

توسعه مدل هیرش درجا برای پیش‌بینی مدول دینامیکی لایه‌های آسفالتی

نادر صولتی‌فر، استادیار، گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه ارومیه

مرتضی جلیلی قاضی‌زاده*، استادیار، گروه عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه صنعتی قوچان

Email: m.jalili@qiet.ac.ir

دریافت: ۱۳۹۷/۱۲/۱۵ - پذیرش: ۱۳۹۸/۰۴/۰۳

چکیده

راهنمای طراحی روسازی مکانیستیک- تجربی (MEPDG) برای طراحی و بهسازی روسازی‌های آسفالتی از مدول دینامیکی به عنوان مشخصه رفتار ویسکوالاستیک مخلوط‌های آسفالتی استفاده می‌کند. این راهنما، برای تعیین مدول دینامیکی لایه‌های آسفالتی در حال بهره‌برداری، از نتایج آزمایش افت‌وخیزسنج وزنه افتان (FWD)، به همراه مدل‌های پیش‌بینی آزمایشگاهی مدول دینامیکی، بهره می‌گیرد. در این پژوهش، با انجام آزمایش‌های میدانی و آزمایشگاهی در ده سایت روسازی آسفالتی در دو استان خوزستان و کرمان، به تحلیل مدول دینامیکی درجای لایه‌های آسفالتی با استفاده از نتایج محاسبات بازگشتی FWD پرداخته 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 ارزیابی مدول دینامیکی لایه‌های آسفالتی با استفاده از مدل پیش‌بینی هیرش، امکان ساخت مدل جدید با پرداخت این مدل بررسی شده و مدل جدید پیش‌بینی مدول دینامیکی درجای لایه‌های آسفالتی تحت عنوان مدل هیرش درجا توسعه یافته است. ارزیابی عملکرد و اعتبارسنجی مدل توسعه یافته، دقت پیش‌بینی زیاد و اُریب پیش‌بینی کم را نشان می‌دهد.

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

۱. مقدمه

ورودی‌های روش MEPDG برای طراحی و بهسازی روسازی‌های آسفالتی است (آرا، ۲۰۰۴). هزینه زیاد، نیاز به تجهیزات خاص و گران‌قیمت، پرسنل متخصص و نیز مدت زمان طولانی مورد نیاز برای انجام آزمایش، از جمله چالش‌های آزمایش مدول دینامیکی در آزمایشگاه محسوب می‌شوند. از این رو، نیاز به روش‌های ساده‌تر و

با توسعه روزافزون روش طراحی روسازی مکانیستیک- تجربی^۱ (MEPDG)، نیاز به تعیین دقیق وضعیت سازه‌ای روسازی‌ها بیش از پیش افزایش یافته است. مدول دینامیکی^۲ ($|E^*|$) به عنوان مشخصه رفتار ویسکوالاستیک لایه‌های آسفالتی یکی از مهم‌ترین

1- Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide

2- Dynamic modulus

تعیین مدول دینامیکی درجا ارائه شده است. این روش‌ها بر اساس ترکیبی از نتایج آزمایش‌های غیرمخرب (عموماً آزمایش FWD) و مغزه‌گیری برای انجام آزمایش‌های آزمایشگاهی از جمله تجزیه مخلوط، دانه‌بندی، تعیین فضای خالی، بازیابی قیر و تعیین مشخصات ویسکوزیته آن است.

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. روش پیشنهادی آشتو در MEPDG (آرا، ۲۰۰۴)، سئو و همکاران (۲۰۱۳)، گئورگولی و همکاران (۲۰۱۵) و نیز صولتی‌فر و همکاران (۲۰۱۷) از جمله‌ی این روش‌های توسعه یافته هستند. به طور کلی، در این روش‌ها، از مدول محاسبات بازگشتی نتایج آزمایش FWD برای تعیین مدول میدانی (درجای) لایه‌های آسفالتی بهره گرفته شده و سپس مغزه‌هایی از محل برای انجام آزمایش‌های تعیین خصوصیات حجمی و مشخصات ویسکوزیته قیرهای بازیابی گرفته می‌شود. با به کارگیری مدل‌های پیش‌بینی مدول دینامیکی و استفاده از نتایج آزمایش‌های آزمایشگاهی، مدول دینامیکی پیش‌بینی تعیین شده و در نهایت این مدول پیش‌بینی با استفاده از مدول محاسبات بازگشتی تصحیح شده و مدول دینامیکی درجای لایه‌های آسفالتی به دست می‌آید.

لولیزی و همکاران (۲۰۰۷)، کاووسی و همکاران (۲۰۱۶) و نیز صولتی‌فر و همکاران (۲۰۱۹) با انجام آزمایش‌های میدانی و آزمایشگاهی، روش پیشنهادی MEPDG در بهسازی روسازی‌های آسفالتی را در سه سطح طراحی مورد ارزیابی قرار داده و امکان بهره‌گیری

غیرمستقیم تعیین این مدول، باعث تمرکز پژوهشگران روی توسعه مدل‌های پیش‌بینی مدول دینامیکی مخلوط‌های آسفالتی شده است (صولتی‌فر، ۲۰۱۸).

توسعه و ساخت مدل‌های پیش‌بینی مدول دینامیکی بر اساس داده‌های آزمایشگاهی بوده است. 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 پیش‌بینی مدول دینامیکی درجای لایه‌های آسفالتی را نشان می‌دهد. هدف اصلی این پژوهش، بررسی انطباق‌پذیری مدول‌های حاصل از مدل پیش‌بینی هیرش^۱ به عنوان یکی از مدل‌های فراگیر و کارا برای تعیین مدول دینامیکی مخلوط‌های آسفالتی با مدول محاسبات بازگشتی آزمایش افت‌وخیزسنج وزنه افتان^۲ (FWD) و نیز توسعه مدل جدید با پرداخت و واسنجی مدل اصلی با استفاده از نتایج آزمایش FWD می‌باشد.

۲. پیشینه پژوهش

۱-۲. پیش‌بینی مدول دینامیکی لایه‌های آسفالتی

مدول دینامیکی مخلوط‌های آسفالتی توسط مدل‌های پیش‌بینی، با استفاده از خصوصیات حجمی مخلوط و نیز مشخصات ویسکوزیته قیر تعیین می‌شود. مدل‌های معمول توسعه یافته شامل مدل ویتزاک^۳، مدل ویتزاک اصلاح شده^۴، مدل هیرش، مدل الخطیب^۵، مدل‌های رگرسیونی پیشرفته و نیز مدل‌های مبتنی بر شبکه‌های عصبی مصنوعی^۶ هستند (صولتی‌فر، ۲۰۱۸).

برای ارزیابی سازه‌های لایه‌های آسفالتی در حال بهره‌برداری نیز با توجه به تأکید روش MEPDG برای استفاده از مدول دینامیکی در بهسازی روسازی‌های آسفالتی، روش‌های مختلفی توسط پژوهشگران برای

- 1- Hirsch
- 2- Falling Weight Deflectometer
- 3- Witczak
- 4- Modified Witczak
- 5- Al-Khateeb
- 6- Artificial Neural Network

همچنین، ϕ زاویه فاز مخلوط آسفالتی (درجه) نیز مطابق رابطه ۳ قابل پیش‌بینی است:

$$P_c = \frac{(20 + 3 |G^*|_b (VFA)/(VMA))^{0.58}}{650 + (3 |G^*|_b (VFA)/(VMA))^{0.58}} \quad (2)$$

$$\phi = -21(\log P_c)^2 - 55 \log P_c \quad (3)$$

۳. برنامه آزمایش‌ها

با استفاده از امکانات موجود و بررسی‌ها روی راه‌های پرتردد کشور، مکانیابی نقاط برداشت داده‌های میدانی انجام شده است. توجه به تنوع آب و هوایی، وضعیت ترافیکی، تاریخچه ساخت روسازی، دانه‌بندی و سایر خصوصیات مخلوط آسفالتی، از جمله متغیرها در انتخاب روسازی‌های مورد آزمایش بوده است. استان‌های خوزستان و کرمان به عنوان مناطق انجام آزمایش‌ها تعیین شده است. 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. همان گونه که در این شکل مشاهده می‌شود، پنج محور منتهی به شهر اهواز در استان خوزستان و پنج محور منتهی به شهر سیرجان در استان کرمان برای نمونه گیری آزمایش‌های میدانی پژوهش حاضر انتخاب شده‌اند. جدول ۱ نیز مشخصات عمومی 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.

روسازی‌ها شامل هر دو نوع روسازی جدید (روسازی‌های در حال بهره‌برداری جدید بدون روکش) و بهسازی شده (روسازی‌های روکش شده طی دوره بهره‌برداری) هستند. عمر روسازی‌ها با یکدیگر متفاوت بوده و از دو هفته تا ۲۵ سال عمر دارند. سختی قیرها هم در دو درجه معمول قیرهای مورد استفاده در اکثر راه‌های کشور، با درجه نفوذ ۶۰/۷۰ و نیز با درجه سختی بیشتر

از این روش را با تصحیحاتی در مدل‌ها و روند آزمایش‌ها پیشنهاد کرده‌اند.

در کنار توسعه روش‌های تجربی، تلاش‌هایی نیز برای ارائه روش‌های تحلیلی و عددی تعیین مدول دینامیکی به طور مستقیم مبتنی بر نتایج آزمایش FWD صورت گرفته که از جمله می‌توان به پژوهش‌های کوتای و همکاران (۲۰۱۱)، وارما و همکاران (۲۰۱۳؛ ۲۰۱۶) و نیز گوپالاکریشنان و همکاران (۲۰۱۴؛ ۲۰۱۵) اشاره کرد.

۲-۲. مدل هیرش

کریستنسن و همکاران (۲۰۰۳) چهار مدل مختلف را بر اساس روابط مخلوط‌ها^۱ مورد بررسی و آزمایش قرار داده و مدلی را که مدول سختی قیر و دو پارامتر حجمی مخلوط شامل فضای خالی بین سنگدانه‌ای (VMA) و فضای خالی که با قیر پر می‌شود (VFA) را استفاده می‌کند، به علت پیش‌بینی نتایج دقیق‌تر تحت عنوان مدل پیش‌بینی مدول دینامیکی هیرش پیشنهاد داده‌اند. مدل‌های پیچیده‌تر، مدول ماستیک و یا ضخامت مواد چسبنده را که اندازه‌گیری آنها بسیار سخت است، نیاز دارند. مدل پیشنهادی هیرش به صورت رابطه ۱ ارائه شده است:

$$|E^*|_m = P_c \left[4,200,000 \left(1 - \frac{VMA}{100} \right) + 3 |G^*|_b \left(\frac{VMA * VFA}{10,000} \right) \right] + \frac{(1-P_c)}{\frac{(1-VMA/100)}{4,200,000} + \frac{VMA}{3 |G^*|_b (VFA)}} \quad (1)$$

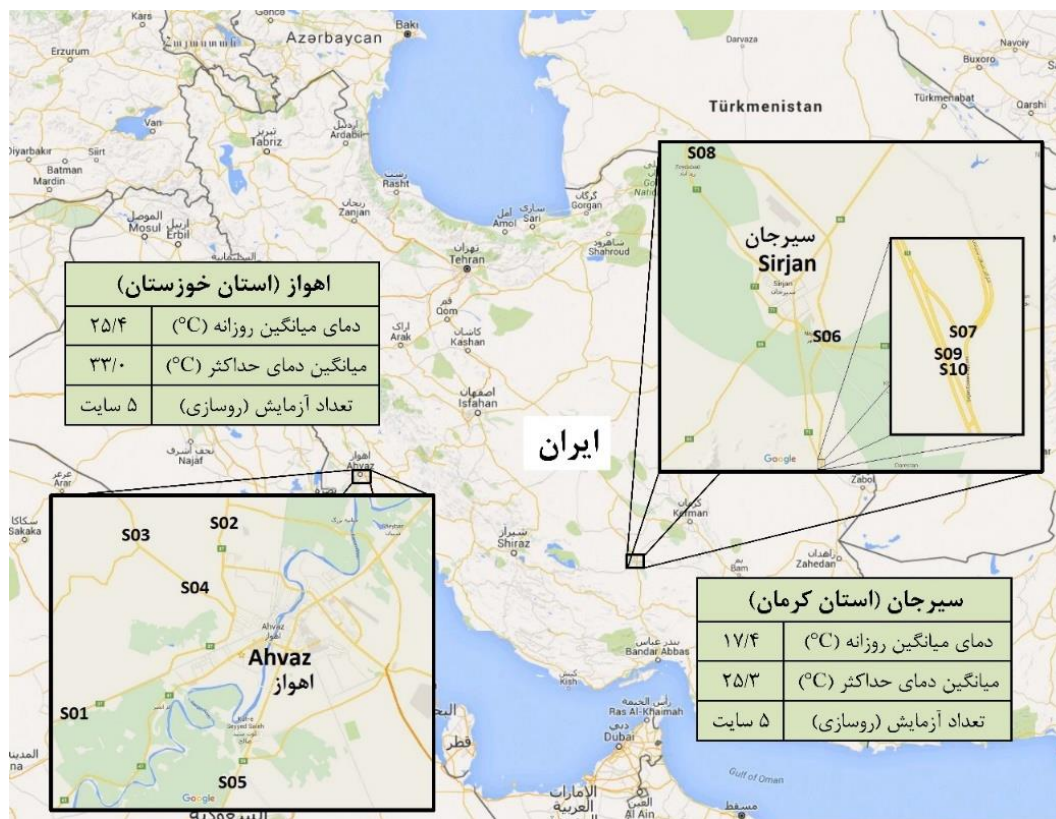
در این رابطه، $|E^*|_m$ مدول دینامیکی مخلوط آسفالتی (پوند بر اینچ مربع)، VMA فضای خالی بین سنگدانه‌ای (درصد)، VFA فضای خالی که با قیر پر می‌شود (درصد)، $|G^*|_b$ مدول دینامیکی برشی قیر (پوند بر اینچ مربع) و P_c حجم تماسی سنگدانه‌ها مطابق رابطه ۲ است.

^۱- Law of Mixtures

توسعه مدل هیرش درجا برای پیش بینی مدول دینامیکی لایه‌های آسفالتی

۴۰/۵۰ (سایت S03) موجود است. ضخامت و تعداد لایه

های آسفالتی و نیز لایه‌های اساس و زیراساس هم با یکدیگر متفاوت بوده و متغیر است.



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

جدول ۱. مشخصات عمومی روسازی‌های نمونه‌گیری برای آزمایش (بر اساس تاریخچه ساخت)

درجه نفوذ	ضخامت هر زیر لایه				مجموع ضخامت لایه-های آسفالتی (mm)	عمر روسازی	نوع روسازی	محور آزمایش	کد سایت	استان
	۱	۲	۳	۴						
آسفالتی	۴	۳	۲	۱	(mm)					
۶۰/۷۰	-	-	-	۷۵	۷۵	۲ هفته	جدید	اهواز - شیرین شهر	S01	
۶۰/۷۰	-	-	-	۹۵	۹۵	۴ سال	جدید	اهواز - شوش	S02	
۴۰/۵۰	-	-	-	۱۱۵	۱۱۵	۵ سال	بهسازی شده	اهواز - حمیدیه (۱)	S03	خوزستان
۶۰/۷۰	-	۸۰	۷۰	۴۰	۱۹۰	۱۰ سال	بهسازی شده	اهواز - حمیدیه (۲)	S04	
۶۰/۷۰	-	۱۲۰	۴۰	۶۰	۲۲۰	۲۵ سال	بهسازی شده	اهواز - خرمشهر	S05	
۶۰/۷۰	-	-	۶۰	۶۰	۱۲۰	۶ ماه	جدید	سیرجان - بافت	S06	
۶۰/۷۰	-	-	۶۰	۶۰	۱۲۰	۱ سال	جدید	ریمپ خروجی سیرجان	S07	کرمان
۶۰/۷۰	-	۵۰	۵۰	۴۵	۱۴۵	۱ سال	بهسازی جدید	کمر بندی سیرجان	S08	
۶۰/۷۰	۱۰۰	۸۰	۶۰	۶۰	۳۰۰	۱۵ سال	بهسازی شده	سیرجان - بندرعباس (۱)	S09	

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^۲ (LET)، روش ضخامت معادل^۳ (MET) و نیز روش اجزای محدود^۴ (FEM) برای تعیین مدول لایه‌ها استفاده می‌شود. در فرایند محاسبات بازگشتی در این پژوهش از روش محاسبات بازگشتی ضخامت معادل با توجه به برتری این روش نسبت به سایر روش‌ها بهره گرفته شده است (اولیتز، ۲۰۰۰).

۲-۳. مغزه‌گیری 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 نمونه‌های تهیه شده از برش مغزه‌های گرفته شده از سایت‌های روسازی را نشان می‌دهد.

۳-۱. آزمایش FWD و محاسبات بازگشتی نتایج

در هر یک از سایت‌های آزمایش، از نتایج آزمایش FWD که با استفاده از دستگاه^۱ HWD مدل ۸۰۰۰ دایناتست انجام گرفته، استفاده شده است. عملیات در هر سایت از ساعت ۶ صبح تا ساعت ۶ عصر در بازه‌های زمانی نیم ساعته انجام شده است. انتخاب این بازه زمانی برای تأمین گستره 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 بهره گرفته 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 یک سایت روسازی همراه با اندازه‌گیری دمای لایه آسفالتی در عمق‌های مختلف (صولتی فر و همکاران، ۲۰۱۸) نشان می‌دهد.



شکل ۲. آزمایش FWD همراه با اندازه‌گیری دمای عمق

لایه آسفالتی در یک سایت روسازی (صولتی فر و

همکاران، ۲۰۱۸)

۱- Heavy Weight Deflectometer

۲- Linear Elastic Theory

۳- Method of Equivalent Thickness

۴- Finite Element Method

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 رئومتر برشی دینامیکی^۱ (DSR) (در حالت آزمایش طیف دما^۲) بهره گرفته شده است. این آزمایش، خواص رئولوژیک و تغییر شکل پذیری قیر مانند مدول برشی (G^*) و زاویه فاز (δ) را در دماهای میانی تا دماهای بالای وضعیت خدمت‌دهی روسازی مطابق با استانداردهای ASTM-D7175 (ای‌اس‌تی‌ام، ۲۰۱۵) و AASHTO-T315 (آشتو، ۲۰۱۲) اندازه‌گیری می‌کند.

برای تعیین خصوصیات ویسکوزیته قیر جهت استفاده در تحلیل مدول دینامیکی لایه‌های آسفالتی، از روش ارائه شده MEPDG (آرا، ۲۰۰۴) استفاده 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. آزمایش در محدوده دمایی ۵ تا ۶۰ درجه سلسیوس و با گام افزایشی یک درجه‌ای انجام شده است. فرکانس انجام آزمایش ثابت و برابر ۱/۵۹ هرتز (معادل ۱۰ رادیان بر ثانیه) بوده است. همچنین، نرخ افزایش دما ۳ درجه بر دقیقه در نظر گرفته شده است. خصوصیات حجمی لایه‌ها و مشخصات ویسکوزیته قیرهای بازیابی در جدول ۲ ارائه شده است.



شکل ۳. نمونه‌های تهیه شده از برش مغزه‌های گرفته شده

۳-۳. تعیین خصوصیات حجمی مخلوط و

مشخصات ویسکوزیته قیرهای بازیابی شده

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 (ای‌اس‌تی‌ام، ۲۰۱۱) و AASHTO-T164 (آشتو، ۲۰۱۴) قرار گرفته‌اند. در این روش، از حلال تری‌کلرواتیلن برای شستشوی مخلوط استفاده شده تا کمترین اثر را 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

جدول ۲. خصوصیات حجمی و ویسکوزیته قیر لایه‌ها

پارامترهای ویسکوزیته قیر	خصوصیات حجمی مخلوط آسفالتی		کد لایه	
	VTS	A		VFA
-۲/۵۲۱۷	۷/۸۱۰۸	۵۷/۷	۱۴/۷	S01L1
-۲/۴۴۱۸	۷/۰۸۱۶	۵۵/۴	۱۲/۸	S02L1
-۱/۸۲۷۰	۵/۹۸۴۲	۵۱/۶	۱۳/۶	S03L1
-۱/۶۵۲۶	۵/۵۱۰۸	۴۹/۴	۱۲/۵	S04L1

^۱- Dynamic Shear Rheometer

^۲- Temperature Sweep

-۱/۶۹۹۳	۵/۶۳۴۵	۵۱/۹	۱۲/۳	S04L2
-۱/۹۰۶۰	۶/۱۷۴۴	۵۹/۷	۱۲/۹	S04L3
-۱/۹۸۲۶	۶/۴۵۲۲	۵۸/۸	۱۳/۹	S05L1
-۱/۸۳۰۰	۶/۰۳۵۷	۷۴/۶	۱۱/۸	S05L2
-۱/۹۱۱۶	۶/۲۳۳۲	۷۲/۰	۱۱/۴	S05L3
-۲/۵۰۰۴	۷/۷۸۹۷	۶۳/۱	۱۴/۹	S06L1
-۲/۸۶۱۶	۸/۷۶۶۷	۷۰/۹	۱۵/۵	S06L2
-۲/۷۲۶۶	۸/۳۹۹۴	۵۲/۴	۱۴/۵	S07L1
-۲/۲۹۱۸	۷/۲۲۰۰	۵۴/۲	۱۳/۸	S07L2
-۲/۵۰۴۱	۷/۷۸۲۷	۶۴/۰	۱۱/۱	S08L1
-۲/۷۰۹۹	۸/۳۵۰۶	۴۲/۵	۱۲/۴	S08L2
-۲/۸۰۸۹	۸/۶۲۵۵	۴۳/۷	۱۴/۶	S08L3
-۱/۹۱۷۱	۶/۲۵۷۹	۸۲/۰	۱۱/۶	S09L1
-۱/۹۱۷۵	۶/۲۴۰۰	۸۳/۴	۱۲/۷	S09L2
-۲/۶۱۵۹	۸/۰۹۲۸	۶۳/۴	۱۱/۵	S09L3
-۲/۳۶۱۰	۷/۳۸۵۷	۵۳/۹	۱۱/۹	S09L4
-۱/۹۱۷۱	۶/۲۵۷۹	۸۲/۰	۱۱/۶	S10L1
-۱/۹۱۷۵	۶/۲۴۰۰	۸۳/۴	۱۲/۷	S10L2
-۲/۶۱۵۹	۸/۰۹۲۸	۶۳/۴	۱۱/۵	S10L3
-۲/۳۶۱۰	۷/۳۸۵۷	۵۳/۹	۱۱/۹	S10L4

۴. تحلیل نتایج

۴-۱. پیش‌بینی مدول دینامیکی با استفاده از مدل

هیرش

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، مدول دینامیکی لایه‌های آسفالتی توسط مدل پیش‌بینی هیرش محاسبه شده 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 آنجایی که مخلوط‌های آسفالتی در سایت‌های S09 و S10 مشابه یکدیگر بوده‌اند، فقط داده‌های سایت S09 در تعیین

مدول دینامیکی پیش‌بینی مورد تحلیل قرار گرفته است. بنابراین تعداد ۲۰ لایه آسفالتی در ۹ سایت روسازی در حال بهره‌برداری در محدوده دمایی ۳۰ تا ۵۰ درجه سلسیوس و در مجموع ۴۰۰ سری داده در این پژوهش مورد استفاده قرار گرفته است.

فرکانس بارگذاری FWD با استفاده از تاریخچه زمانی بار و افت‌وخیز و فرض مقدار میانگین ۳۰ میلی‌ثانیه برای مدت زمان هر بارگذاری سقوط وزنه این آزمایش به دست آمده است. در این پژوهش، فرکانس FWD از رابطه ۴ محاسبه شده و برابر ۱۶/۶۷ هرتز تعیین شده است (لایتون و همکاران، ۱۹۹۰):

$$f_{FWD} = \frac{1}{2\Delta t} \quad (۴)$$

که در آن f_{FWD} فرکانس بارگذاری سقوط وزنه FWD (هرتز) و Δt مدت زمان بارگذاری (ثانیه) است.

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

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

در این روابط، SSE مجموع مربعات خطا^۳، $|E^*|_p$ مدول دینامیکی پیش‌بینی، E_m مدول اندازه‌گیری، \bar{E}_m میانگین مقادیر مدول اندازه‌گیری، S_e خطای استاندارد^۴ (انحراف معیار خطاها)، S_y انحراف معیار مقادیر اندازه‌گیری مدول و n تعداد مشاهدات است.

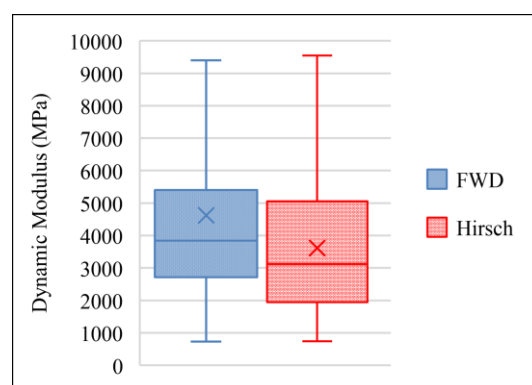
برای ارزیابی دقت پیش‌بینی مدل از پارامترهای نسبت خطای استاندارد به انحراف معیار مقادیر اندازه‌گیری (S_e/S_y) و ضریب تعیین (R^2) نسبت به خط برابری^۵ (LOE) به صورت رابطه ۸ و برای محاسبه اُریب پیش‌بینی مدل از پارامترهای شیب^۶ و عرض از مبدأ^۷ خط روند^۸ مقادیر پیش‌بینی در مقابل مقادیر اندازه‌گیری استفاده شده است.

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

که 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 اُریب پیش‌بینی کمتری خواهد بود.

شکل ۵ مقادیر مدول دینامیکی پیش‌بینی توسط مدل هیرش را در برابر مدول اندازه‌گیری FWD ارائه می‌کند.

مدول دینامیکی پیش‌بینی در محدوده دمایی انجام آزمایش FWD (۳۰ تا ۵۰ درجه سلسیوس) توسط مدل هیرش با استفاده از داده‌های ارائه شده در جدول ۲ تعیین شده است. نتایج مدول‌های پیش‌بینی و نیز مقادیر مدول FWD متناظر در همان دما در قالب پارامترهای آماری در شکل ۴ ارائه شده است. همان‌طور که در این شکل دیده می‌شود، به طور کلی، مدول‌های دینامیکی پیش‌بینی با مدل هیرش دارای مقادیر کمتری نسبت به مدول‌های محاسبات بازگشتی هستند. این مدل تا حدودی نیز پراکندگی پیش‌بینی بیشتری از خود نشان داده است.



شکل ۴. مدول دینامیکی پیش‌بینی لایه‌های آسفالتی با مدل هیرش در مقایسه با مقادیر محاسبات بازگشتی

عملکرد پیش‌بینی مدل هیرش در تعیین مدول دینامیکی لایه‌های آسفالتی توسط دو معیار دقت^۱ و اُریب^۲ پیش‌بینی مورد ارزیابی قرار گرفته است. برای این منظور، مدول دینامیکی به عنوان متغیر مستقل تعریف شده و خطاها به صورت زیر محاسبه شده است:

$$SSE = \sum [|E^*|_p - E_m]^2 \quad (5)$$

^۱- Goodness-of-Fit

^۲- Bias

^۳- Sum of Squared Error

^۴- Standard Error

^۵- Line of Equality

^۶- Slope

^۷- Intercept

^۸- Trend Line

پیش‌بینی قابل توجه مدل هیرش است. بنابراین، مدل هیرش برای پیش‌بینی مدول دینامیکی لایه‌های آسفالتی در روسازی‌های در حال بهره‌برداری دارای دقت کم و آریب زیادی است. نتایج ارزیابی عملکرد این مدل در قالب دو معیار دقت و آریب، قابلیت پرداخت و ارائه مدل جدیدی را برای پیش‌بینی مدول دینامیکی در جای لایه-های آسفالتی نشان می‌دهد. در بخش بعدی، مدل جدید درجا ارائه شده است.

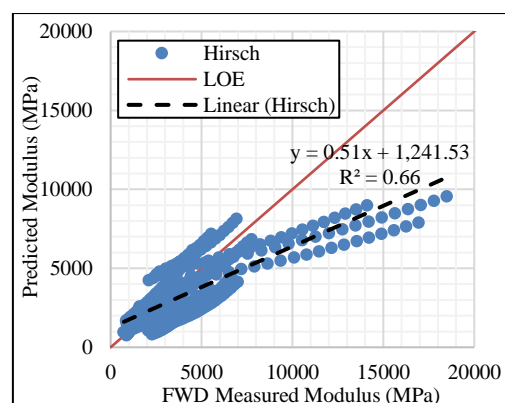
جدول ۳. پارامترهای ارزیابی عملکرد مدل هیرش

مدل پیش‌بینی	هیرش
SSE	$1/9 \times 10^9$
S_e	۲۱۸۹
S_e/S_y	۰/۶۹
(LOE) R^2	۰/۵۳
شیب	۰/۵۱۵
عرض از مبدأ	۱۲۴۲

۴-۲. توسعه مدل درجا

در این بخش، با استفاده از روش برازش غیرخطی^۱، پرداخت (واسنجی) مدل برای استفاده در پیش‌بینی مدول دینامیکی لایه‌های آسفالتی روسازی‌های در حال بهره‌برداری با استفاده از داده‌های FWD انجام شده و مدل جدیدی ارائه شده است. برای این منظور، داده‌های موجود به دو دسته ۸۰٪ (۳۲۰ سری داده) و ۲۰٪ (۸۰ سری داده) به ترتیب برای توسعه (مدل‌سازی) و اعتبارسنجی مدل 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.

عمده مقادیر پیش‌بینی توسط این مدل در زیر خط برابری (LOE) قرار گرفته‌اند که این نشان دهنده کم‌پیش‌بینی حدودی این مدل در تعیین مدول دینامیکی لایه‌های آسفالتی روسازی‌های در حال بهره‌برداری است. همچنین در این شکل خط روند بین مقادیر پیش‌بینی و مقادیر اندازه‌گیری ترسیم شده و معادله این خط همراه با ضریب تعیین (R^2) آن در شکل ارائه شده است. از این رابطه می‌توان به نوعی برای تصحیح مقادیر پیش‌بینی با مقادیر اندازه‌گیری استفاده نمود. همان طور که دیده می‌شود، خط روند با ضریب تعیین ۰/۶۶ رابطه خطی مقادیر پیش-بینی مدول دینامیکی لایه‌های آسفالتی را با مقادیر اندازه-گیری دارد.



شکل ۵. مدول دینامیکی پیش‌بینی توسط مدل هیرش در

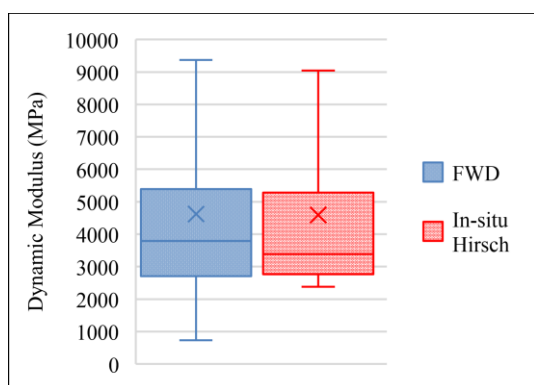
برابر مقادیر محاسبات بازگشتی FWD

پارامترهای ارزیابی عملکرد مدل هیرش در جدول ۳ ارائه شده است. همان طور که در این جدول مشاهده می‌شود، مقدار R^2 نسبت به خط برابری ۰/۵۳ است. نسبت خطای استاندارد پیش‌بینی به انحراف معیار اندازه-گیری (S_e/S_y) نیز مقدار ۰/۶۹ حاصل شده است که می‌توان گفت این دو مقدار دقت خوبی را برای مدل هیرش نشان نمی‌دهند. شیب و عرض از مبدأ خط روند مقادیر پیش‌بینی و مقادیر اندازه‌گیری نیز به ترتیب ۰/۵۱۵ و ۱۲۴۲ می‌باشد که این مقادیر نیز بیان‌گر وجود آریب

^۱- Nonlinear Regression

۴-۳. ارزیابی عملکرد مدل

مدول دینامیکی لایه‌های آسفالتی که توسط مدل هیرش درجا با استفاده از داده‌های پرداخت مدل محاسبه شده و نیز مقادیر مدول FWD متناظر در همان دما در قالب پارامترهای آماری در شکل ۶ ارائه شده است. همان طور که در این شکل دیده می‌شود، مدول‌های دینامیکی پیش-بینی توسط مدل درجا، محدوده نتایج مشابهی با مقادیر محاسبات بازگشتی FWD ارائه کرده است. بنابراین، می‌توان گفت که مدل جدید قابلیت بسیار خوبی در تعیین مدول دینامیکی درجای لایه‌های آسفالتی دارد.



شکل ۶. مدول دینامیکی پیش‌بینی لایه‌های آسفالتی با مدل درجا در مقایسه با مقادیر محاسبات بازگشتی

همانند مدل اصلی هیرش، عملکرد پیش‌بینی مدول جدید تعیین مدول دینامیکی درجای لایه‌های آسفالتی توسط دو معیار دقت و آریب پیش‌بینی مورد ارزیابی قرار گرفته است. شکل ۷، مقادیر مدول دینامیکی پیش‌بینی توسط مدل هیرش درجا را در برابر مدول اندازه‌گیری FWD ارائه می‌کند. همان طور که مشاهده می‌شود، مدل جدید نتایج پیش‌بینی مدول دینامیکی را در امتداد خط برابری (LOE) ارائه کرده است.

مدل پیش‌بینی مدول دینامیکی هیرش با استفاده از داده‌های مدل‌سازی تعریف شده (۳۲۰ سری داده) پرداخت شده است. شکل ریاضی این مدل مطابق رابطه اصلی آن به صورت رابطه ۹ می‌باشد. همچنین، پارامتر P_c نیز در رابطه ۱۰ تعریف شده است:

$$|E^*|_m = P_c \left[b_1 \left(1 - \frac{VMA}{100} \right) + b_2 |G^*|_b \left(\frac{VMA \times VFA}{b_3} \right)^{(1-P_c)} \right] + \frac{(1-VMA/100)}{b_4} + \frac{VMA}{b_5 |G^*|_b (VFA)} \quad (9)$$

$$P_c = \frac{(b_6 + b_7 |G^*|_b (VFA)/(VMA))^{b_8}}{b_9 + (b_{10} |G^*|_b (VFA)/(VMA))^{b_{11}}} \quad (10)$$

تمامی پارامترهای این روابط قبلاً تعریف شده‌اند. ضرایب b_1 تا b_{11} مربوط به پارامترهای مدل اصلی و مدل درجا برای لایه‌های آسفالتی در حال بهره‌برداری، که مدل هیرش درجا^۱ نامیده شده است، به صورت جدول ۴ می‌باشد.

جدول ۴. ضرایب پارامترهای مدل هیرش (اولیه) و مدل هیرش درجا (واسنجی شده)

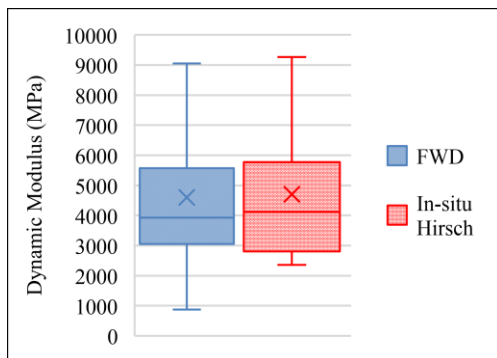
ضریب	مقدار اولیه	مقدار واسنجی
b_1	۴۲۰۰۰۰۰	۵۶۲۴۲۳
b_2	۳/۰۰۰	۲۳۲۴۰
b_3	۱۰۰۰۰	۷۱۳۲
b_4	۴۲۰۰۰۰۰	۲۲۲۸۰۸۴۷
b_5	۳/۰۰۰	-۵۵۱
b_6	۲۰	۲۲۹۵
b_7	۳/۰۰۰	۰/۰۹۰
b_8	۰/۵۸۰	۰/۶۸۵
b_9	۶۵۰	۲۹۲
b_{10}	۳/۰۰۰	۵/۶۰۴
b_{11}	۰/۵۸۰	۰/۱۶۳

^۱- In-situ Hirsch Model

۰/۸۲	(LOE) R ²
۰/۸۰۹	شیب
۸۵۴	عرض از مبدأ

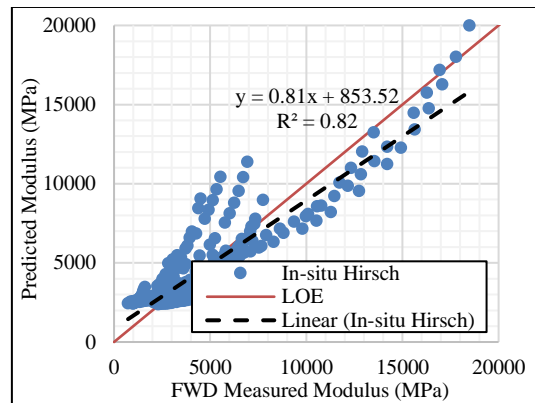
۴-۴. اعتبارسنجی مدل

برای اعتبارسنجی مدل جدید درجا، ارزیابی عملکرد این مدل با استفاده از داده‌های اعتبارسنجی تفکیک شده از مجموعه داده‌های پژوهش (داده‌های غیر از واسنجی مدل) استفاده شده است. نتایج پیش‌بینی مدول دینامیکی درجای لایه‌های آسفالتی که توسط داده‌های اعتبارسنجی (۲۰٪ داده‌ها) محاسبه شده است، همراه با مقادیر مدول FWD متناظر در همان دما، در قالب پارامترهای آماری، در شکل ۸ ارائه شده است. همان طور که در این شکل دیده می‌شود، مدول دینامیکی پیش‌بینی توسط مدل هیرش درجا برای داده‌های اعتبارسنجی نیز محدوده نتایج مشابهی با مقادیر محاسبات بازگشتی FWD همانند داده‌های ساخت مدل ارائه کرده است.



شکل ۸. مدول دینامیکی پیش‌بینی لایه‌های آسفالتی با مدل درجا (داده‌های اعتبارسنجی) در مقایسه با مقادیر محاسبات بازگشتی

عملکرد پیش‌بینی مدل جدید تعیین مدول دینامیکی درجای لایه‌های آسفالتی نیز توسط دو معیار دقت و اریب پیش‌بینی اعتبارسنجی شده است. شکل ۹، مقادیر مدول دینامیکی پیش‌بینی را در برابر مدول اندازه‌گیری FWD ارائه می‌کند. با استفاده از داده‌های اعتبارسنجی نیز نتایج



شکل ۷. مدول دینامیکی پیش‌بینی مدل هیرش درجا در برابر مقادیر محاسبات بازگشتی FWD (مدل‌سازی)

پارامترهای ارزیابی عملکرد مدل درجا نیز در جدول ۵ ارائه شده‌اند. همان طور که در این جدول آمده، مدل دارای مقدار R² نسبت به خط برابری (LOE) ۰/۸۲ است. برای نسبت خطای استاندارد پیش‌بینی به انحراف معیار اندازه‌گیری (S_e/S_y) نیز مقدار ۰/۴۳ به دست آمده است. این مقادیر، دقت قابل قبولی را برای مدل هیرش درجا نشان می‌دهند.

پارامترهای خط روند مقادیر پیش‌بینی مدل درجا و مقادیر اندازه‌گیری نیز نشان می‌دهند که این مدل با شیب ۰/۸۰۹ نزدیک به مقدار یک می‌باشد. همچنین، رابطه خطی روند مقادیر پیش‌بینی و اندازه‌گیری مدول دینامیکی لایه‌های آسفالتی، مقدار عرض از مبدأ ۸۵۴ را داراست که اریب پیش‌بینی کمتری نسبت به مدل اصلی هیرش دارد. بنابراین، مدل توسعه یافته هیرش درجا در این پژوهش، در مقایسه با مدل اصلی آن، دارای دقت پیش‌بینی بسیار خوب و اریب پیش‌بینی کمتری برای تعیین مدول دینامیکی لایه‌های آسفالتی در حال بهره‌برداری است.

جدول ۵. پارامترهای ارزیابی عملکرد مدل پیش‌بینی

هیرش درجا (داده‌های مدل‌سازی)	
هیرش درجا	مدل پیش‌بینی
$6/2 \times 10^8$	SSE
۱۳۹۰	S _e
۰/۴۳	S _e /S _y

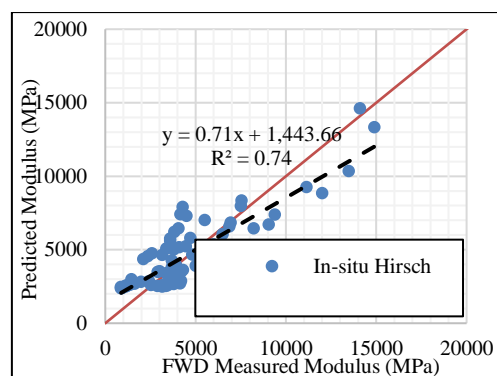
در نهایت، با جمع‌بندی نتایج هر دو ارزیابی عملکرد ساخت و اعتبارسنجی مدل درجا، قابلیت پیش-بینی مدول دینامیکی لایه‌های آسفالتی در روسازی‌های در حال بهره‌برداری، به ویژه در محدوده دمایی آزمایش-های این پژوهش، با دقت عالی و آریب پیش‌بینی کم توسط مدل توسعه یافته مشخص می‌شود.

۵. نتیجه‌گیری

این مقاله، به ارائه مدل پیش‌بینی مدول دینامیکی درجای لایه‌های آسفالتی در روسازی‌های در حال بهره‌برداری پرداخته است. این هدف با انجام آزمایش‌های میدانی و آزمایشگاهی در ده سایت روسازی آسفالتی راه‌های کشور ایران با استفاده از نتایج آزمایش FWD میسر شده است. مدول دینامیکی لایه‌های آسفالتی توسط مدل پیش‌بینی موجود هیرش در محدوده دماها و فرکانس انجام آزمایش FWD تعیین شده و امکان استفاده از این مدل برای ساخت مدل جدید جهت پیش‌بینی مدول دینامیکی لایه‌های آسفالتی در حال بهره‌برداری بررسی شده است. مدل جدید پیش‌بینی با پرداخت مدل اصلی توسعه یافته و مورد ارزیابی و اعتبارسنجی قرار گرفته است.

بررسی عملکرد مدل هیرش در پیش‌بینی مدول دینامیکی لایه‌های آسفالتی در حال بهره‌برداری و مقایسه با نتایج محاسبات بازگشتی FWD نشان می‌دهد که از این مدل می‌توان در ساخت مدل جدید پیش‌بینی مدول دینامیکی درجای لایه‌های آسفالتی بهره گرفت. مدل توسعه یافته تحت عنوان مدل هیرش درجا با پرداخت مدل اصلی، قابلیت پیش‌بینی مدول دینامیکی لایه‌های آسفالتی روسازی‌های در حال بهره‌برداری را، به ویژه در محدوده دمایی آزمایش‌های این پژوهش، با دقت پیش‌بینی عالی و آریب پیش‌بینی کم نشان داده است. علاوه بر آن، یکی از مهم‌ترین مزیت‌های مدل توسعه یافته جدید در این پژوهش، توانایی تعیین مدول دینامیکی درجای لایه‌های آسفالتی به طور مستقیم از

مشابهی با نتایج پیش‌بینی مدول دینامیکی با داده‌های ساخت مدل در بخش قبل به دست آمده است.



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

در جدول ۶، پارامترهای ارزیابی عملکرد مدل هیرش درجا در اعتبارسنجی این مدل ارائه شده است. مدل دارای مقدار R^2 نسبت به خط برابری (LOE) 0.73 است. برای نسبت خطای استاندارد پیش‌بینی به انحراف معیار اندازه‌گیری (S_e/S_y) نیز مقدار 0.52 به دست آمده است. همچنین، شیب و عرض از مبدأ خط روند مقادیر پیش‌بینی مدل و مقادیر اندازه‌گیری نیز در اعتبارسنجی مدل به ترتیب برابر 0.71 و 1444 می‌باشد. از این رو، می‌توان گفت مدل توسعه یافته در مرحله اعتبارسنجی نیز از دقت و آریب قابل قبولی برخوردار است.

جدول ۶. پارامترهای ارزیابی عملکرد مدل پیش‌بینی

هیرش درجا (داده‌های اعتبارسنجی)	
هیرش درجا	مدل پیش‌بینی
$1/8 \times 10^8$	SSE
۱۵۰۷	S_e
۰/۵۲	S_e/S_y
۰/۷۳	(LOE) R^2
۰/۷۱۰	شیب
۱۴۴۴	عرض از مبدأ

بهره‌برداری و برای ارزیابی سازه‌های آنها مورد استفاده قرار گیرد.

خصوصیات مصالح لایه‌ها با دقت قابل قبول و بدون نیاز به انجام آزمایش FWD است.

با توجه به این که مدل ارائه شده بر اساس داده‌های ده سایت منتخب روسازی‌های آسفالتی داخل کشور توسعه یافته است، امکان استفاده از این مدل در ارزیابی سازه‌های لایه‌های آسفالتی راه‌های کشور به خوبی وجود دارد. نیاز به استفاده از چنین مدل‌هایی زمانی ضرورت پیدا خواهد کرد که رویکرد طراحی روسازی در کشور از روش‌های تجربی فعلی به سمت روش‌های طراحی و بهسازی روسازی مکانیستیک - تجربی، مانند MEPDG، سوق پیدا کند. در این صورت، مدل هیرش در جای توسعه داده شده در این پژوهش می‌تواند برای تعیین مدول دینامیکی لایه‌های آسفالتی روسازی‌های در حال

۶. سپاسگزاری

از مدیرکل محترم دفتر مهندسين مشاور شرکت آزمایشگاه فنی و مکانیک خاک کشور، جناب آقای دکتر مجتبی عباس‌قربانی، در راستای فراهم نمودن امکان انجام آزمایش‌های این پژوهش، کمال تشکر و قدردانی را دارد. همچنین، از راهنمایی‌های ارزنده جناب آقای دکتر امیر کاووسی، استاد دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست دانشگاه تربیت مدرس، سپاسگزاری می‌شود.

۷. مراجع

- 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. 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. <http://dx.doi.org/10.1520/D7175-15>.
- Christensen, D. W., Pellinen, T. and Bonaquist, R. F. 2003. "Hirsch model for estimating the modulus of asphalt concrete". J. Assoc. Asphalt Paving Technol., 72: 97-121.
- 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 on Bituminous Mixtures and Pavements, Thessaloniki, Greece, 10-12 June.
- Gopalakrishnan, K., Ceylan, H., Kim, S. and Kaya, O. 2014. "Development of asphalt dynamic modulus master curve using falling weight deflectometer measurements". TR-659, Institute for Transportation, Iowa State University.
- 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 on Bituminous Mixtures and Pavements, Thessaloniki, Greece, 10-12 June.
- Kavussi, A., Solatifar, N. and Abbasghorbani, M. (2016). "Mechanistic-empirical analysis of asphalt dynamic modulus for rehabilitation projects in Iran". J. Rehabil. Civ. Eng., 4(1): 18-29. <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". Transport. Res. Record: J. Transport. Res. Board, 2227: 87-96. <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". Transport. Res. Record: J. Transport. Res. Board, 2037: 53-62. <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 (NCHRP), Report 327, Transportation Research Board, Washington, D.C.
- 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". *Int. J. Pavement Eng.*, 14(4): 343-353. <https://doi.org/10.1080/10298436.2012.664274>.
- Solatifar, N. 2018. "Analysis of conventional dynamic modulus predictive models of asphalt mixtures". *Amirkabir J. Civ. Eng.*, In press. <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". *J. Civ. Eng. Manage.*, 24(7): 516-525. <https://doi.org/10.3846/jcem.2018.6162>.
- Solatifar, N., Kavussi, A., Abbasghorbani, M. and Katicha, S. W. 2019. "Development of dynamic modulus master curves of in-service asphalt layers using MEPDG models". *Road Mater. Pavement Design*, 20(1): 225-243. <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". *J. Civ. Eng. Manage.*, 23(5): 661-671. <https://doi.org/10.3846/13923730.2017.1292948>.
- Ullidtz, P. 2000. "Will nonlinear backcalculation help?". *In: Tayabji, S. D. and Lukanen, E. O. (Eds.), Nondestructive Testing of Pavements and Backcalculation of Moduli, Third Volume, ASTM STP 1375, American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA.* <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". *Int. J. Pavement Eng.*, 17(5): 388-402. <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". *Transport. Res. Record: J. Transport. Res. Board*, 2369: 38-46. <https://doi.org/10.3141/2369-05>.