{34}^2 - 0.00547\rho_{38} - 0.11786\rho_{200} - 0.05528V_a - 0.16266V_{beff} + 0.00487V_{beff}^2 + \frac{0.57677+0.00713\rho_{38}+0.16167\rho_{200}-0.0052(\rho_{200})^2+0.01889V_a+0.16031V_{beff}-0.00592V_{beff}^2}{1+e^{(1.8645-0.95991\log|G^*|)}} \quad (2)$$

میدانی در این پژوهش انتخاب شده است. در انتخاب این سایت‌های آزمایشی سعی شده است محدوده وسیعی از مشخصات لایه‌های آسفالتی از جمله عمر، ضخامت و تعداد لایه‌ها، دانه‌بندی، خصوصیات حجمی و مشخصات سختی و ویسکوزیته قیرها در نظر گرفته شود. موقعیت جغرافیایی و نیز اطلاعات عمومی وضعیت آب و هوایی سایت‌های آزمایشی (با کدهای S01 تا S10) در دو استان فوق در شکل ۱ ارائه شده است. جدول ۱ نیز مشخصات روسازی‌های انتخابی شامل نوع روسازی (جدید یا بهسازی شده)، عمر روسازی، تعداد و ضخامت لایه‌های آسفالتی و همچنین مشخصات قیر مخلوط‌های آسفالتی را ارائه می‌کند.

سایت‌های انتخابی شامل روسازی‌های جدید و بهسازی شده هستند. عمر روسازی‌ها با یکدیگر متفاوت بوده و از دو هفته تا ۲۵ سال عمر دارند. سختی قیرها نیز در دو درجه شامل قیر با درجه نفوذ ۶۰/۷۰ و قیر با درجه سختی بالاتر ۴۰/۵۰ (سایت S03) وجود دارد. ضخامت و تعداد لایه‌های آسفالتی و نیز لایه‌های اساس و زیراساس هم با یکدیگر متفاوت بوده و متغیر است.

مدل‌های رگرسیونی روش‌هایی آماری برای مدل‌سازی و تحلیل متغیرهای مختلف برای یافتن رابطه‌ای بین متغیر وابسته و یک یا

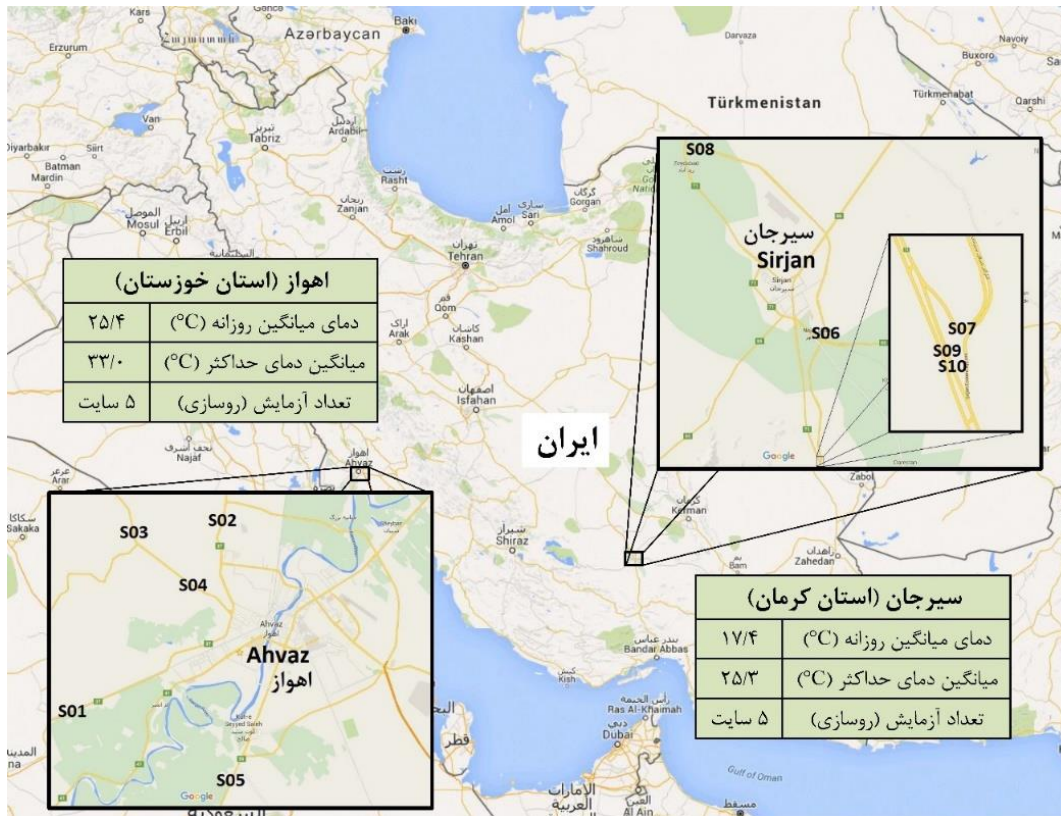
در این روابط $|E^*|$ مدول دینامیکی (پوند بر اینچ مربع)، ρ_{34} درصد تجمعی مانده روی الک $\frac{3}{4}$ اینچ (درصد)، ρ_{38} درصد تجمعی مانده روی الک $\frac{3}{8}$ اینچ (درصد)، ρ_{200} درصد عبور کرده از الک شماره ۲۰۰ (درصد)، V_a فضای خالی (درصد)، V_{beff} درصد حجمی قیر موثر (درصد)، $|G^*|$ مدول دینامیکی برشی قیر (پوند بر اینچ مربع) و X_G فرکانس پیش‌بینی مطابق رابطه ۳ (هرتز) است که در آن T دما (درجه) می‌باشد.

$$X_G = \log \left(\frac{2.4392 \cdot 10^{-0.0004T^2 + 0.0135T - 0.1003}}{\left[\frac{145000}{|G^*|} \right]^{0.12332} - 1} \right)^{7.72273} \quad (3)$$

این مدل‌سازی مبتنی بر مفاهیم ویسکوالاستیک و اصل بر هم نهی زمان - دما بوده است. در واقع این مدل‌ها قابلیت پیش‌بینی مدول دینامیکی مخلوط‌های آسفالتی را برای محدوده وسیعی از دماها (۱۰-، ۴/۴، ۳۷/۸، ۵۴/۴ درجه سلسیوس) که در استاندارد آزمایش مدول دینامیکی [AASHTO, 2012] نیز توصیه شده است، دارند [Sakhaeifar, Kim and Kabir, 2015].

۳. آزمایش‌ها

پنج محور منتهی به شهر اهواز در استان خوزستان و پنج محور منتهی به شهر سیرجان در استان کرمان برای انجام آزمایش‌های



شکل ۱. موقعیت جغرافیایی و وضعیت آب و هوایی سایت‌های آزمایش در استان‌های خوزستان و کرمان

جدول ۱. مشخصات عمومی روسازی‌های مورد آزمایش در این پژوهش

استان	کد سایت	محور آزمایش	نوع روسازی	عمر روسازی	مجموع ضخامت				درجه نفوذ
					ضخامت هر زیرلایه	ضخامت آسفالتی (mm)	ضخامت لایه‌های آسفالتی	ضخامت آسفالتی	
خوزستان	S01	اهواز - شیرین شهر	جدید	۲ هفته	۷۵	۷۵	۷۵	۷۵	۶۰/۷۰
	S02	اهواز - شوش	جدید	۴ سال	۹۵	۹۵	۹۵	۹۵	۶۰/۷۰
	S03	اهواز - حمیدیه (۱)	بهسازی شده	۵ سال	۱۱۵	۱۱۵	۱۱۵	۱۱۵	۴۰/۵۰
	S04	اهواز - حمیدیه (۲)	بهسازی شده	۱۰ سال	۱۹۰	۱۹۰	۱۹۰	۱۹۰	۶۰/۷۰
	S05	اهواز - خرمشهر	بهسازی شده	۲۵ سال	۲۲۰	۲۲۰	۲۲۰	۲۲۰	۶۰/۷۰
کرمان	S06	سیرجان - بافت	جدید	۶ ماه	۱۲۰	۱۲۰	۱۲۰	۱۲۰	۶۰/۷۰
	S07	رمپ خروجی سیرجان	جدید	۱ سال	۱۲۰	۱۲۰	۱۲۰	۱۲۰	۶۰/۷۰
	S08	کمربندی سیرجان	بهسازی جدید	۱ سال	۱۴۵	۱۴۵	۱۴۵	۱۴۵	۶۰/۷۰
	S09	سیرجان - بندرعباس (۱)	بهسازی شده	۱۵ سال	۳۰۰	۳۰۰	۳۰۰	۳۰۰	۶۰/۷۰
	S10	سیرجان - بندرعباس (۲)	بهسازی شده	۱۵ سال	۴۰۰	۴۰۰	۴۰۰	۴۰۰	۶۰/۷۰

۳-۱ آزمایش FWD

در هر سایت از ساعت ۶ صبح تا ساعت ۶ عصر در بازه‌های زمانی نیم ساعته انجام شده و در نتیجه ۲۵ سری داده برای هر سایت به دست آمده است. انتخاب این بازه زمانی برای تامین گستره فصلنامه مهندسی حمل و نقل / سال دوازدهم / شماره چهارم (۴۹) / تابستان ۱۴۰۰

آزمایش FWD در هر یک از سایت‌های روسازی با استفاده از دستگاه HWD^{۱۳} مدل ۸۰۰۰ دایناتست انجام شده است. عملیات



شکل ۲. آزمایش FWD همراه با اندازه‌گیری دمای عمق لایه آسفالتی در یک سایت روسازی

که در این رابطه E_{CM} مدول مرکب لایه‌های آسفالتی، E_i مدول زیرلایه i ، h_i ضخامت زیرلایه i و n تعداد زیرلایه‌های آسفالتی است.

۳-۲ مغزه‌گیری از سایت‌ها و تهیه نمونه‌ها

پس از انجام آزمایش FWD، سونداژ به منظور تعیین دقیق ضخامت لایه‌ها برای استفاده در محاسبات بازگشتی و همچنین مغزه‌گیری برای تهیه نمونه‌های آزمایشگاهی در سایت‌های روسازی انجام شده است. در هر سایت، دو مغزه برای انجام آزمایش تجزیه مخلوط آسفالتی جهت تعیین مشخصات مخلوط‌ها تهیه و به آزمایشگاه منتقل شده است. شکل ۳ تصویری از عملیات سونداژ، اندازه‌گیری ضخامت لایه‌ها و مغزه‌گیری را در یکی از سایت‌های انتخابی نشان می‌دهد.

بزرگ دمایی در حدود ۲۰ درجه سلسیوس (تغییرات در محدوده ۳۰ تا ۵۰ درجه سلسیوس) بوده است. در انجام این آزمایش‌ها برای تعیین دقیق مدول لایه آسفالتی، از چهار سطح تنش برای بارگذاری استفاده شده است. همچنین پیکربندی ژئوفون‌ها به صورتی بوده که تعداد بیشتری ژئوفون در نزدیکی صفحه بارگذاری قرار گرفته است. به عنوان نمونه شکل ۲ انجام آزمایش FWD را در یکی از سایت‌های انتخابی پژوهش حاضر همراه با اندازه‌گیری دمای لایه آسفالتی در عمق‌های مختلف [Solatifar et al., 2018] نشان می‌دهد. همان گونه که در این تصویر دیده می‌شود مطابق توصیه MEPDG آزمایش در مسیر چرخ خارجی (راست) جاده انجام شده است [ARA, 2004].

محاسبات بازگشتی مدول لایه‌ها توسط نرم‌افزار ELMOD انجام شده است. در این نرم‌افزار روسازی به صورت یک سیستم سه لایه‌ای مدل شده و از روش‌های مختلف محاسبات بازگشتی مانند روش الاستیک خطی (LET)، روش ضخامت معادل (MET) و نیز روش اجزای محدود (FEM) برای تعیین مدول لایه‌ها استفاده می‌شود. در فرآیند محاسبات بازگشتی در این پژوهش از روش ضخامت معادل با توجه به برتری این روش نسبت به سایر روش‌ها بهره گرفته شده است [Ullidtz, 2000; Kavussi et al., 2014].

در این تحلیل همه زیرلایه‌های آسفالتی با یکدیگر به صورت مرکب در قالب لایه اول، لایه‌های اساس و زیراساس در قالب لایه مرکب دوم با فرض رفتار الاستیک، و در نهایت بستر روسازی به عنوان لایه سوم با ضخامت نامحدود و فرض رفتار الاستیک غیرخطی مدل شده است. با توجه به وجود تنها یک مدول محاسبات بازگشتی برای همه زیرلایه‌های آسفالتی در روسازی-های تشکیل شده از چندین زیرلایه آسفالتی، برای تعیین مدول هر زیرلایه بر اساس فرض ادمارک و یا به عبارتی دیگر همان روش ضخامت معادل از رابطه ۴ بهره گرفته شده است [Odemark, 1949; Ullidtz, 1998].

$$E_{CM} = \left(\frac{\sum_{i=1}^n h_i \times \sqrt[3]{E_i}}{\sum_{i=1}^n h_i} \right)^3 \quad (4)$$

AASHTO-T315 و [ASTM, 2015] ASTM-D7175

[AASHTO, 2012] اندازه‌گیری می‌کند.

فرکانس انجام آزمایش ۱/۵۹ هرتز معادل ۱۰ رادیان بر ثانیه بوده و اندازه‌گیری مدول برشی و زاویه فاز قیر در محدوده دمایی پنج تا ۶۰ درجه سلسیوس با گام افزایش یک درجه‌ای انجام شده است. آزمایش از دمای پایین شروع شده و دمای نمونه با نرخ سه درجه سلسیوس در دقیقه افزایش یافته است. برای تعیین خصوصیات ویسکوزیته قیر جهت استفاده در تحلیل مدول دینامیکی لایه‌های آسفالتی در ادامه پژوهش، از روش ارائه شده در [ARA, 2004] MEPDG بهره گرفته شده است. طبق این روش با داشتن مقادیر مدول برشی قیر با انجام آزمایش DSR در چندین دما و حداقل یک فرکانس، پارامترهای ویسکوزیته (A و VTS) و عامل انتقال قیر به دست می‌آید. خصوصیات حجمی لایه‌ها و مشخصات ویسکوزیته قیرهای بازیابی شده در جدول ۲ ارائه شده است.

۴. ارزیابی عملکرد مدل‌های رگرسیونی در

پیش‌بینی مدول دینامیکی لایه‌های آسفالتی

در این بخش مدول دینامیکی پیش‌بینی لایه‌های آسفالتی توسط مدل‌های رگرسیونی جامع و جامع ساده (با استفاده از خصوصیات حجمی مخلوط‌های آسفالتی تعیین شده از تجزیه مغزه‌های گرفته شده از محل و نیز پارامترهای سختی و ویسکوزیته قیر بازیابی از آنها) با نتایج محاسبات بازگشتی مدول میدانی (از آزمایش FWD) مقایسه و مورد ارزیابی قرار گرفته است. با توجه به محدوده دمایی انجام آزمایش FWD، برای هر لایه آسفالتی در هر سایت ۲۱ داده دمایی از ۳۰ تا ۵۰ درجه سلسیوس (با گام یک درجه) (برای سایت‌های S09 و S10 تا ۴۵ درجه با توجه به داده‌های موجود) در نظر گرفته شده است. از آن جایی که مخلوط‌های آسفالتی در سایت‌های S09 و S10 مشابه یکدیگر بوده‌اند، تنها از داده‌های سایت S09 در تعیین مدول دینامیکی پیش‌بینی استفاده شده است. بنابراین تعداد ۲۰ لایه آسفالتی در نه سایت روسازی در حال بهره‌برداری در محدوده دمایی ۳۰ تا ۵۰ درجه



شکل ۳. انجام سونداژ و مغزه‌گیری در یک سایت روسازی

۳-۳ خصوصیات حجمی لایه‌ها و ویسکوزیته قیرها

در این مرحله آزمایش تجزیه مخلوط، بازیابی قیر و تفکیک سنگدانه‌ها برای دانه‌بندی جهت تعیین خصوصیات حجمی مخلوط انجام شده است. نمونه‌ها تحت آزمایش تجزیه مخلوط آسفالتی به روش استخراج قیر مطابق استانداردهای ASTM-D2172 [ASTM, 2011] و AASHTO-T164 [AASHTO, 2014] قرار گرفته‌اند. در این روش از حلال تری‌کلرواتیلن برای شستشوی مخلوط استفاده شده تا کمترین اثری را بر روی مشخصات قیر بازیابی از مخلوط داشته باشد. پس از شستشو و تجزیه مخلوط، محلول محتوی حلال، قیر و مصالح ریزدانه عبوری از فیلتر جمع‌آوری شده است. به منظور بازیابی قیر از محلول، ابتدا مصالح ریزدانه درون آن توسط دستگاه سانتریفیوژ با سرعت ۹۰۰۰ دور در دقیقه جداسازی و از محلول خارج شده است.

پس از استخراج قیر لایه‌ها توسط دستگاه تقطیر، جهت تعیین مشخصات ویسکوزیته قیر از آزمایش رنومتر برشی دینامیکی^{۱۴} (DSR) (در حالت آزمایش طیف دما^{۱۵}) بهره گرفته شده است. این آزمایش خواص رئولوژیکی و تغییرشکل‌پذیری قیر مانند مدول برشی (G^*) و زاویه فاز (δ) را در دماهای میانی تا دماهای بالای وضعیت خدمت‌دهی روسازی مطابق با استانداردهای

که در آن f_{FWD} فرکانس بارگذاری سقوط وزنه FWD (هرتز) و Δt مدت زمان بارگذاری (ثانیه) است. مدول دینامیکی پیش‌بینی در دماهای محدوده انجام آزمایش FWD (۳۰ تا ۵۰ درجه سلسیوس) با استفاده از دو مدل جامع و جامع ساده با استفاده از داده‌های ارائه شده در جدول ۲ تعیین شده است. برای بررسی عملکرد مدل‌ها، از دو معیار دقت^{۱۶} و آریب^{۱۷} پیش‌بینی استفاده شده است. برای این منظور مدول دینامیکی به عنوان متغیر مستقل تعریف و خطاها به صورت زیر محاسبه شده است.

سلسیوس و در مجموع ۴۰۰ سری داده در ارزیابی مدل‌های پیش-بینی در این بخش و کالیبراسیون این مدل‌ها برای ساخت مدل‌های جدید درجا در بخش بعدی مورد استفاده قرار گرفته است. فرکانس بارگذاری FWD با استفاده از تاریخچه زمانی بار و افت و خیز و فرض مقدار میانگین ۳۰ میلی ثانیه برای مدت زمان هر بارگذاری سقوط وزنه این آزمایش به دست آمده است. در این پژوهش فرکانس FWD از رابطه ۵ محاسبه شده و برابر ۱۶/۶۷ هرتز تعیین شده است [Lytton et al., 1990].

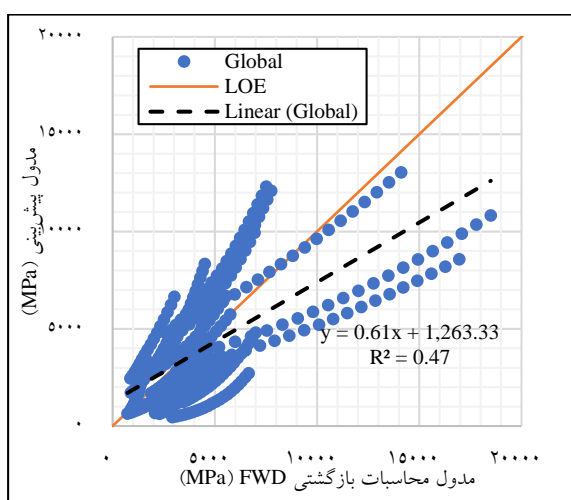
$$f_{FWD} = \frac{1}{2\Delta t} \quad (5)$$

جدول ۲. خصوصیات حجمی مخلوط‌های آسفالتی و مشخصات ویسکوزیته قیر لایه‌ها

کد لایه	خصوصیات حجمی مخلوط آسفالتی							پارامترهای قیر
	ρ_{34}	ρ_{38}	ρ_4	ρ_{200}	V_a	V_{beff}	A	
S01L1	۰/۰	۲۲/۰	۵۲/۰	۵/۰	۶/۲	۸/۵	۷/۸۱۰۸	-۲/۵۲۱۷
S02L1	۱/۰	۱۱/۰	۳۳/۰	۷/۹	۵/۷	۷/۱	۷/۰۸۱۶	-۲/۲۴۱۸
S03L1	۰/۰	۲۷/۰	۴۹/۰	۶/۴	۶/۶	۷/۰	۵/۹۸۴۲	-۱/۸۲۷۰
S04L1	۳/۷	۲۸/۹	۴۷/۹	۴/۱	۶/۳	۶/۲	۵/۵۱۰۸	-۱/۶۵۲۶
S04L2	۴/۸	۱۸/۹	۴۰/۶	۳/۷	۵/۹	۶/۴	۵/۶۳۴۵	-۱/۶۹۹۳
S04L3	۱۳/۰	۳۷/۸	۶۰/۳	۶/۲	۵/۲	۷/۷	۶/۱۷۴۴	-۱/۹۰۶۰
S05L1	۰/۸	۱۹/۷	۴۱/۰	۸/۷	۵/۷	۸/۲	۶/۴۵۲۲	-۱/۹۸۲۶
S05L2	۰/۰	۱۵/۲	۳۶/۸	۸/۷	۳/۰	۸/۸	۶/۰۳۵۷	-۱/۸۳۰۰
S05L3	۷/۰	۳۴/۳	۵۵/۵	۴/۹	۳/۲	۸/۲	۶/۲۳۳۲	-۱/۹۱۱۶
S06L1	۵/۰	۱۹/۰	۳۲/۰	۱۲/۰	۵/۵	۹/۴	۷/۷۸۹۷	-۲/۵۰۰۴
S06L2	۰/۰	۱۱/۰	۳۲/۰	۷/۲	۴/۵	۱۱/۰	۸/۷۶۶۷	-۲/۸۶۱۶
S07L1	۰/۰	۷/۰	۳۲/۰	۸/۵	۶/۹	۷/۶	۸/۳۹۹۴	-۲/۷۲۶۶
S07L2	۶/۶	۱۹/۹	۳۵/۱	۷/۶	۶/۳	۷/۵	۷/۲۲۰۰	-۲/۲۹۱۸
S08L1	۰/۰	۵/۳	۳۴/۴	۷/۷	۴/۰	۷/۱	۷/۷۸۲۷	-۲/۵۰۴۱
S08L2	۵/۰	۳۰/۰	۴۶/۰	۷/۲	۷/۱	۵/۳	۸/۳۵۰۶	-۲/۷۰۹۹
S08L3	۲/۰	۱۹/۰	۳۵/۰	۸/۲	۸/۲	۶/۴	۸/۶۲۵۵	-۲/۸۰۸۹
S09L1	۰/۰	۱۵/۱	۳۴/۲	۷/۰	۲/۱	۹/۵	۶/۲۵۷۹	-۱/۹۱۷۱
S09L2	۰/۰	۲۴/۳	۳۷/۸	۸/۷	۲/۱	۱۰/۶	۶/۲۴۰۰	-۱/۹۱۷۵
S09L3	۱/۰	۲۰/۰	۳۷/۰	۴/۴	۴/۲	۷/۳	۸/۰۹۲۸	-۲/۶۱۵۹
S09L4	۳/۰	۳۱/۰	۴۱/۰	۶/۲	۵/۵	۶/۴	۷/۳۸۵۷	-۲/۳۶۱۰
S10L1	۰/۰	۱۵/۱	۳۴/۲	۷/۰	۲/۱	۹/۵	۶/۲۵۷۹	-۱/۹۱۷۱
S10L2	۰/۰	۲۴/۳	۳۷/۸	۸/۷	۲/۱	۱۰/۶	۶/۲۴۰۰	-۱/۹۱۷۵

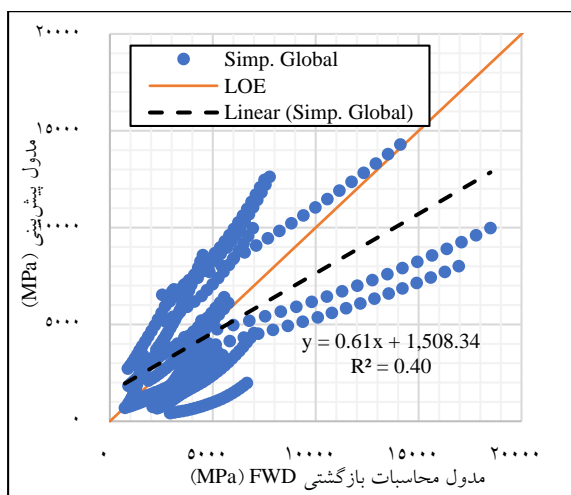
کد لایه	خصوصیات حجمی مخلوط آسفالتی							پارامترهای قیر
	VTS	A	V _{beff}	V _a	ρ ₃₄	ρ ₃₈	ρ ₄	
S10L3	-۲/۶۱۵۹	۸/۰۹۲۸	۷/۳	۴/۲	۱/۰	۲۰/۰	۳۷/۰	۴/۴
S10L4	-۲/۳۶۱۰	۷/۳۸۵۷	۶/۴	۵/۵	۳/۰	۳۱/۰	۴۱/۰	۶/۲

دهنده عدم عملکرد مناسب این دو مدل در تعیین مدول دینامیکی لایه‌های آسفالتی روسازی‌های در حال بهره‌برداری است. همچنین در این شکل‌ها خط روند بین مقادیر پیش‌بینی و مقادیر محاسبات بازگشتی ترسیم شده و معادله این خط همراه با ضریب تعیین (R^2) آن در شکل ارائه شده است.



شکل ۴. مدول دینامیکی پیش‌بینی توسط مدل جامع در برابر مقادیر

محاسبات بازگشتی FWD



شکل ۵. مدول دینامیکی پیش‌بینی توسط مدل ساده در برابر

مقادیر محاسبات بازگشتی FWD

$$SSE = \sum [(E^*|_p - E_m)^2] \quad (6)$$

$$S_e = \sqrt{\frac{SSE}{n-1}} \quad (7)$$

$$S_y = \sqrt{\frac{\sum [E_m - \bar{E}_m]^2}{n-1}} \quad (8)$$

در این روابط SSE مجموع مربعات خطا، $|E^*|_p$ مدول دینامیکی پیش‌بینی و E_m مدول اندازه‌گیری، \bar{E}_m میانگین مقادیر مدول اندازه‌گیری، S_e خطای استاندارد (انحراف معیار خطاها)، S_y انحراف معیار مقادیر اندازه‌گیری مدول و n تعداد 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^{۱۸} (LOE) به صورت رابطه (۹) و برای محاسبه اریب پیش‌بینی مدل از پارامترهای شیب و عرض از مبدأ خط روند^{۱۹} مقادیر پیش‌بینی در مقابل مقادیر اندازه‌گیری استفاده شده است.

$$R^2 = 1 - \frac{n-p}{n-1} \left(\frac{S_e}{S_y} \right)^2 \quad (9)$$

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 اریب پیش‌بینی کمتری خواهد بود.

شکل ۴ و شکل ۵ مقادیر مدول دینامیکی پیش‌بینی را به ترتیب توسط مدل‌های جامع و ساده در برابر مدول محاسبات بازگشتی FWD ارائه می‌کند. همان طوری که انتظار می‌رود مقادیر پیش‌بینی توسط مدل‌های جامع و ساده نسبت به خط برابری (LOE) به صورت پراکنده قرار گرفته‌اند که این نشان

مدل پیش‌بینی	جامع	جامع ساده
S_e	۲۴۸۱	۲۷۲۲
S_e/S_y	۰/۷۸	۰/۸۶
$(LOE) R^2$	۰/۳۹	۰/۲۷
شیب	۰/۶۱۳	۰/۶۱۳
عرض از مبدأ	۱۲۶۳	۱۵۰۸

۵. ارائه مدل‌های جدید درجا

در این بخش با استفاده از روش برازش غیرخطی، پرداخت مدل-های رگرسیونی مبتنی بر اصول ویسکوالاستیک برای استفاده در پیش‌بینی مدول دینامیکی لایه‌های آسفالتی روسازی‌های در حال بهره‌برداری با استفاده از داده‌های FWD انجام شده و مدل‌های جدیدی ارائه شده است. برای این منظور داده‌های موجود به دو دسته ۸۰ درصد (۳۲۰ سری داده) و ۲۰ درصد (۸۰ سری داده) به ترتیب برای مدل‌سازی و اعتبارسنجی مدل‌های جدید تفکیک شده‌اند. قبل از تفکیک، برای توزیع یکنواخت داده‌ها از اعداد تصادفی جهت مرتب‌سازی سری‌های داده بهره گرفته شده و ترتیب داده‌ها به صورت کاملاً یکنواخت و تصادفی در آمده است. در این بخش دو مدل جدید با پرداخت (کالیبراسیون) مدل‌های پیش‌بینی در بخش قبل آمده است. البته باید توجه داشت که نتایج پیش‌بینی مدول‌های دینامیکی توسط مدل‌های توسعه یافته در محدوده دمایی آزمایش‌های این پژوهش یعنی دمای عمق لایه آسفالتی ۳۰ تا ۵۰ درجه سلسیوس معتبر است. همچنین در کاربرد این مدل‌ها توجه به خصوصیات حجمی مخلوط‌ها شامل دانه‌بندی و درصد فضای خالی و سختی قیر مورد استفاده (قیر با درجه نفوذ ۴۰/۵۰ و ۶۰/۷۰) نیز باید مد نظر قرار گیرد که در محدوده داده‌های مدل‌سازی این پژوهش باشد.

۵-۱ مدل رگرسیونی جامع درجا

مدل پیش‌بینی مدول دینامیکی جامع با استفاده از داده‌های مدل-سازی پرداخت شده است. شکل ریاضی این مدل مطابق رابطه اصلی آن به صورت روابط ۱۰ و ۱۱ می‌باشد که تمامی پارامترهای آن قبلاً تعریف شده است. ضرایب b_1 تا b_{20} پارامترهای مدل

از این رابطه می‌توان به نوعی برای تصحیح مقادیر پیش‌بینی با مقادیر محاسبات بازگشتی استفاده نمود. همان طوری که در این شکل‌ها دیده می‌شود، خط روند در مدل جامع با ضریب تعیین ۰/۴۷ رابطه خطی مقادیر پیش‌بینی با مقادیر محاسبات بازگشتی مدول دینامیکی لایه‌های آسفالتی بهتری را در مقایسه با مدل جامع ساده با ضریب ۰/۴۰ دارد.

پارامترهای ارزیابی عملکرد مدل‌های پیش‌بینی در جدول ۳ ارائه شده است. همان طوری که در این جدول آمده است مقدار بیشتر ضریب تعیین (R^2) نسبت به خط برابری (LOE) برای مدل جامع با مقدار ۰/۳۹ بوده و مقدار کمتر این پارامتر برای مدل جامع ساده بوده و برابر ۰/۲۷ است. در مورد نسبت خطای استاندارد پیش‌بینی به انحراف معیار اندازه‌گیری (S_e/S_y) نیز مقدار کمتر برای مدل جامع با مقدار ۰/۷۸ و مقدار بیشتر برای مدل جامع ساده برابر ۰/۸۶ می‌باشد.

پارامترهای خط روند مقادیر پیش‌بینی و مقادیر محاسبات بازگشتی نیز نشان می‌دهد هر دو مدل دارای شیب ۰/۶۱۳ هستند. همچنین مدل جامع با مقدار ۱۲۶۳ و مدل جامع ساده با مقدار ۱۵۰۸، به ترتیب کمترین و بیشترین مقدار عرض از مبدأ رابطه خطی روند مقادیر پیش‌بینی و محاسبات بازگشتی مدول دینامیکی لایه‌های آسفالتی را دارند.

بنابراین با مقایسه دو مدل، مدل جامع توانسته است پیش‌بینی‌های دقیق‌تری نسبت به مدل جامع ساده انجام دهد. همچنین هر دو مدل دارای اریب قابل توجه پیش‌بینی مدول دینامیکی برای لایه-های آسفالتی بوده و اریب بیشتر نیز متعلق به مدل جامع ساده می‌باشد. نتایج ارزیابی عملکرد مدل‌های پیش‌بینی مدول دینامیکی در قالب دو معیار دقت و اریب، قابلیت پرداخت و نیاز به ارائه مدل‌های جدیدی را برای پیش‌بینی مدول دینامیکی لایه‌های آسفالتی در روسازی‌های در حال بهره‌برداری نشان می‌دهد. در بخش بعدی، مدل‌های جدید درجا ارائه شده است.

جدول ۳. پارامترهای ارزیابی عملکرد مدل‌های پیش‌بینی اصلی

مدل پیش‌بینی	جامع	جامع ساده
SSE	$2/5 \times 10^9$	$3/0 \times 10^9$

رابطه ۱۲ است که تمامی پارامترهای آن قبلاً تعریف شده است. ضرایب b_1 تا b_{16} مربوط به پارامترهای مدل اصلی و مدل درجا برای لایه‌های آسفالتی در حال بهره‌برداری که مدل جامع ساده درجا^{۲۱} نامیده شده است به صورت جدول ۵ ارائه شده است.

۶. ارزیابی عملکرد مدل‌های درجا

همانند مدل‌های اصلی، عملکرد مدل‌های جدید تعیین مدول دینامیکی لایه‌های آسفالتی توسط دو معیار دقت و اریب پیش‌بینی مورد ارزیابی قرار گرفته است. شکل ۶ و شکل ۷ مقادیر مدول دینامیکی پیش‌بینی را به ترتیب توسط مدل جامع درجا و مدل جامع ساده درجا در برابر مقادیر مدول محاسبات بازگشتی FWD ارائه می‌کند. همان طوری که مشاهده می‌شود مدل‌های جدید نتایج پیش‌بینی مدول دینامیکی را در امتداد خط برابری (LOE) ارائه کرده‌اند. بنابراین می‌توان مشاهده کرد مدل‌های جدید قابلیت بسیار خوبی در تعیین مدول دینامیکی درجای لایه‌های آسفالتی دارند.

برای مدل‌های درجا پارامترهای ارزیابی عملکرد در جدول ۶ ارائه شده است. همان طوری که در این جدول آمده است مقدار ضریب تعیین (R^2) نسبت به خط برابری (LOE) برای مدل جامع درجا و مدل جامع ساده درجا به ترتیب برابر ۰/۹۶ و ۰/۹۳ است. در مورد نسبت خطای استاندارد پیش‌بینی به انحراف معیار اندازه-گیری (Se/S_y) نیز مقدار کمتر برای مدل جامع درجا برابر ۰/۲۱ و مقدار بیشتر برای مدل جامع ساده درجا با مقدار ۰/۲۶ می‌باشد. بنابراین هر دو مدل جامع درجا و مدل جامع ساده درجا دارای دقت پیش‌بینی بسیار خوبی هستند. از بین این دو مدل نیز، مدل جامع درجا قدرت پیش‌بینی دقیق‌تری دارد.

اصلی و مدل درجا برای لایه‌های آسفالتی در حال بهره‌برداری که مدل جامع درجا^{۲۰} نامیده شده است در جدول ۴ ارائه شده است.

جدول ۴. ضرایب پارامترهای مدل جامع و جامع درجا (کالیبره)

ضریب	مقدار اولیه	مقدار کالیبره
b1	۶/۱۷۱۶۰	۸/۵۰۴۸۲
b2	-۰/۰۰۲۶۹	۰/۰۲۵۷۴
b3	-۰/۰۰۱۳۷	-۰/۰۰۹۵۶
b4	-۰/۱۰۶۴۱	۰/۰۴۴۸۶
b5	-۰/۰۵۲۴۸	-۰/۰۰۲۴۵
b6	-۰/۱۷۷۴۰	-۰/۸۳۶۶۶
b7	۰/۰۰۶۱۸	۰/۰۵۰۵۶
b8	۱/۰۱۵۴۰	-۱۱/۰۲۶۴۲
b9	۰/۰۸۳۹۵	-۰/۰۴۳۶۶
b10	۰/۰۱۴۲۰	-۰/۰۴۴۳۶۹
b11	۰/۱۷۱۰۳	۳/۵۷۳۹۶
b12	-۰/۰۰۷۵۷	-۰/۲۲۴۹۱
b13	-۰/۸۱۱۸۹	۰/۶۱۸۱۳
b14	-۰/۵۴۶۹۸	-۰/۵۰۵۶۲
b15	۲/۴۳۹۲۰	۲/۷۰۵۳۴
b16	-۰/۰۰۰۴۰	-۰/۰۰۵۱۹
b17	۰/۰۱۳۵۰	۰/۴۲۲۸۵
b18	-۰/۱۰۰۳۰	-۶/۹۶۵۲۸
b19	۰/۱۲۳۳۲	۰/۱۶۳۶۲
b20	۷/۷۲۲۷۳	۱۳/۲۰۸۶۷

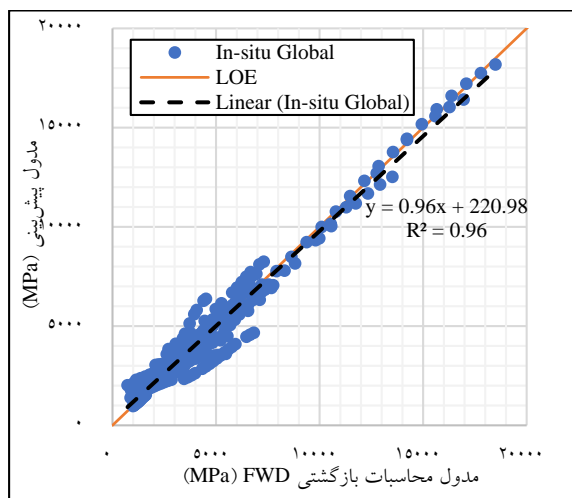
۵-۲ مدل رگرسیونی جامع ساده درجا

مدل پیش‌بینی مدول دینامیکی جامع ساده نیز با استفاده از داده‌های مدل‌سازی پرداخت شده است. شکل ریاضی این مدل به صورت

$$\log|E^*| = b_1 + b_2\rho_{34} + b_3\rho_{38} + b_4\rho_{200} + b_5V_a + b_6V_{beff} + b_7(V_{beff})^2 + \frac{b_8 + b_9\rho_{200} + b_{10}V_a + b_{11}V_{beff} + b_{12}(V_{beff})^2}{1 + e^{(b_{13} + b_{14}X_G)}} \quad (10)$$

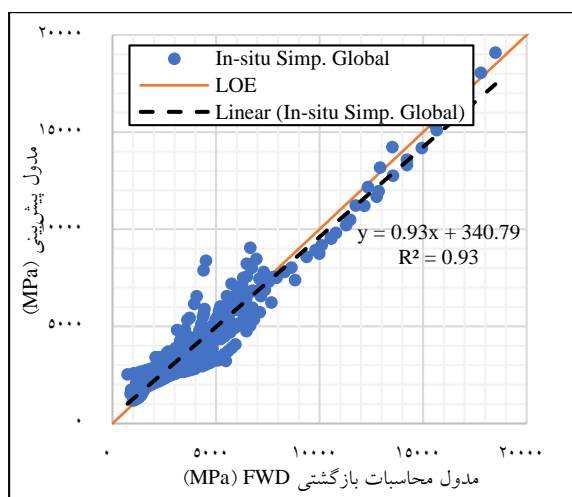
$$X_G = \log\left(\frac{b_{15} \times 10^{b_{16}T^2 + b_{17}T + b_{18}}}{\left[\frac{145000}{|G^*|}\right]^{b_{19}} - 1}\right)^{b_{20}} \quad (11)$$

$$\log|E^*| = b_1 + b_2(\rho_{34})^2 + b_3\rho_{38} + b_4\rho_{200} + b_5V_a + b_6V_{beff} + b_7(V_{beff})^2 + \frac{b_8 + b_9\rho_{38} + b_{10}\rho_{200} + b_{11}(\rho_{200})^2 + b_{12}V_a + b_{13}V_{beff} + b_{14}(V_{beff})^2}{1 + e^{(b_{15}+b_{16}\log|G^*|)}} \quad (12)$$



شکل ۶. مدول دینامیکی پیش‌بینی مدل جامع درجا در برابر مقادیر

محاسبات بازگشتی FWD (مدل‌سازی)



شکل ۷. مدول دینامیکی پیش‌بینی مدل جامع ساده درجا در برابر

مقادیر محاسبات بازگشتی FWD (مدل‌سازی)

جدول ۶. پارامترهای ارزیابی عملکرد مدل‌های پیش‌بینی درجا

(داده‌های مدل‌سازی)

مدل پیش‌بینی	جامع	جامع ساده
SSE	$1/4 \times 10^4$	$2/2 \times 10^4$
S_e	۶۷۳	۸۳۶
S_e/S_y	۰/۲۱	۰/۲۶
(LOE) R^2	۰/۹۶	۰/۹۳
شیب	۰/۹۵۶	۰/۹۲۶

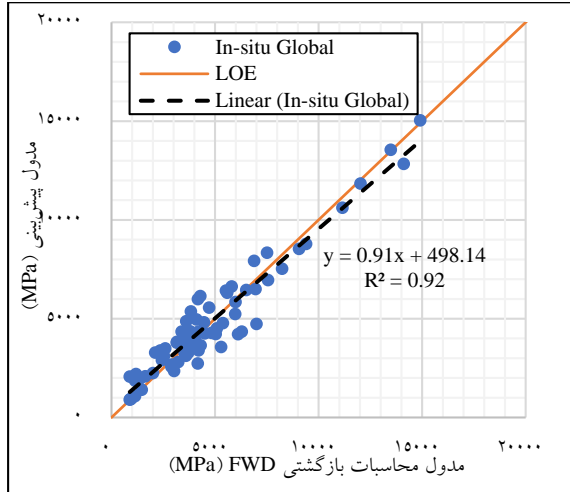
جدول ۵. ضرایب پارامترهای مدل جامع ساده و مدل جامع ساده

درجا (کالیبره)

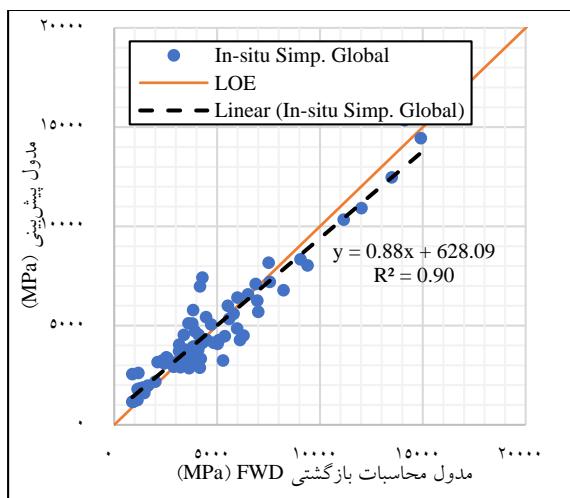
ضریب	مقدار اولیه	مقدار کالیبره
b1	۶/۴۱۹۷۰	۸/۶۶۳۵۵
b2	-۰/۰۰۰۱۴	۰/۰۰۰۱۳۰
b3	-۰/۰۰۵۴۷	-۰/۰۱۲۰۶
b4	-۰/۱۱۷۸۶	۰/۰۳۰۲۱
b5	-۰/۰۵۵۲۸	۰/۰۰۶۳۹
b6	-۰/۱۶۲۶۶	-۰/۸۰۲۵۹
b7	۰/۰۰۴۸۷	۰/۰۴۷۵۴
b8	۰/۵۷۶۷۷	-۸/۰۳۷۶۵
b9	۰/۰۰۷۱۳	۰/۰۱۵۹۶
b10	۰/۱۶۱۶۷	-۰/۱۴۲۸۶
b11	-۰/۰۰۵۲۰	۰/۰۱۱۴۴
b12	۰/۰۱۸۸۹	-۰/۰۶۵۶۲
b13	۰/۱۶۰۳۱	۲/۴۹۷۲۸
b14	-۰/۰۰۵۹۲	-۰/۱۵۶۸۹
b15	۱/۸۶۴۵۰	۶/۷۲۷۰۷
b16	-۰/۹۵۹۹۱	-۲/۴۳۸۰۰

پارامترهای خط روند مقادیر پیش‌بینی مدل‌های درجا و مقادیر اندازه‌گیری نیز نشان می‌دهد مدل جامع درجا با شیب ۰/۹۵۶ نزدیک‌ترین مقدار به شیب یک و مدل جامع ساده درجا نیز دارای شیب ۰/۹۲۶ است. همچنین این دو مدل با مقادیر ۲۲۱ و ۳۴۱، به ترتیب کمترین و بیشترین مقدار عرض از مبدأ رابطه خطی روند مقادیر پیش‌بینی و محاسبات بازگشتی مدول دینامیکی لایه‌های آسفالتی را دارا هستند. در نتیجه مقایسه اریب پیش‌بینی مدل‌های درجا نیز نشان می‌دهد دو مدل درجا دارای اریب پیش‌بینی بسیار کم بوده و اریب پیش‌بینی کمتر نیز متعلق به مدل جامع درجا می‌باشد.

جامع درجا و مدل جامع ساده درجا دارای دقت بسیار خوبی بوده‌اند. مقایسه اریب پیش‌بینی مدل‌های درجا نیز نشان می‌دهد دو مدل درجا دارای اریب پیش‌بینی کم و قابل قبولی هستند و بین آن دو، مدل جامع درجا دارای اریب کمتری است.



شکل ۸. مدول دینامیکی پیش‌بینی مدل جامع درجا در برابر مقادیر محاسبات بازگشتی FWD (اعتبارسنجی)



شکل ۹. مدول دینامیکی پیش‌بینی مدل جامع ساده درجا در برابر مقادیر محاسبات بازگشتی FWD (اعتبارسنجی)

جدول ۷. پارامترهای ارزیابی عملکرد مدل‌های پیش‌بینی درجا (داده‌های اعتبارسنجی)

مدل پیش‌بینی	جامع	جامع ساده
SSE	$5/3 \times 10^7$	$7/1 \times 10^7$
S_e	۸۲۱	۹۵۱
S_e/S_y	۰/۲۸	۰/۳۳
(LOE) R^2	۰/۹۲	۰/۸۹

مدل پیش‌بینی	جامع	جامع ساده
عرض از مبدأ	۲۲۱	۳۴۱

۷. اعتبارسنجی مدل‌های جدید درجا

برای اعتبارسنجی مدل‌های جدید درجا، ارزیابی عملکرد این مدل‌ها با استفاده از داده‌های اعتبارسنجی تفکیک شده از مجموعه داده‌های پژوهش (داده‌های غیر از ساخت و پرداخت مدل) استفاده شده است. عملکرد پیش‌بینی مدل‌های جدید تعیین مدول دینامیکی درجای لایه‌های آسفالتی نیز توسط دو معیار دقت و اریب پیش‌بینی اعتبارسنجی شده است. شکل ۸ و شکل ۹ مقادیر مدول دینامیکی پیش‌بینی را به ترتیب توسط مدل‌های جامع درجا و جامع ساده درجا در برابر مدول محاسبات بازگشتی FWD ارائه می‌کند. با استفاده از داده‌های اعتبارسنجی نیز نتایج مشابهی با نتایج پیش‌بینی‌های مدول دینامیکی با داده‌های ساخت مدل‌ها در بخش قبل به دست آمده است.

پارامترهای ارزیابی عملکرد مدل‌های درجا در اعتبارسنجی این مدل‌ها در جدول ۷ ارائه شده است. مدل جامع درجا دارای مقدار ضریب تعیین (R^2) نسبت به خط برابری (LOE) بیشتر و برابر ۰/۹۲ است. این مقدار برای مدل جامع ساده درجا برابر ۰/۸۹ می‌باشد. در مورد نسبت خطای استاندارد پیش‌بینی به انحراف معیار اندازه‌گیری (S_e/S_y) نیز مقدار کمتر به مدل جامع درجا با مقدار ۰/۲۸ و مقدار بیشتر به مدل جامع ساده درجا برابر ۰/۳۳ تعلق دارد.

پارامترهای خط روند مقادیر پیش‌بینی مدل‌های درجا و مقادیر محاسبات بازگشتی در اعتبارسنجی مدل‌ها نیز نشان می‌دهد مدل جامع درجا با شیب ۰/۹۰۵ نزدیک‌ترین مقدار به یک و مدل جامع ساده درجا با مقدار شیب ۰/۸۷۷ بیشترین اختلاف با مقدار شیب یک را دارا است. همچنین این دو مدل با مقادیر ۴۹۸ و ۶۲۸، به ترتیب کمترین و بیشترین مقدار عرض از مبدأ رابطه خطی روند مقادیر پیش‌بینی و محاسبات بازگشتی مدول دینامیکی لایه‌های آسفالتی را دارا هستند.

بنابراین نتایج این بخش نیز مشابه نتایج ارزیابی دقت و اریب مدل‌ها توسط داده‌های ساخت مدل‌ها است. هر دو مدل پیش‌بینی

مدل پیش‌بینی	جامع	جامع ساده
شیب	۰/۹۰۵	۰/۸۷۷
عرض از مبدأ	۴۹۸	۶۲۸

از این رو می‌توان نتیجه گرفت اعتبارسنجی مدل‌های درجا که با ارزیابی دقت و اریب پیش‌بینی مدل‌ها انجام شده است، نتایج قابل قبولی در مقایسه با دقت و اریب مدل‌ها با داده‌های ساخت مدل‌ها دارد. با جمع‌بندی نتایج هر دو ارزیابی عملکرد ساخت و اعتبارسنجی مدل‌های درجا، قابلیت پیش‌بینی مدول دینامیکی لایه‌های آسفالتی در روسازی‌های در حال بهره‌برداری به ویژه در محدوده دمایی آزمایش‌های این پژوهش، با دقت بالا و اریب پیش‌بینی پایین توسط این مدل‌ها مشخص می‌شود. همچنین با بررسی دو مدل درجای جدید ارائه شده در این پژوهش، بهترین عملکرد پیش‌بینی به ترتیب به مدل‌های جامع درجا و جامع ساده درجا تعلق می‌گیرد.

مصالح لایه‌ها با دقت قابل قبول، مهم‌ترین مزیت مدل‌های پیش‌بینی جدید درجای توسعه یافته در این پژوهش به شمار می‌آید.

- مدل‌های توسعه یافته جدید با کالیبراسیون مدل‌های موجود، قابلیت پیش‌بینی مدول دینامیکی لایه‌های آسفالتی روسازی‌های در حال بهره‌برداری را در محدوده دمایی آزمایش‌های این پژوهش، یعنی دمای عمق لایه آسفالتی ۳۰ تا ۵۰ درجه سلسیوس و همچنین خصوصیات حجمی مخلوط‌ها شامل دانه‌بندی و درصد فضای خالی و مشخصات سختی قیر مورد استفاده (قیر با درجه نفوذ ۴۰/۵۰ و ۶۰/۷۰) در محدوده داده‌های مدل‌سازی این پژوهش، با دقت پیش‌بینی بسیار بالا و اریب پیش‌بینی پایین دارند. در بین دو مدل توسعه یافته، بهترین عملکرد پیش‌بینی نیز به مدل جامع درجا با ضریب تعیین ۰/۹۶ تعلق دارد.

۸. نتیجه‌گیری

۹. پی‌نوشت‌ها

در این مقاله دو مدل رگرسیونی جامع و جامع ساده که مدل‌های پیش‌بینی مدول دینامیکی مخلوط‌های آسفالتی مبتنی بر مفاهیم ویسکوالاستیک هستند مورد بررسی قرار گرفته و با کالیبراسیون آنها مدل‌هایی برای تعیین مدول دینامیکی درجای لایه‌های آسفالتی در روسازی‌های در حال بهره‌برداری توسعه یافته است. دو مدل توسعه یافته تحت عنوان مدل جامع درجا و مدل جامع ساده درجا با انجام آزمایش‌های میدانی و آزمایشگاهی در ده سایت روسازی آسفالتی در راه‌های پرتردد کشور، مورد ارزیابی قرار گرفته و نتایج زیر حاصل شده است:

1. Dynamic Modulus
2. Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide
3. Witczak
4. Modified Witczak
5. Hirsch
6. Al-Khateeb
7. Tie-Temperature Superposition
8. Artificial Neural Network
9. Falling Weight Deflectometer
10. AASHTO
11. Global Model
12. Simplified-Global Model
13. Heavy Weight Deflectometer
14. Dynamic Shear Rheometer
15. Temperature Sweep
16. Goodness-of-fit
17. Bias
18. Line of Equality
19. Trend Line
20. In-situ Global Model
21. In-situ Simplified Global Model

- مقایسه نتایج مدول دینامیکی لایه‌های آسفالتی روسازی‌های در حال بهره‌برداری توسط دو مدل پیش‌بینی مدول دینامیکی جامع و جامع ساده با نتایج محاسبات بازگشتی FWD، نشان دهنده امکان استفاده از این مدل‌ها در ساخت مدل‌های جدید پیش‌بینی مدول دینامیکی درجای لایه‌های آسفالتی است.

- عدم نیاز به انجام آزمایش میدانی FWD و پیش‌بینی مدول درجای لایه‌های آسفالتی به طور مستقیم از خصوصیات

- Gopalakrishnan, K., Kim, S., Ceylan, H. and Kaya, O. (2015). “Use of neural networks enhanced differential evolution for backcalculating asphalt concrete viscoelastic properties from falling weight deflectometer time series data”, 6th International Conference “Bituminous Mixtures and Pavements”, Thessaloniki, Greece: 10–12 Jun.
- Kavussi, A., Abbasghorbani, M., Moghaddas Nejad, F. and Bamdad Ziksari, A. (2014). “Effect of knowledge level of layer thickness on pavement structural number (SN) determination based on FWD data”, *Journal of Transportation Engineering*, Vol. 6, No. 1, pp. 145-160.
- Kavussi, A., Solatifar, N. and Abbasghorbani, M. (2016). “Mechanistic-empirical analysis of asphalt dynamic modulus for rehabilitation projects in Iran”, *Journal of Rehabilitation in Civil Engineering*, Vol. 4, No. 1, pp. 18-29. doi: <https://doi.org/10.22075/jrce.2016.488>
- Kutay, E., Chatti, K. and Lei, L. (2011). “Backcalculation of dynamic modulus master curve from falling weight deflectometer surface deflections”, *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, No. 2227, pp. 87–96. doi: <https://doi.org/10.3141/2227-10>
- Loulizi, A., Flintsch, G. W. and McGhee, K. (2007). “Determination of the in-place hot-mix asphalt layer modulus for rehabilitation projects by a mechanistic-empirical procedure”, *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, No. 2037, pp. 53–62. doi: <https://doi.org/10.3141/2037-05>
- Lytton, R. L., Germann, F. P., Chou, Y. J. and Stoffels, S. M. (1990). “Determining asphaltic concrete pavement structural properties by nondestructive testing”, *National Cooperative Highway Research Program*
- AASHTO. (2012). “Standard Method of Test for Determining the Rheological Properties of Asphalt Binder Using a Dynamic Shear Rheometer (DSR)”, AASHTO Designation: T 315-12.
- AASHTO. (2014). “Standard Method of Test for Quantitative Extraction of Asphalt Binder from Hot-Mix Asphalt (HMA)”, AASHTO Designation: T 164-14.
- ARA. (2004). “Guide for mechanistic-empirical design of new and rehabilitated pavement structures”, NCHRP 1-37A, National Cooperative Highway Research Program, Transportation Research Board, National Research Council, Washington, D.C.
- ASTM. (2011). “Standard Test Methods for Quantitative Extraction of Bitumen from Bituminous Paving Mixtures (D2172/D2172M-11)”, West Conshohocken, PA. doi: http://dx.doi.org/10.1520/D2172_D2172M-11
- ASTM. (2015). “Standard Test Method for Determining the Rheological Properties of Asphalt Binder Using a Dynamic Shear Rheometer (D7175-15)”, West Conshohocken, PA. doi: <http://dx.doi.org/10.1520/D7175-15>
- Georgouli, K., Pomoni, M., Cliatt, B. and Loizos, A. (2015). “A simplified approach for the estimation of HMA dynamic modulus for in service pavements”, 6th International Conference ‘Bituminous Mixtures and Pavements’, Thessaloniki, Greece: 10-12 Jun.
- Gopalakrishnan, K., Kim, S., Ceylan, H. and Kaya, O. (2014). “Development of asphalt dynamic modulus master curve using falling weight deflectometer measurements”, *Technical Report: TR-659*. Institute for Transportation, Iowa State University.

- curves of in-service asphalt layers using MEPDG models”, Road Materials and Pavement Design. Vol 20, No. 1, pp. 225-243. doi: <https://doi.org/10.1080/14680629.2017.1380688>
- Solatifar, N., Kavussi, A., Abbasghorbani, M. and Sivilevičius, H. (2017). “Application of FWD data in developing dynamic modulus master curves of in-service asphalt layers”, Journal of Civil Engineering and Management, Vol. 23, No. 5, pp. 661-671. doi: <https://doi.org/10.3846/13923730.2017.1292948>
- Ullidtz, P. (1998). “Modeling flexible pavement response and performance”, Gylling: Narayana Press.
- Ullidtz, P. (2000). “Will nonlinear backcalculation help?”, Nondestructive Testing of Pavements and Backcalculation of Moduli, Third Volume, ASTM STP 1375, S. D. Tayabji and E. O. Lukanen, Eds., American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA. doi: <http://dx.doi.org/10.1520/STP14757S>
- Varma, S. and Kutay, M. E. (2016). “Backcalculation of viscoelastic and nonlinear flexible pavement layer properties from falling weight deflections”, International Journal of Pavement Engineering, Vol. 17, No. 5, pp. 388–402. doi: <https://doi.org/10.1080/10298436.2014.993196>
- Varma, S., Kutay, M. E. and Levenberg, E. (2013). “Viscoelastic genetic algorithm for inverse analysis of asphalt layer properties from falling weight deflections”, Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, No. 2369, pp. 38–46. doi: <https://doi.org/10.3141/2369-05>
- (NCHRP), Report 327, Transportation Research Board, Washington D.C.
- Odemark, N. (1949). “Investigation as to the elastic properties of soils and design of pavements according to the theory of elasticity”, Stockholm: Statens Vaginstutete.
- Sakhaeifar, M. S., Kim, Y. R. and Kabir, P. (2015). “New predictive models for the dynamic modulus of hot mix asphalt”, Construction and Building Materials, No. 76, pp. 221-231. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.11.011>
- Seo, J., Kim, Y., Cho, J. and Jeong, S. (2013). “Estimation of in situ dynamic modulus by using MEPDG dynamic modulus and FWD data at different temperatures”, International Journal of Pavement Engineering, Vol. 14, No. 4, pp. 343–353. doi: <https://doi.org/10.1080/10298436.2012.664274>
- Solatifar, N. (2018). “Analysis of conventional dynamic modulus predictive models of asphalt mixtures”, Amirkabir Journal of Civil Engineering, In press. doi: <http://dx.doi.org/10.22060/ceej.2018.15006.5811>
- 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>
- Solatifar, N., Kavussi, A., Abbasghorbani, M. and Katicha, S. W. (2019). “Development of dynamic modulus master

نادر صولتی‌فر، مجتبی‌عباس‌قربانی

نادر صولتی‌فر، 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.



مجتبی‌عباس‌قربانی، درجه کارشناسی در رشته مهندسی عمران را در سال ۱۳۷۹ از دانشگاه آزاد اسلامی و درجه کارشناسی ارشد در رشته مهندسی عمران - راه و ترابری را در سال ۱۳۸۴ از دانشگاه تربیت مدرس اخذ نمود. در سال ۱۳۹۴ 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) و ارزیابی غیرمخرب روسازی بوده و در حال حاضر مدیر دفتر مهندسين مشاور شرکت آزمایشگاه فنی و مکانیک خاک کشور است.

