

# بررسی حساسیت نتایج محاسبات معکوس به دما در روسازی بازیافت شده در مقایسه با نتایج آزمایشگاهی

ویدا مهرانفر (دانشجوی کارشناسی ارشد)

امیر مدرس\* (دانشیار)

دانشکده‌ی مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی نوشیروانی، بابل

مهندسی عمران شریف، (پاییز ۱۳۹۸)  
دوری ۲ - ۳۵، شماره‌ی ۳/۲، ص. ۹۵-۸۳

در بخشی از مسیر دامغان - سمنان که عملیات بهسازی به روش بازیافت سرد در آن اجرا شده است، آزمایش‌های FWD و GPR انجام شده است. پاسخ روسازی به بار وارده در آزمایش FWD، بیش از هر عامل دیگری وابسته به دمای لایه‌ی آسفالتی است. بنابراین حساسیت تغییرشکل‌های ثبت شده و مدول‌های بازگشتی به دما به‌عنوان هدف اصلی در مطالعه‌ی حاضر ارزیابی شده است. در پژوهش حاضر، در کنار لایه‌ی آسفالتی، حساسیت دمایی مدول بازگشتی لایه‌ی اساس بازیافتی نیز بررسی شده است. زیرا وجود قیرامولسیون در لایه‌ی مذکور، احتمال وابستگی مدول‌های بازگشتی به دما را در لایه‌ی اساس بازیافتی افزایش می‌دهد. محاسبات معکوس با استفاده از نرم‌افزار متداول ELMOD و همچنین یک روش پیشنهادی بر مبنای تئوری‌های موجود در زمینه‌ی محاسبات معکوس انجام شد. جهت اعتبارسنجی نتایج به‌دست آمده از روش‌های پیشنهادی، نتایج آزمایش‌های مخرب که براساس نمونه‌گیری در محل انجام شده بودند، در چند ایستگاه استفاده شدند.

واژگان کلیدی: آزمایش‌های مخرب و غیرمخرب، آنالیز معکوس، بازیافت سرد، ضریب اصلاح دمایی، مدول بازگشتی، FWD.

## ۱. مقدمه

مداول استاتیکی که از بیشینه‌ی تغییرشکل میدانی برای محاسبه‌ی مدول کشسان خطی لایه‌ها استفاده می‌کنند و یا روش‌های پیشرفته‌ی دینامیکی که با استفاده از الگوریتم ژنتیک و شبکه‌ی عصبی مصنوعی به محاسبه‌ی مدول‌های بازگشتی می‌پردازند، برای محاسبه‌ی مدول‌های بازگشتی ارائه شده است.<sup>[۱-۳]</sup> تغییرشکل‌های اندازه‌گیری شده توسط FWD، فقط نشان‌دهنده‌ی شرایط روسازی موردنظر در محل آزمایش و در زمان انجام آزمایش است. بنابراین تغییرشکل‌های اندازه‌گیری شده و خصوصیات بازگشتی لایه‌ها باید برای یک شرایط خاص بارگذاری و شرایط محیطی استاندارد اصلاح شود.<sup>[۴-۵]</sup> مهم‌ترین عامل محیطی که در تغییرشکل‌های سطحی روسازی انعطاف‌پذیر تأثیر می‌گذارد، دمای لایه‌ی آسفالتی است.<sup>[۶]</sup> بنابراین به جهت یکسان‌سازی نتایج حاصل از آزمایش‌های غیرمخرب، ویژگی‌های وابسته به دمای لایه‌ها باید در یک دمای مرجع ارزیابی شوند. زی<sup>۱</sup> و همکارانش اظهار داشتند که نمی‌توان از اثر تغییرات فصلی در مدول‌های بازگشتی صرف‌نظر کرد، زیرا نتایج بررسی آنها نشان داده است که مدول‌های بازگشتی محاسبه شده در فصل زمستان به طور متوسط ۴۰٪ بیش از مدول‌های بازگشتی در اوایل تابستان هستند.<sup>[۸]</sup>

در مطالعات انجام شده، معمولاً اثر دما به دو صورت در فرایند محاسبات معکوس لحاظ شده است: در روش اول، تغییرشکل‌های به‌دست آمده از حسگرها مستقیماً قبل از انجام محاسبات معکوس اصلاح می‌شوند. در روش دوم که متداول‌تر است، اصلاح

مقاومت سازه‌ی روسازی تحت بهره‌برداری از طریق انواع آزمایش‌های مخرب و غیرمخرب قابل دستیابی است. نتایج آزمایش‌های اخیر به منظور طراحی روسازی، ارزیابی عمر باقیمانده‌ی سیستم روسازی و همچنین آگاه کردن مهندسان راه در مورد زمان مناسب تعمیر و نگهداری و مدیریت روسازی استفاده می‌شود. به آزمایش‌های غیرمخرب به دلیل برتری نسبت به آزمایش‌های مخرب در سال‌های اخیر توجه بیشتری شده است. یکی از متداول‌ترین روش‌هایی که برای انجام آزمایش‌های غیرمخرب مطرح است، تجهیزات افت‌وخیزنسج ضربه‌ی یا آزمایش وزنه‌ی افتان سنچس‌خیز (FWD) نام دارد که امروزه به‌طور گسترده استفاده می‌شود. زیرا روش FWD، بار وارد از چرخ وسیله‌ی نقلیه را بهتر از سایر تجهیزات غیرمخرب شبیه‌سازی می‌کند. در آزمایش FWD، پاسخ روسازی به بار وارده توسط حسگرهایی که در فواصل مشخص از محل اعمال بار قرار گرفته‌اند، ثبت می‌شود. با استفاده از تغییرشکل‌های به‌دست آمده توسط حسگرها می‌توان مدول ارتجاعی لایه‌های روسازی را برآورد کرد. فرایند صورت گرفته، محاسبه‌ی معکوس نام دارد و مدول‌های به‌دست آمده از آن، مدول‌های بازگشتی نامیده می‌شوند. تاکنون روش‌های متنوعی مانند: روش‌های

\* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۳۹۶/۷/۵، اصلاحیه ۱۳۹۶/۹/۲۶، پذیرش ۱۳۹۶/۱۰/۲

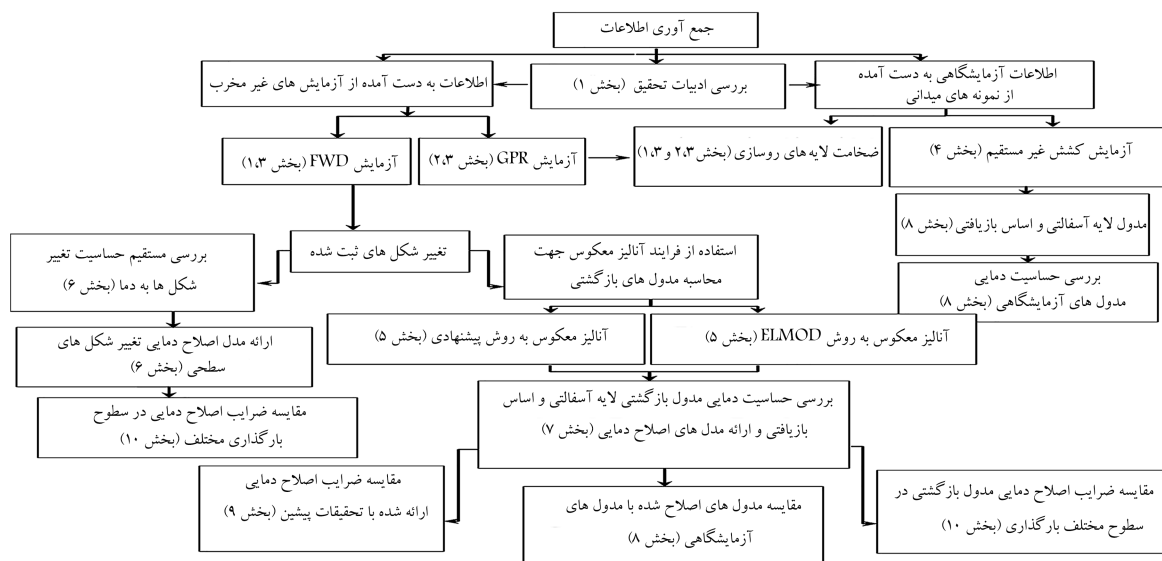
DOI:10.24200/J30.2017.5178.2211

دما پس از محاسبه‌ی مدول‌های بازگشتی انجام می‌گیرد. تاکنون پژوهش‌های بسیاری در زمینه‌ی تأثیر دما در نتایج آزمایش FWD صورت گرفته و مدل‌هایی نیز برای اصلاح مدول بازگشتی و تغییر شکل‌های میدانی با توجه به: شرایط خاص منطقه‌ی، میزان اطلاعات جمع‌آوری شده، سن روسازی، ضخامت روسازی، نوع لایه‌های روسازی، شرایط تراکم و رطوبت لایه‌های دانه‌ی و میزان خرابی‌های موجود در منطقه به صورت تجربی ارائه شده‌اند.<sup>[۱۰، ۱۱]</sup> معمولاً مدل‌های اخیر برای شرایط خاصی ارائه شده‌اند و تعمیم آن‌ها به شرایط دیگر با خطاهای محاسباتی همراه خواهد بود. در راهنمای طراحی آشتو که در سال ۱۹۹۳ ارائه شده است، مدل اصلاح دمایی بر مبنای دمای سطح آسفالت و متوسط دمای ۵ روزه‌ی هوا محاسبه شده بود، اما بررسی‌های بیشتر کیم<sup>۲</sup> و همکارانش نشان داد که متوسط دمای آشتو، قادر به در نظر گرفتن گرادیان دمایی آسفالت نیست و در نظر گرفتن دمای وسط لایه‌ی آسفالتی به جای متوسط دمای آشتو، دقت مدل را تا حدود زیادی افزایش می‌دهد.<sup>[۱۱]</sup> بنابراین در دو دهه‌ی اخیر، مطالعاتی بر مبنای دمای وسط لایه‌ی آسفالتی که دمای مؤثر نیز نامیده می‌شود، صورت گرفته است. همچنین با بررسی نمودار ضریب اصلاح دمایی برای ضخامت‌های مختلف لایه‌ی آسفالتی این نتیجه حاصل شد که شیب نمودار در لایه‌های ضخیم‌تر آسفالتی بیشتر است، که نشان می‌دهد اثر دما در لایه‌ی آسفالتی ضخیم‌تر، بیشتر است.<sup>[۱۲]</sup> نتایج مطالعات پیشین نیز نشان داده است که اثر دما در تغییر شکل حسگرهای نزدیک به مرکز بارگذاری، بیشتر است. بنابراین یکی از مهم‌ترین ضرایب اصلاح دما مربوط به تغییر شکل مرکزی است. برای مثال، کیم و همکارانش با بررسی ۴ نوع آسفالت در منطقه‌ی کارولینای شمالی، یک مدل اصلاح دما برای تغییر شکل مرکزی و مدول بازگشتی لایه‌ی آسفالتی ارائه کردند.<sup>[۱۱]</sup> یکی از نکات حائز اهمیت در پژوهش‌های اخیر، مقایسه بین مدول‌های بازگشتی با مدول‌های آزمایشگاهی است که به نتایج معتبر می‌بخشد. به عنوان مثال، در آریزونا پژوهشگران با بررسی ۲۰ ناحیه نتیجه گرفتند که همبستگی ضعیفی بین مدول‌های آزمایشگاهی و میدانی وجود دارد.<sup>[۱۳]</sup> همچنین محمد و نزال،<sup>۳</sup> نشان دادند که مقدار مدول‌های بازگشتی به طور چشم‌گیری تحت تأثیر روش محاسبه‌ی معکوس قرار گرفته است. در نتیجه نسبت مدول بازگشتی به مدول آزمایشگاهی نیز تحت تأثیر روش مرتبط قرار خواهد گرفت.<sup>[۱۴]</sup> در بررسی دیگری این نتیجه حاصل شد که تغییرات مدول آزمایشگاهی لایه‌ها با تغییر مکان آزمایش و نوع مصالح به طور قابل ملاحظه‌ی تغییر نمی‌کند، اما عکس این نتیجه در

مورد مدول‌های بازگشتی حاصل از آزمایش FWD به دست آمده است.<sup>[۱۵]</sup> از دلایل مختلفی که در توجیح اختلافات ذکر شده ارائه شده است، می‌توان به موارد: تفاوت در میزان تراکم مصالح در شرایط آزمایشگاهی و میدانی، آثار درازمدت روی مصالح در محل مانند تخریب و یا کلوخه شدن مصالح، تفاوت بسامد بارگذاری در آزمایشگاه و ... اشاره کرد.<sup>[۱۶]</sup> علی‌رغم مطالعات پیشین در این زمینه، تاکنون مطالعات بسیاری بر روی حساسیت دمایی روسازی حاوی لایه‌ی بازافتی با قیر امولسیون و سیمان انجام شده است. در پژوهش حاضر، میزان حساسیت نتایج به دست آمده از آزمایش FWD در روسازی‌های حاوی لایه‌ی بازافتی با قیر امولسیون و سیمان بررسی شده است که به دلیل حساسیت بالای قیر امولسیون به دما، علاوه بر لایه‌ی آسفالت روکش، عکس‌العمل لایه‌ی اساس بازافتی به بارگذاری ضربه‌ی نیز احتمالاً تابع تغییرات دما خواهد بود. در پژوهش حاضر، علاوه بر حساسیت دمایی تغییر شکل‌های ثبت شده و مدول‌های بازگشتی، مدل‌های اصلاح دمایی مطابق با شرایط منطقه‌ی مورد مطالعه ارائه و با مطالعات قبلی مقایسه شده است. همچنین با انجام آزمایش‌های مخرب، مدول‌های بازگشتی با مدول‌های آزمایشگاهی مقایسه شده‌اند.

## ۲. روش پژوهش

در شکل ۱، مراحل انجام پژوهش حاضر و آنالیزهای انجام شده به صورت فلوچارت ارائه شده است. بخش‌هایی از محور دامغان - سمنان که عملیات بازیافت سرد در سال‌های ۱۳۸۴ و ۱۳۸۵ در آنجا انجام شده است، به عنوان مطالعه‌ی موردی در نظر گرفته شد. داده‌های اولیه جهت انجام تحلیل‌ها، شامل نتایج آزمایش‌های میدانی (FWD و GPR) و بررسی‌های آزمایشگاهی شامل مغزه‌گیری در همان نقاط و انجام آزمایش‌های مدول ارتجاعی بوده است. در ابتدا حساسیت تغییر شکل‌های سطحی به دما مستقیماً بررسی و مدلی ارائه شد که به کمک آن می‌توان تغییر شکل‌های به دست آمده در دمای آزمایش را به تغییر شکل‌های معادل دمای مرجع تبدیل کرد. دمای مرجع در بیشتر پژوهش‌های انجام شده، ۲۰ درجه‌ی سانتی‌گراد انتخاب شده است، مگر در مناطق گرم که انتخاب دمای بالاتر مرجع منطقی به نظر می‌رسد.<sup>[۱۷]</sup> در پژوهش حاضر، دمای مرجع ۲۰ درجه انتخاب شده است.



شکل ۱. فلوچارت مراحل مطالعه.

### ۳. بررسی‌های غیرمخرب

#### ۱.۳. آزمایش FWD

آزمایش غیرمخرب توسط دستگاه افت و خیزسنج ضربه‌یی (FWD) مدل دایناست ۸۰۰۰ در ۶ ایستگاه از محور دامغان - سمنان انجام شده است. اطلاعات به دست آمده از ایستگاه آخر جهت اعتبارسنجی استفاده شده است. بار اعمالی توسط دستگاه FWD در مدت زمان ۱۰ الی ۳۵ میلی‌ثانیه به سطح روسازی وارد و پاسخ روسازی به کمک حسگرهای دستگاه اندازه‌گیری شده است. نخستین حسگر دقیقاً در زیر بار مرکزی قرار داشت و سایر حسگرها در فواصل ۲۰۰، ۳۰۰، ۴۵۰، ۶۰۰، ۹۰۰، ۱۲۰۰، ۱۵۰۰ و ۱۸۰۰ میلی‌متر از محل اعمال بار قرار داشتند. در پژوهش حاضر، آزمایش FWD برای اعمال بار هدف ۴۰، ۵۰ و ۶۰ کیلونیوتن به صفحه‌ی بارگذاری انجام شده است. از آنجایی که در هر تکرار نمی‌توان دقیقاً بار هدف را به روسازی اعمال کرد، تغییرشکل‌های ثبت شده با استفاده از ضرایب اصلاحی نرمالیزه شده‌اند. ضریب نرمالیزاسیون مطابق رابطه‌ی ۳ تعریف می‌شود:

$$(3) \quad \text{ضریب الیزاسیون} = \frac{\text{بار هدف}}{\text{بار اعمال شده در آزمایش FWD}}$$

در پژوهش حاضر، بررسی‌ها برای بار استاندارد ۴۰ کیلونیوتن انجام و نتایج برای سایر نیروها مقایسه شده است. دستگاه FWD قادر است دمای هوا و دمای سطح آسفالت را به‌طور خودکار اندازه‌گیری و ثبت کند. در مطالعه‌ی حاضر، به منظور دستیابی به تغییرشکل‌های روسازی در یک بازه‌ی دمایی گسترده، در هر ایستگاه آزمایش FWD در زمان‌های مختلف تکرار شد. اطلاعات از ۶ ایستگاه به شرح جدول ۱ جمع‌آوری شده است.

#### ۲.۳. آزمایش رادار نفوذی زمین (GPR)

اطلاع از ضخامت لایه‌ها برای انجام محاسبات معکوس ضروری است. برای اطلاع از ضخامت لایه‌ها در محور دامغان - سمنان، آزمایش غیرمخرب GPR انجام شده است. همچنین اطلاعات به دست آمده از نمونه‌های برداشت شده از محل برای کالیبراسیون نتایج آزمایش غیرمخرب GPR و بررسی شرایط سازه‌یی لایه‌های روسازی استفاده شده است. به کمک داده‌های حاصل از آزمایش GPR و همچنین نتایج به دست آمده از نمونه‌های برداشت شده از مسیر، ضخامت لایه‌های روسازی

مدول لایه‌های روسازی به کمک نرم‌افزار ELMOD و روش پیشنهادی پژوهش حاضر، که جزئیات آن در بخش ۵ ذکر شده است، به دست آمدند و با هم مقایسه شدند. از آنجایی که روسازی مورد ارزیابی شامل یک لایه‌ی اساس بازیافتی با قیر امولسیون و سیمان است، بنابراین علاوه بر بررسی لایه‌ی آسفالتی، اثر دما در لایه‌ی اساس بازیافتی نیز ارزیابی شد. حاصل ارزیابی‌های انجام شده، ارائه‌ی ضرایب اصلاح دمایی برای مدول‌های بازگشتی بوده است که در بخش‌های بعدی به آن پرداخته شده است. مطابق رابطه‌ی ۱، ضریب اصلاح دمایی برای مدول لایه‌ی آسفالتی به صورت نسبت مدول لایه‌ی آسفالتی در دمای مرجع به مدول لایه‌ی آسفالتی در دمای آزمایش تعریف شده است:<sup>[۹]</sup>

$$(1) \quad cf = \frac{E_r}{E_m}$$

که در آن،  $cf$  ضریب اصلاح دمایی برای مدول لایه‌ی آسفالتی،  $E_r$  مدول لایه‌ی آسفالتی در دمای مرجع ( $MPa$ ) و  $E_m$  مدول لایه‌ی آسفالتی در دمای آزمایش ( $MPa$ ) هستند.

ابتدا به کمک مدول بازگشتی لایه‌ی آسفالتی که در دماهای مختلف محاسبه شده است، مدول معادل دمای مرجع تخمین زده شد. سپس رابطه‌ی ۱ برای دماهای مختلف محاسبه شده و به کمک آنالیز رگرسیون، مدل اصلاح دمایی برای لایه‌ی آسفالتی به دست آمده است. ضرایب اصلاح دمایی برای لایه‌ی اساس بازیافتی نیز مطابق همین روش محاسبه شد. مقایسه‌ی مدل‌های ارائه شده با مدل سایر پژوهشگران از دیگر اهداف پژوهش حاضر است که فرصتی را فراهم می‌کند تا تفاوت ضرایب ارائه شده در مطالعات مختلف بررسی شود. یکی از نکاتی که پژوهش حاضر به آن تأکید دارد، مقایسه‌ی مدول‌های بازگشتی با مدول‌های آزمایشگاهی نمونه‌گیری شده از محل است. در پژوهش حاضر، برای محاسبه‌ی اختلاف آماری مقدار پیش‌بینی شده توسط مدل یا برآوردهای آماری با مقدار واقعی از پارامتر خطای جذر میانگین مربع‌ها ( $RMSE$ ) استفاده شده است. پارامتر  $RMSE$ ، ابزار مناسبی برای مقایسه‌ی خطاهای مقادیر پیش‌بینی شده و مقادیر واقعی توسط یک مجموعه از داده‌هاست.  $RMSE$  برای یک مجموعه‌ی  $n$  تایی با مقادیر پیش‌بینی شده‌ی  $X_i$  و مقادیر واقعی  $y_i$  به صورت رابطه‌ی ۲ تعریف می‌شود:

$$(2) \quad RMSE\% = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left( \frac{x_i - y_i}{y_i} \right)^2} \times 100$$

جدول ۱. اطلاعات ایستگاه‌های مورد مطالعه.

ایستگاه	کیلومتر تراژ (km)	ضخامت (mm)		* بار هدف در آزمایش FWD (kN)	دمای (°C)	
		رویه‌ی آسفالتی	اساس بازیافتی		هوا	موثر آسفالت
۱	۳۴+۲۰۰	۱۳۱	۱۷۸	۶۰-۵۰-۴۰	۱۷٫۹	۱۶٫۲
۲	۴۹+۳۰۰	۱۳۴	۱۷۱	۶۰-۵۰-۴۰	۱۴٫۲	۱۰٫۳
۳	۵۵+۸۰۰	۱۴۳	۱۷۴	۶۰-۵۰-۴۰	۲۲٫۳	۲۰٫۳
۴	۶۱+۲۰۰	۱۳۹	۱۶۷	۶۰-۵۰-۴۰	۲۳٫۶	۱۷٫۹
۵	۷۳+۸۰۰	۱۳۴	۱۷۱	۶۰-۵۰-۴۰	۲۶٫۳	۲۷٫۸
۶	۱۰۲+۳۰۰	۱۲۹	۱۷۵	۶۰-۵۰-۴۰	۲۶٫۸	۲۵٫۴

\* بار اعمال شده از طرف دستگاه (۴± کیلونیوتن) با بار هدف فاصله دارد.

## ۵. روش‌های آنالیز معکوس

در آزمایش FWD، مدول لایه‌های روسازی با عنوان مدول بازگشتی، با استفاده از تغییرشکل‌های میدانی و انجام محاسبات معکوس قابل محاسبه است. به‌طور کلی دو روش برای انجام فرایند آنالیز معکوس استفاده می‌شود: روش اول، در واقع به‌کارگیری یک الگوریتم تکراری است، به طوری که در ابتدا یک سری مدول فرضی برای لایه‌های روسازی در نظر گرفته می‌شود. سپس تغییرشکل‌های سطحی محاسبه و با تغییرشکل‌های میدانی مقایسه می‌شود. در صورتی که اختلاف بین تغییرشکل‌های میدانی و محاسباتی زیاد باشد، مدول فرضی لایه‌ها اصلاح می‌شود. این روند تا جایی ادامه می‌یابد که اختلاف بین تغییرشکل‌های محاسباتی و میدانی به میزان کمیته برسد.<sup>[۱۷]</sup> امروزه نرم‌افزارهای متعددی وجود دارند که بر مبنای روش ذکر شده برنامه‌نویسی شده‌اند. در پژوهش حاضر، برای انجام محاسبات معکوس، نرم‌افزار متداول ELMOD استفاده شده است. از مزایای نرم‌افزار ELMOD در بین سایر نرم‌افزارهای مشابه، می‌توان به خروجی‌های مناسب آن براساس تجربیات گذشته، توانایی در نظر گرفتن رفتار غیرخطی لایه‌های روسازی، توانایی در نظر گرفتن اثر دما در لایه‌ی آسفالتی، سرعت بالای انجام محاسبات، و همچنین در دسترس بودن نرم‌افزار ELMOD اشاره کرد.<sup>[۱۹]</sup> روش دوم، بر پایه‌ی پایگاه اطلاعاتی (Data Base) است که شامل کاسه‌های تغییرشکل‌ی است و با استفاده از بازه‌ی گسترده‌ی از مدول‌های فرضی به دست می‌آید. در روش اخیر، مدول بستر براساس کمیته‌سازی خطاها بین تغییرشکل‌های پیش‌بینی شده در Data Base و تغییرشکل‌های اندازه‌گیری شده در آزمایش FWD محاسبه می‌شود.

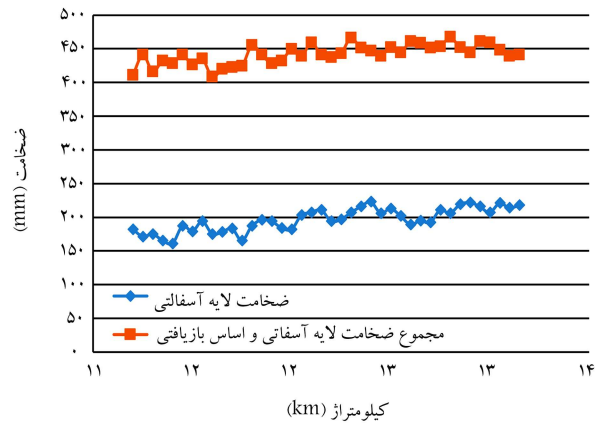
در پژوهش حاضر برای مقایسه‌ی نتایج ELMOD با یک روش دیگر، یک روند محاسبه‌ی معکوس بر مبنای روش پایگاه داده‌ها به زبان بیسیک<sup>۴</sup> کدنویسی شده است. در ادامه، مراحل روش ذکر شده به‌طور خلاصه ارائه شده است. ابتدا با یک فرض اولیه برای مدول بستر و در نظر گرفتن نسبت‌های مختلف بین مدول بستر و مدول سایر لایه‌ها، سیستم چندلایه‌ی مورد مطالعه به یک سیستم تک‌لایه‌ی معادل تبدیل می‌شود. طبق تئوری ادمارک، تنش‌ها و کرنش‌های زیر یک لایه فقط بستگی به سفتی آن لایه دارد. بنابراین اگر ضخامت، مدول کشسانی و ضریب پواسون یک لایه طوری تغییر کند که مقدار سفتی ثابت بماند، می‌توان نتیجه گرفت میزان تنش‌ها و کرنش‌ها در لایه‌ی مورد نظر ثابت می‌ماند. بنابراین با استفاده از رابطه‌ی ۴، سیستم چند لایه‌ی روسازی به یک لایه‌ی معادل با سفتی برابر تبدیل خواهد شد:

$$h_e = h_1 \sqrt{\frac{E_1}{E_2} \left( \frac{1 - \nu_1^2}{1 - \nu_2^2} \right)} \quad (4)$$

که در آن،  $E_1$  و  $E_2$  مدول کشسانی لایه‌های اول و دوم ( $MPa$ )،  $\nu_1$  و  $\nu_2$  ضریب پواسون لایه‌های اول و دوم،  $h_1$  و  $h_2$  ضخامت لایه‌ی اول و ضخامت لایه‌ی تبدیل یافته ( $mm$ ).

پس از تبدیل کل لایه‌ها به یک سیستم تک‌لایه‌ی معادل می‌توان از روابط ۵ و ۶ به ترتیب برای محاسبه‌ی تغییرشکل‌های سطحی زیر مرکز بارگذاری و فواصل مختلف از مرکز بارگذاری استفاده کرد:

$$d_{(z,r=0)} = \frac{(1 + \nu) \sigma_0 a}{E} \left[ \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{z}{a}\right)^2}} + (1 - 2\nu) \left( \sqrt{1 + \left(\frac{z}{a}\right)^2} - \frac{z}{a} \right) \right] \quad (5)$$



شکل ۲. نتایج آزمایش GPR در بخشی از مسیر.

به دست آمد. شکل ۲، نتایج به دست آمده از آزمایش GPR را در بخشی از مسیر نشان می‌دهد. در محور دامغان - سمنان، رویه‌ی آسفالتی با ضخامت تقریباً یکنواخت پخش و متراکم شده است. در طول مسیری که آزمایش FWD انجام شد، ضخامت میانگین لایه‌ی آسفالتی ۱۳۵ میلی‌متر بوده و بیشینه‌ی اختلاف بین ضخامت لایه‌ی آسفالتی در ایستگاه‌ها، ۱۴ میلی‌متر ثبت شده است. روسازی شامل یک لایه‌ی اساس بازیافت شده با فیلامولسیون به میزان متوسط ۴٪ و سیمان به میزان ۲٪ وزن خشک مصالح خرده آسفالتی بوده است که بر روی بستر قرار گرفته است. بررسی نتایج آزمایش GPR نشان داده است که متوسط ضخامت لایه‌ی اساس بازیافتی در محل آزمایش FWD، ۱۷۲ میلی‌متر بوده است.

## ۴. آزمایش‌های مخرب

به‌منظور کنترل میزان دقت و قابلیت اطمینان داده‌های به‌دست آمده از محاسبات معکوس، مدول کشسانی مصالح موجود در لایه‌های مختلف روسازی برای ایستگاه‌های مورد مطالعه به‌طور مخرب نیز اندازه‌گیری شد. در آزمایشگاه معمولاً برای محاسبه‌ی مدول ارتجاعی مصالح با ماده‌ی چسبنده، آزمایش کشش غیرمستقیم مطابق استاندارد ASTM D-۴۱۲۳ استفاده می‌شود. در حالی که آزمایش سه‌محوری دینامیکی طبق استاندارد AASHTO T۳۰۷-۹۹ برای مصالح دانه‌ی اساس، زیراساس، و بستر استفاده می‌شود.<sup>[۱۸]</sup> در پژوهش حاضر، مدول ارتجاعی مصالح چسبنده‌ی لایه‌های آسفالتی و اساس بازیافتی به کمک آزمایش کشش غیرمستقیم اندازه‌گیری شدند. آزمایش انجام شده، در اصل یک آزمایش فشاری قطری است که در آن سطح جانبی نمونه‌های استوانه‌ی به قطر ۴ یا ۶ اینچ تحت بارگذاری فشاری تکراری قرار می‌گیرند. در آزمایش مذکور، بار نیم‌سینوسی با زمان بارگذاری ۰/۱ ثانیه و زمان استراحت ۰/۹ ثانیه به نمونه‌ها وارد می‌شود. میزان تغییرشکل‌های افقی و قائم به‌وجودآمده در نمونه در اثر این بارگذاری توسط مبدل‌های خطی تشخیص دهنده‌ی تغییرات (LVDTs) اندازه‌گیری می‌شود. در ابتدای بارگذاری، تغییرشکل در نمونه به‌صورت کرنش خمیری صورت می‌گیرد، اما رفته‌رفته در اثر تکرار بارگذاری در هر سیکل، تغییرشکل خمیری کاهش می‌یابد و تمامی کرنش‌ها به‌صورت ارتجاعی صورت می‌گیرد. مدول ارتجاعی به‌صورت حاصل تقسیم تنش اعمال شده بر کرنش قابل بازگشت تحت تکرار بارگذاری تعریف شده است.

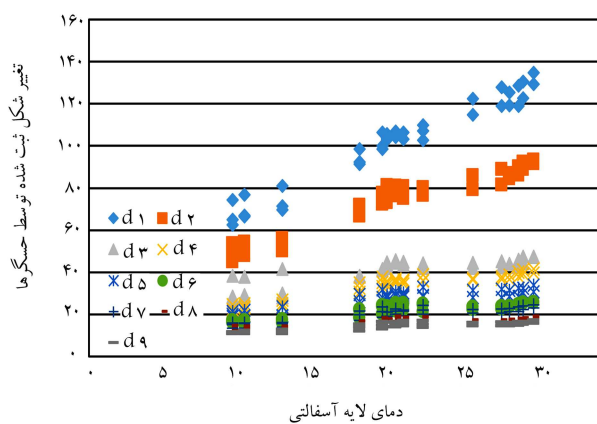
فرض اولیه‌ی مدول بستر از طریق رابطه‌ی ۱۳ اصلاح می‌شود. رابطه‌ی اخیر با فاکتور گرفتن از پارامتر  $f_1^2$  در رابطه‌ی ۱۱ و بازنویسی مجدد آن به دست می‌آید.  $f_i$  تابع تغییرشکل برای حسگر زیر صفحه‌ی بارگذاری است:

$$ESG = \left[ \frac{\sum_{i=1}^s \left( \frac{f_i}{d_i^m \times f_1} \right)^2}{\sum_{i=1}^s \left( \frac{f_i}{d_i^m \times f_1} \right)} \right] \sigma a f_1 \quad (13)$$

در گام آخر بین مدول‌های بستر اصلاح شده، مدولی که به واسطه‌ی آن کمترین میزان خطا بین تغییرشکل‌های محاسباتی و میدانی ایجاد شود، به عنوان خروجی انتخاب خواهد شد.

## ۶. حساسیت دمایی تغییرشکل‌های سطحی

تغییرشکل سطح روسازی در برابر بار اعمالی وابسته به دمایی است که آزمایش FWD در آن انجام می‌شود. بنابراین جهت دست‌یابی به نتایج منطقی لازم است تغییرشکل‌های روسازی، در یک دمای مرجع اندازه‌گیری شود. از آنجایی که همواره انجام آزمایش FWD در یک دمای مشخص امکان‌پذیر نیست، لازم است از ضرایب اصلاح دمایی برای تبدیل تغییرشکل در دمای آزمایش به دمای مرجع استفاده شود. شکل ۳، تغییرشکل‌های ثبت شده توسط حسگرها را در دماهای مختلف نشان می‌دهد. در شکل ۳، پارامترهای  $d_1$  و  $d_2$  به ترتیب تغییرشکل میدانی حسگرهای اول تا نهم هستند. مطابق انتظار، تغییرات دما بیشترین اثر را در تغییرشکل‌های مرکزی داشته‌اند. مطابق شکل ۳، تغییرشکل‌های ثبت شده‌ی حسگر دوم نیز تقریباً به اندازه‌ی حسگر مرکزی تحت تأثیر دما بوده است، اما از حسگر سوم به بعد افزایش دما اثر چندانی در تغییرشکل‌ها نداشته است. با توجه به ساختار روسازی اجرا شده در محور دامغان - سمنان، این نتیجه منطقی به نظر می‌رسد. زیرا روسازی علاوه بر لایه‌ی آسفالتی، شامل یک لایه‌ی اساس بازیافت شده با قیرمولسیون و سیمان است که می‌تواند بیشتر از اساس سنگ‌دانه‌ی تحت ۳۱ سانتی‌متر است. بنابراین انتظار می‌رفت که علاوه بر حسگر مرکزی، حسگرهای دورتر نیز تحت تأثیر دما باشند. از آنجایی که در پژوهش حاضر، تغییرشکل‌های حسگرهای اول و دوم به شدت وابسته به دما هستند، بنابراین استفاده از ضرایب اصلاح دمایی برای تبدیل تغییرشکل‌های ایجاد شده به معادل آن در دمای مرجع



شکل ۳. اثر دما در تغییرشکل‌های روسازی در فواصل مختلف از مرکز بارگذاری.

$$d_{z,r} = \frac{\sigma \cdot a^2}{2E} \left[ (1 + \nu) z^2 \frac{1}{\sqrt{(r^2 + z^2)^3}} + 2(1 - \nu^2) \frac{1}{\sqrt{(r^2 + z^2)}} \right] \quad (6)$$

که در آن‌ها،  $d_{(z,r=0)}$  تغییرشکل در عمق  $Z$  و زیر مرکز بارگذاری  $(\mu m)$  تغییرشکل در عمق  $Z$  و فاصله‌ی  $r$  از مرکز بارگذاری  $(\mu m)$ ،  $z$  عمق موردنظر از سطح روسازی  $(mm)$ ،  $\nu$  ضریب پواسون لایه‌ی موردنظر،  $\sigma_0$  تنش وارد به سطح روسازی در آزمایش FWD  $(MPa)$ ،  $E$  مدول کشسانی لایه‌ی موردنظر  $(kPa)$ ،  $a$  شعاع صفحه‌ی بارگذاری  $(mm)$ . به‌طور کلی هدف فرایند آنالیز معکوس، کمینه‌سازی خطاها بین تغییرشکل‌های محاسبه شده و تغییرشکل‌های میدانی است که از رابطه‌ی ۷ محاسبه می‌شود:

$$e = \sum_{i=1}^s \left( \frac{d_i^m - d_i^p}{d_i^m} \right)^2 \quad (7)$$

که در آن،  $e$  خطای محاسبه شده،  $d_i^p$  تغییرشکل محاسبه شده از روابط ۵ و ۶،  $d_i^m$  تغییرشکل اندازه‌گیری شده در آزمایش FWD  $(\mu m)$ ،  $s$  تعداد حسگرها که در پژوهش حاضر، ۹ عدد بوده است. برای کمینه‌سازی خطا بین تغییرشکل‌های محاسبه شده و تغییرشکل‌های میدانی مشتق رابطه‌ی ۸ نسبت به مدول بستر برابر صفر در نظر گرفته شده است:

$$\frac{\partial e}{\partial ESG} = \sum_{i=1}^s 2 \left( 1 - \frac{d_i^p}{d_i^m} \right) \left( -\frac{1}{d_i^m} \frac{\partial d_i^p}{\partial ESG} \right) = 0 \quad (8)$$

که در آن،  $ESG$  مدول اصلاح شده‌ی بستر  $(MPa)$  و سایر پارامترها مطابق رابطه‌ی ۷ است.

تغییرشکل محاسبه شده برای حسگر نام، مطابق رابطه‌ی ۹ تابعی از مدول لایه‌ی  $E_k$ ، ضریب پواسون لایه‌ی  $\mu_k$ ، ضخامت لایه‌ی  $H_k$  شعاع صفحه‌ی بارگذاری  $a$  و فشار تماسی  $p$  است. در رابطه‌ی ۹، اندیس  $k$  اشاره به شماره‌ی لایه دارد.

$$d_i^p = f_i(E_K, \mu_K, H_K, a, p) \quad (9)$$

رابطه‌ی ۹، با تقسیم مدول لایه‌ها به مدول بستر به صورت رابطه‌ی ۱۰ بازنویسی شده است. برای هر ایستگاه مشخص است و ضریب پواسون نیز برای هر لایه فرض خواهد شد. پارامترهای  $a$  و  $p$  نیز در هر افت ثابت بوده‌اند.

$$d_i^p = \frac{pa}{ESG} f_i \left( \frac{E_1}{ESG}, \frac{E_2}{ESG}, \dots, \frac{E_n}{ESG} \right) = \frac{pa}{ESG} f_i \quad (10)$$

رابطه‌ی ۱۱، با جایگزین کردن رابطه‌ی ۱۰ در رابطه‌ی ۸ به دست آمده است:

$$\frac{(pa)^2}{E_{SG}^2} \sum_{i=1}^s \left( \frac{ESG}{Pa} - \frac{f_i}{d_i^m} \right) \frac{f_i}{d_i^m} = 0 \quad (11)$$

که در آن،  $f_i$  تابع تغییرشکل حسگر نام نامیده می‌شود و به صورت رابطه‌ی ۱۲ تعریف می‌شود:

$$f_i = d_i^p \left[ \frac{E_T}{\sigma a} \right] \quad (12)$$

که در آن،  $\sigma$  تنش وارده به روسازی  $(MPa)$  و  $E_T$  مدول اولیه‌ی فرض شده برای بستر  $(MPa)$  است.

شده است. پارامتر ضریب تغییرات نیز برای بیان عددی میزان پراکندگی استفاده شده است. ضریب تغییرات تغییرشکل‌های حسگر مرکزی و حسگر دوم به ترتیب ۲۰ و ۱۹ درصد بوده است، که پس از اعمال ضرایب اصلاح دمایی به ۵/۶ و ۶/۸ درصد کاهش یافته است.

## ۷. بررسی حساسیت دمایی مدول‌های بازگشتی

### ۱.۷. اثر دما بر لایه‌ی آسفالتی

مدول بازگشتی لایه‌های روسازی در دماهای مختلف به کمک نرم‌افزار ELMOD و روش پیشنهادی محاسبه شده است. شکل ۵، تغییرات مدول‌های بازگشتی محاسبه شده به کمک هر دو روش را برای لایه‌ی آسفالتی بر حسب دما نشان می‌دهد. در شکل ۵ الف نشان داده شده است که مقدار مدول بازگشتی لایه‌ی آسفالتی به دست آمده از هر دو روش با افزایش دما به طور قابل ملاحظه‌ی کاهش یافته است. این نتیجه کاملاً قابل انتظار است، زیرا وجود قیر در لایه‌ی آسفالتی باعث کاهش سختی لایه‌ی آسفالتی در اثر افزایش دما می‌شود. مقایسه‌ی مدول‌های به دست آمده از هر دو روش نشان داده است که مدول‌های بازگشتی به روش ELMOD به طور متوسط ۱/۴ برابر مدول‌های بازگشتی به روش پیشنهادی در پژوهش حاضر است. به کمک آنالیز رگرسیون نتایج شکل ۵ الف، مدول بازگشتی لایه‌ی آسفالتی در دمای مرجع از نتایج روش ELMOD و روش پیشنهادی به ترتیب ۴۶۵۳ و ۳۳۱۷ مگاپاسکال محاسبه شده است. شکل ۵ ب از تقسیم مدول بازگشتی

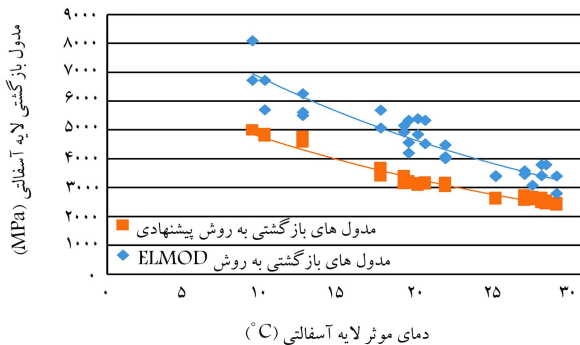
ضروری است. در مدلی که اشتو برای اصلاح دما ارائه کرده است، رابطه‌ی دما و تغییرشکل یک رابطه‌ی خطی است.<sup>[۲۰]</sup> در پژوهش حاضر، برای انتخاب شکل کلی مدل، مطالعات و گزارش‌های معتبر بررسی شدند و نتایج نشان دادند که بهتر است رابطه‌ی دما و تغییرشکل ایجاد شده، به صورت غیرخطی بیان شود.<sup>[۱۹]</sup> ضرایب اصلاح دمایی به صورت تقسیم تغییرشکل به دست آمده در دمای مرجع به تغییرشکل در دمای آزمایش تعریف شده است. تغییرشکل حسگرهای اول و دوم در دمای مرجع، به ترتیب ۹۸ و ۷۱ میکرومتر بوده است که به کمک آنالیز رگرسیون شکل ۳ محاسبه شده است. در پژوهش حاضر، مدل اصلاح دمایی برای حسگرهای اول و دوم به ترتیب مطابق تابع نمایی ۱۴ و ۱۵ ارائه شده است:

$$\frac{D_{1(ref)}}{D_T} = 1,9387e^{-0,022 \times T}, \quad R^2 = 0,93 \quad (14)$$

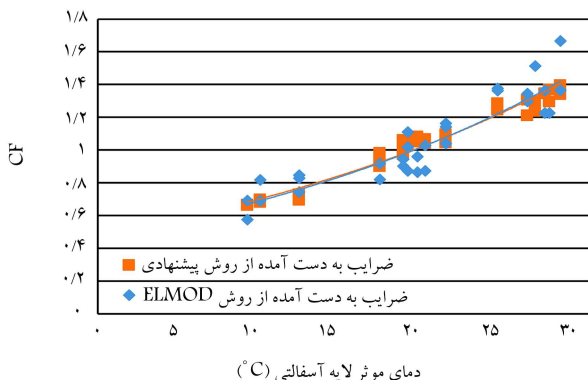
$$\frac{D_{2(ref)}}{D_T} = 1,8815e^{-0,022 \times T}, \quad R^2 = 0,9 \quad (15)$$

که در آن‌ها،  $D_{1(ref)}$  و  $D_{2(ref)}$  تغییرشکل اصلاح شده‌ی حسگرهای اول و دوم در دمای مرجع  $(\mu m)$ ،  $D_T$  تغییرشکل اندازه‌گیری شده در دمای  $T$   $(\mu m)$ ، دمای مؤثر لایه‌ی آسفالتی (دمای وسط لایه‌ی آسفالتی)  $(^{\circ}C)$ .

در شکل ۳، پراکندگی داده‌ها قبل و بعد از اعمال ضرایب اصلاح دمایی مشاهده می‌شود. در شکل‌های ۴ الف و ۴ ب، تغییرشکل حسگرهای اول و دوم در دمای مرجع به صورت خط افقی نشان داده شده است. با توجه به خط اشاره شده، پس از اعمال ضرایب اصلاح دمایی ارائه شده نه فقط پراکندگی داده‌ها به طور قابل ملاحظه‌ی کاهش یافته است، بلکه تغییرشکل حسگرها به دمای مرجع بسیار نزدیک

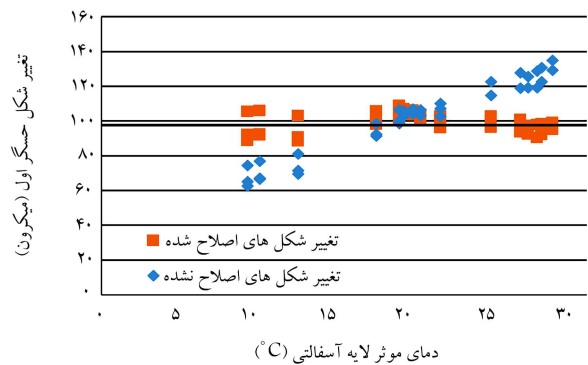


الف) مدول بازگشتی لایه آسفالتی در مقابل دمای مؤثر آسفالت؛

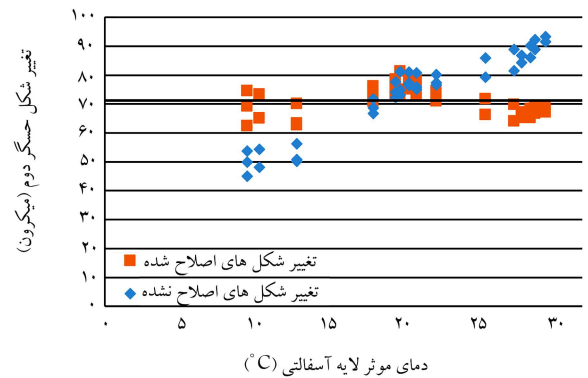


ب) نسبت مدول بازگشتی در دمای مرجع به مدول بازگشتی در دمای آزمایش.

شکل ۵. مقایسه‌ی مدول بازگشتی لایه‌ی آسفالتی به روش ELMOD و روش پیشنهادی.



الف) تغییر شکل حسگر مرکزی؛



ب) تغییر شکل حسگر دوم.

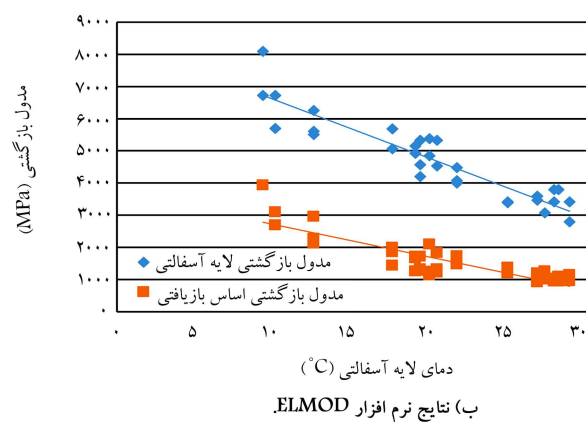
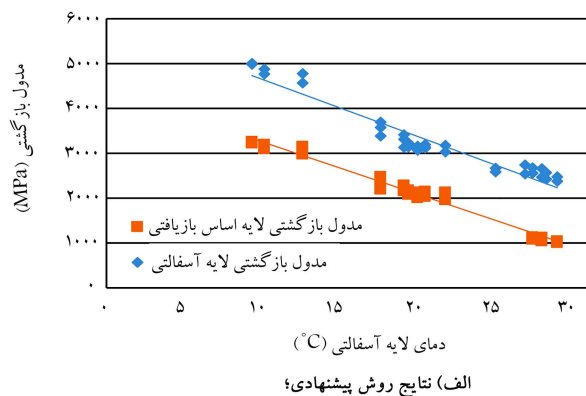
شکل ۴. مقایسه‌ی میزان پراکندگی تغییرشکل‌ها قبل و بعد از اصلاح دما.

ارزیابی شده است که مقدار آن برای داده‌های حاصل از روش پیشنهادی و روش ELMOD به ترتیب ۴ و ۹ درصد بوده است، که نشان می‌دهد پراکندگی داده‌های حاصل از روش پیشنهادی نسبت به روش ELMOD پس از اصلاح دما، کمتر است.

### ۲.۷. اثر دما در لایه‌ی اساس باز یافتی

در روسازی مورد مطالعه، وجود قیر امولسیون در لایه‌ی اساس باز یافتی باعث ایجاد پتانسیل حساسیت به دما در این لایه می‌شود. بنابراین بررسی اثر دما در مدل‌های بازگشتی و تغییر شکل‌های لایه‌ی مذکور ضروری به نظر می‌رسد. در شکل ۷، میزان تغییرات مدول بازگشتی در لایه‌ی آسفالتی و لایه‌ی اساس باز یافتی، در اثر تغییرات دما مقایسه شده است. مدول‌های بازگشتی به دست آمده از هر دو روش آنالیز معکوس بررسی شده است. شیب خط برآورد در شکل ۷ نشان می‌دهد که مدول‌های بازگشتی لایه‌ی اساس باز یافتی تقریباً به اندازه‌ی لایه‌ی آسفالتی تحت تأثیر تغییرات دماست. معمولاً قیرهای امولسیونی حساسیت دمایی بالاتری نسبت به قیرهای خالص دارند، اما در لایه‌ی باز یافتی علاوه بر قیر امولسیونی از سیمان نیز استفاده شده است که می‌تواند حساسیت دمایی این لایه را کاهش دهد. در نهایت انتظار می‌رود در لایه‌هایی که درصد سیمان کمی دارند، حساسیت دمایی اساس باز یافتی تقریباً مشابه با لایه‌ی آسفالتی باشد. مطابق شکل ۷، با توجه حساسیت دمایی مدول بازگشتی در لایه‌ی اساس باز یافتی، لازم است که مدول‌های بازگشتی لایه‌ی اساس باز یافتی نیز به دمای مرجع برده شوند.

در شکل ۸، روند تغییرات مدول‌های بازگشتی لایه‌ی اساس باز یافتی در برابر



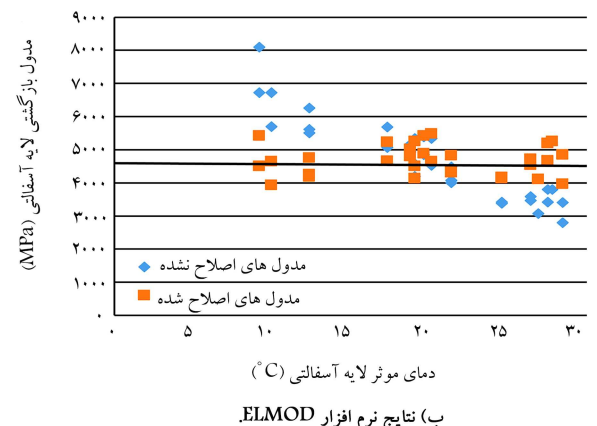
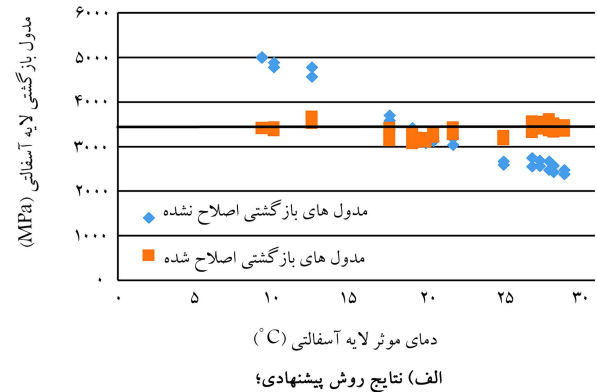
شکل ۷. تغییرات مدول بازگشتی به ازاء تغییرات دمای مؤثر آسفالت.

در دمای مرجع به مدول بازگشتی در دمای آزمایش FWD ترسیم شده است. همان‌طور که قبلاً اشاره شد، این نسبت بیانگر ضریب اصلاح دمای مدول لایه‌ی آسفالتی است و با پارامتر  $cf$  نشان داده می‌شود. با توجه شکل ۵ ب در یک دمای مشخص، ضریب اصلاح دمایی به دست آمده از نتایج هر دو روش آنالیز معکوس که در پژوهش حاضر استفاده شده است، بسیار به هم نزدیک است. علت این امر این است که مطابق شکل ۵ الف، شیب تغییرات نمودار مدول بازگشتی در مقابل تغییرات دما در هر دو روش تقریباً یکسان بوده است. روابط ۱۶ و ۱۷ که براساس آنالیز رگرسیون نتایج شکل ۵ ارائه شده‌اند، به ترتیب معادله‌های اصلاح دمایی مدول لایه‌ی آسفالتی حاصل از نتایج ELMOD و روش پیشنهادی هستند:

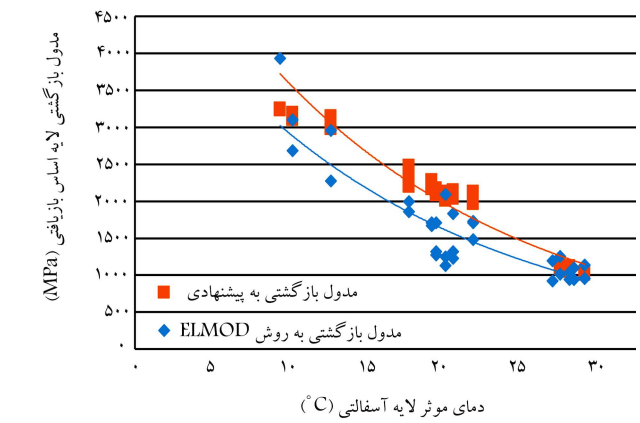
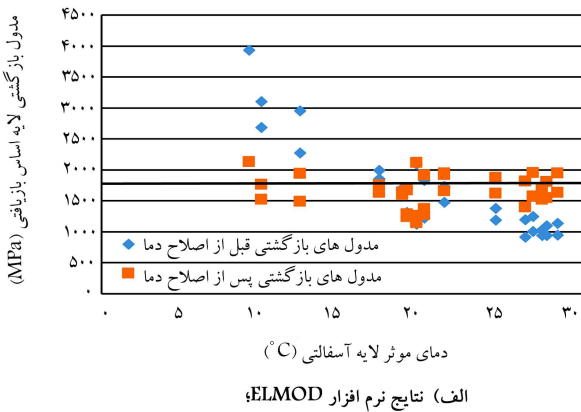
$$\frac{E_{(ref)}}{E_T} = 0.4677e^{0.278 \times T}, \quad R^2 = 0.85 \quad (16)$$

$$\frac{E_{(ref)}}{E_T} = 0.4829e^{0.262 \times T}, \quad R^2 = 0.95 \quad (17)$$

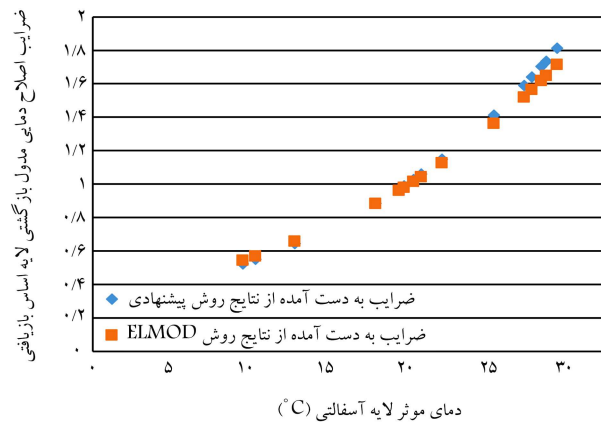
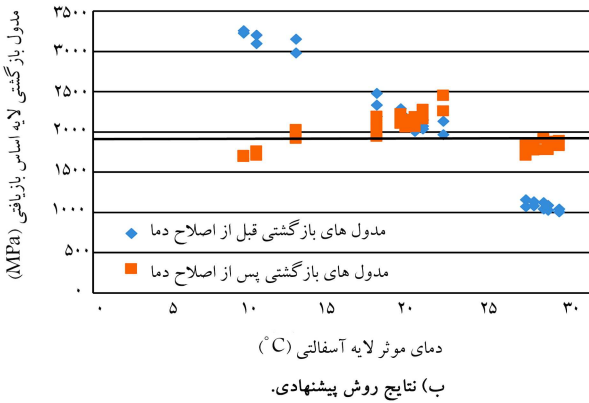
که در آن‌ها،  $E_{ref}$ ، مدول معادل دمای مرجع ( $MPa$ )،  $E_T$  مدول بازگشتی در دمای آزمایش  $FWD$  ( $MPa$ )،  $T$  دمای مؤثر آسفالت ( $^{\circ}C$ )، مقدار  $R^2$  در روابط ۱۶ و ۱۷ نشان می‌دهد که در پژوهش حاضر، رابطه‌ی بین مدول‌های بازگشتی لایه‌ی آسفالتی در برابر تغییرات دما در روش پیشنهادی، همبستگی بهتری نسبت به روش ELMOD داشته است. مطابق شکل ۶، میزان پراکندگی مدول‌های بازگشتی لایه‌ی آسفالتی پس از اعمال ضرایب اصلاح دمایی، کاهش یافته است. خط افقی مشخص شده در شکل‌های ۶ الف و ۶ ب، مقدار مدول در دمای مرجع را نشان می‌دهد. میزان پراکندگی مدول‌های بازگشتی اصلاح شده با پارامتر ضریب تغییرات



شکل ۸. مقایسه‌ی مدول‌های اصلاح شده و اصلاح نشده.

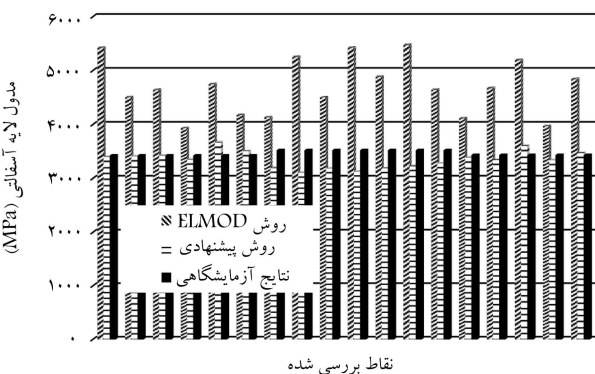


شکل ۸. تغییرات مدول بازگشتی لایه‌ی اساس باز یافتی در مقابل تغییرات دمای مؤثر آسفالت.



شکل ۱۰. مقایسه‌ی مدول های بازگشتی لایه‌ی اساس باز یافتی قبل از اصلاح دما و پس از آن.

شکل ۹. ضریب اصلاح دمایی مدول بازگشتی لایه‌ی اساس باز یافتی.



شکل ۱۱. مقایسه‌ی مدول های بازگشتی اصلاح شده با مدول های آزمایشگاهی برای لایه‌ی آسفالتی.

تغییرات دما مشاهده می‌شود. نسبت مدول های بازگشتی به دست آمده به روش ELMOD به مدول های بازگشتی به روش پیشنهادی به طور متوسط ۰/۸۵ است. مشابه نتیجه‌ی که برای لایه‌ی آسفالتی حاصل شد، با اینکه مدول بازگشتی محاسبه شده به روش پیشنهادی و روش ELMOD، در یک دمای مشخص با یکدیگر تفاوت دارند، اما شیب تغییرات مدول بازگشتی در برابر تغییرات دما در هر دو روش تقریباً یکسان است. به همین دلیل ضرایب اصلاح دمایی مدول بازگشتی لایه‌ی اساس، که از نتایج هر دو روش به دست آمده است، تقریباً با هم برابرند. شکل ۹، ضرایب اصلاح دمایی مدول بازگشتی لایه‌ی اساس باز یافتی را که به کمک هر دو روش آنالیز معکوس محاسبه شده است، مقایسه می‌کند.

روابط ۱۸ و ۱۹، به ترتیب مدل اصلاح دمایی مدول بازگشتی مربوط به نتایج به دست آمده از روش پیشنهادی و روش ELMOD هستند:

$$E_{base(ref)} = (0.2894e^{0.624 \times T})E_T, \quad R^2 = 0.93 \quad (18)$$

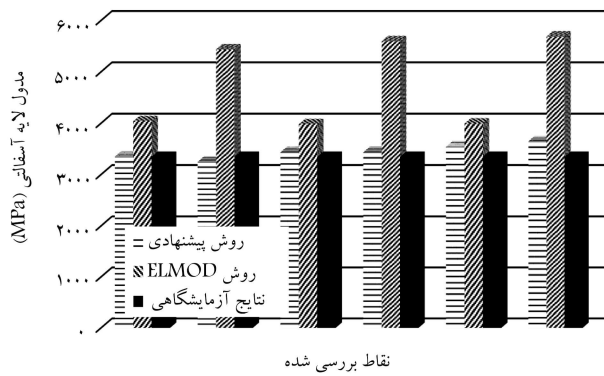
$$E_{base(ref)} = (0.3135e^{0.578 \times T})E_T, \quad R^2 = 0.81 \quad (19)$$

که در آن‌ها،  $E_{base(ref)}$ : مدول بازگشتی اصلاح شده‌ی لایه‌ی اساس باز یافتی (MPa)،  $E_T$ : مدول بازگشتی لایه‌ی اساس باز یافتی در دمای آزمایش  $FWD(MPa)$ ،  $T$ : دمای مؤثر لایه‌ی آسفالت (°C).

به کمک روابط ۱۸ و ۱۹، مدول های بازگشتی لایه‌ی اساس باز یافتی به مدول معادل دمای مرجع تبدیل شدند. در شکل های ۱۰ الف و ۱۰ ب، به ترتیب ضریب

تغییرات مدول های بازگشتی اصلاح نشده ۴۳ و ۳۶ درصد بوده است که این مقدار پس از اصلاح دمایی به کمک مدل های ارائه شده به ۱۵ و ۱۰ درصد کاهش یافته است. همچنین اعمال ضرایب اصلاح دمایی، مدول های بازگشتی را به مدول معادل دمای مرجع نزدیک کرده است. نتایج بررسی های اخیر نشان دهنده‌ی آن است که مقادیر مدول های بازگشتی لایه‌ی اساس باز یافتی نیز باید برای شرایط دمایی مختلف اصلاح شوند. در شکل ۱۱، مدول های بازگشتی اصلاح شده و اصلاح نشده‌ی هر دو روش با هم مقایسه شده است. خط افقی نشان دهنده‌ی مدول بازگشتی در دمای مرجع در آزمایش FWD است که به کمک آنالیز رگرسیون شکل ۸ تخمین زده شده است.





نقاط بررسی شده

شکل ۱۲. مقایسه‌ی مدول‌های بازگشتی لایه‌ی آسفالتی با مدول‌های آزمایشگاهی جهت اعتبارسنجی.

خطا برای مدول‌های بازگشتی اصلاح شده به روش ELMOD برابر ۳۷٪ به دست آمده است. مدول‌های محاسبه شده به روش ELMOD در دمای مرجع به طور متوسط ۱/۴ برابر مدول‌های آزمایشگاهی محاسبه شده و همین نسبت برای مدول‌های بازگشتی به روش پیشنهادی ۹۷٪ بوده است (جدول ۴).

از نتایج به دست آمده در ایستگاه ششم برای اعتبارسنجی مدل اصلاح دمایی لایه‌ی آسفالتی استفاده شده است. در ایستگاه ششم، ابتدا مدول بازگشتی به روش پیشنهادی و روش ELMOD محاسبه شد. مدول‌های بازگشتی محاسبه شده با استفاده از ضرایب اصلاح دمایی ارائه شده در مطالعه‌ی حاضر به مدول معادل دمای مرجع تبدیل شدند. در شکل ۱۲، نتایج مقایسه‌ی مدول‌های بازگشتی اصلاح شده با مدول‌های آزمایشگاهی در دمای مرجع مشاهده می‌شود که مطابق آن مدول‌های محاسبه شده به روش پیشنهادی نسبت به روش ELMOD پس از اصلاح دما به مدول‌های آزمایشگاهی به دست آمده از همان محل نزدیک تر بوده است.

#### ۲.۸. لایه‌ی اساس باز یافتی

مشابه نتیجه‌ی که برای لایه‌ی آسفالتی حاصل شد، مدول‌های بازگشتی لایه‌ی اساس باز یافتی به دست آمده از روش پیشنهادی نسبت به روش ELMOD، پس از اصلاح دما به نتایج آزمایشگاهی بسیار نزدیک تر هستند. به طوری که مقدار RMSE مدول‌های بازگشتی اصلاح شده به روش پیشنهادی با مدول‌های آزمایشگاهی در دمای مرجع برابر ۱۱/۵٪ محاسبه شده است، اما همین خطا برای مدول‌های بازگشتی اصلاح شده به روش ELMOD برابر ۲۶٪ به دست آمده است. در صورتی که مدول‌های بازگشتی اصلاح نشوند، این اختلاف برای روش ELMOD به ۴۷٪ و برای روش پیشنهادی به ۴۴٪ افزایش پیدا می‌کند. مقایسه‌ی این اختلاف قبل و پس از اصلاح دما، نشان دهنده‌ی اهمیت در نظر گرفتن اثر دما در لایه‌های دانه‌ی باز یافت شده با قیر است. همچنین نسبت مدول‌های بازگشتی به روش پیشنهادی پس از اصلاح دما به مدول‌های آزمایشگاهی نمونه‌ها در دمای مرجع به طور متوسط ۹۵٪ و همین نسبت برای مدول‌های بازگشتی به روش ELMOD، ۷۸٪ بوده است.

#### ۹. مقایسه‌ی ضرایب اصلاحی با مطالعات پیشین

در جدول ۴، چند مورد از مدل‌های اصلاح دمای مدول بازگشتی لایه‌ی آسفالتی در کنار مدل ارائه شده در پژوهش حاضر مشاهده می‌شوند. مدل ارائه شده با استفاده از

جدول ۲. نتایج مدول‌های آزمایشگاهی نمونه‌های برداشت شده.

شماره ایستگاه	دمای انجام آزمایش (°C)	مدول لایه (MPa)	
		آسفالتی	اساس باز یافتی
۱	۲۰	۳۳۴۵	۱۸۹۷
	۳۰	۱۷۲۹	۱۶۴۲
	۴۰	۱۱۳۷	۱۳۹۷
۲	۲۰	۳۴۲۵	۱۹۲۵
	۳۰	۱۶۰۹	۱۷۶۸
	۴۰	۱۱۶۵	۱۴۰۶
۳	۲۰	۳۵۲۴	۲۰۴۵
	۳۰	۱۷۱۲	۱۷۹۱
	۴۰	۱۲۱۴	۱۴۶۷
۵	۲۰	۳۴۳۵	۲۲۴۱
	۳۰	۱۷۴۵	۱۷۲۴
	۴۰	۱۰۲۵	۱۴۵۵

#### ۸. مقایسه‌ی مدول‌های بازگشتی اصلاح شده با مدول‌های آزمایشگاهی

برای محاسبه‌ی مدول ارتجاعی لایه‌های روسازی در آزمایشگاه، نمونه‌گیری در ایستگاه‌های ۱، ۲، ۳ و ۵ انجام شده است. مدول ارتجاعی لایه‌ی آسفالتی و اساس تثبیت شده در دماهای ۲۰، ۳۰ و ۴۰ درجه‌ی سانتی‌گراد محاسبه شدند. مطابق نتایج آزمایشگاهی ارائه شده در جدول ۲، افزایش دما باعث کاهش مدول‌های ارتجاعی شده است. همان‌طور که قبل‌تر اشاره شده است، علت این موضوع رفتار وابسته به دما در مصالح با چسبندگی قیری است. در مصالح با چسبندگی قیری، سختی لایه‌ها با افزایش دما کاهش می‌یابد و در نتیجه در اثر اعمال بار، تغییر شکل بیشتری در نمونه ایجاد و باعث کاهش مدول ارتجاعی می‌شود. از مقایسه‌ی نتایج جدول ۲ و با نتایج آنالیز معکوس این نتیجه حاصل شد که حساسیت دمایی مدول‌های بازگشتی در هر دو لایه‌ی آسفالتی و اساس باز یافتی، بیشتر از مدول‌های آزمایشگاهی است.

#### ۱.۸. لایه‌ی آسفالتی

در بخش حاضر، مدول‌های بازگشتی لایه‌ی آسفالتی به دست آمده از روش ELMOD و همچنین روش پیشنهادی با مقدار مدول‌های آزمایشگاهی نمونه‌های برداشت شده از همان محل مقایسه شدند. به این منظور ابتدا مدول‌های بازگشتی به دست آمده از روش ELMOD با استفاده از رابطه‌ی ۱۶ و مدول‌های بازگشتی ارائه شده با روش پیشنهادی با استفاده از رابطه‌ی ۱۷ اصلاح شدند. سپس مدول‌های بازگشتی اصلاح شده با مدول‌های آزمایشگاهی لایه‌ی آسفالتی در دمای ۲۰ درجه‌ی سانتی‌گراد مقایسه شدند. نتایج بررسی‌ها در جدول ۳ و شکل ۱۱ ارائه شده است. خطای محاسبه شده نشان می‌دهد مدول‌های بازگشتی به دست آمده از روش پیشنهادی نسبت به روش ELMOD، پس از اصلاح دما به نتایج آزمایشگاهی بسیار نزدیک تر هستند. به طوری که مقدار RMSE مدول‌های بازگشتی اصلاح شده به روش پیشنهادی با مدول‌های آزمایشگاهی در دمای مرجع، برابر ۶/۹٪ محاسبه شده است، اما همین

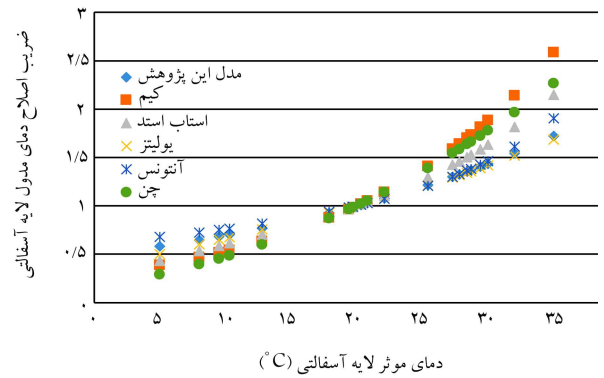
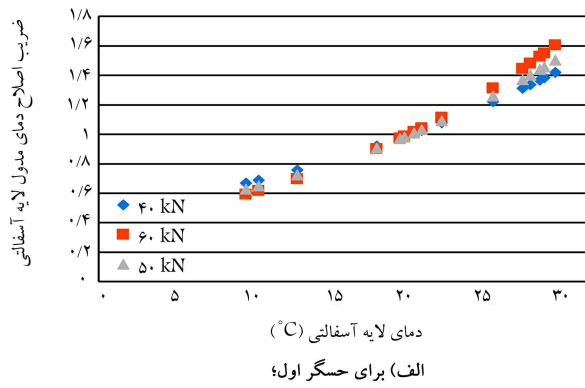
جدول ۳. مقایسه‌ی مدول‌های بازگشتی اصلاح شده با مدول‌های آزمایشگاهی برای لایه‌ی آسفالتی.

شماره ایستگاه	مدول آزمایشگاهی نمونه‌های برداشت شده از محل (MPa)	مدول‌های بازگشتی اصلاح شده (MPa)		نسبت مدول‌های بازگشتی به مدول‌های آزمایشگاهی	
		روش پیشنهادی نرم‌افزار ELMOD	روش پیشنهادی نرم‌افزار ELMOD	روش پیشنهادی نرم‌افزار ELMOD	روش پیشنهادی نرم‌افزار ELMOD
۲	۳۴۲۵	۳۴۰۱	۵۴۲۳	۰٫۹۹	۱٫۵۰
۲	۳۴۲۵	۳۴۱۱	۴۵۰۶	۱٫۰۰	۱٫۳۲
۲	۳۴۲۵	۳۴۲۴	۴۶۴۴	۱٫۰۰	۱٫۳۶
۲	۳۴۲۵	۳۳۴۹	۳۹۳۱	۰٫۹۸	۱٫۱۷
۲	۳۴۲۵	۳۶۶۹	۴۷۵۰	۱٫۰۷	۱٫۲۹
۲	۳۴۲۵	۳۵۰۸	۴۱۷۶	۱٫۰۲	۱٫۱۹
۳	۳۵۲۴	۳۱۹۳	۴۱۳۳	۰٫۹۱	۱٫۲۹
۳	۳۵۲۴	۳۱۰۱	۵۲۵۴	۰٫۸۸	۱٫۶۹
۳	۳۵۲۴	۳۱۸۴	۴۵۰۲	۰٫۹۰	۱٫۴۱
۳	۳۵۲۴	۳۱۲۴	۵۴۲۶	۰٫۸۹	۱٫۷۴
۳	۳۵۲۴	۳۱۸۷	۴۸۸۶	۰٫۹۰	۱٫۵۳
۳	۳۵۲۴	۳۲۲۷	۵۴۷۷	۰٫۹۲	۱٫۷۰
۳	۳۵۲۴	۳۲۲۸	۴۶۴۶	۰٫۹۳	۱٫۴۲
۵	۳۴۳۵	۳۳۸۷	۴۱۱۴	۰٫۹۹	۱٫۲۱
۵	۳۴۳۵	۳۳۴۳	۴۶۷۶	۰٫۹۷	۱٫۴۰
۵	۳۴۳۵	۳۶۰۶	۵۱۹۶	۱٫۰۵	۱٫۴۴
۵	۳۴۳۵	۳۳۴۰	۳۹۷۱	۰٫۹۷	۱٫۱۹
۵	۳۴۳۵	۳۴۷۵	۴۸۴۴	۱٫۰۱	۱٫۳۹
مقدار حداقل (MIN)	۳۴۲۵	۳۱۰۱	۳۹۳۱	۱٫۱۷	۱٫۱۷
مقدار حداکثر (MAX)	۳۵۲۴	۳۶۶۹	۵۴۷۷	۰٫۸۸	۱٫۷۴
مقدار متوسط (AVE)	۳۶۴۶	۳۳۴۵	۴۶۹۸	۰٫۹۷	۱٫۴۱
ضریب تغییرات (%CV)	۱٫۳	۴٫۶	۱۰٫۵	۵٫۶	۱۲
RMSE%		۶٫۹	۳۷		

جدول ۴. مدول‌های ارائه شده توسط پژوهشگران مختلف.

مدل ارائه شده	نام پژوهشگر و سال پژوهش
$\frac{E_T}{E_T} = 10^{0.2175(T-20)}$	Kim و همکاران (۱۹۹۵) [۱۱]
$\frac{E_T}{E_T} = \frac{1}{1-2.1 \log \frac{T}{T_1}}$	Stubstad و همکاران (۱۹۹۴) [۲۱]
$\frac{E_T}{E_T} = \frac{1}{3.177 - 1.673 \log T}$	Ullidtz (۱۹۸۷) [۲۲]
$\frac{E_T}{E_T} = \frac{1.635 - 0.417T}{1.635 - 0.417T}$	Antunes (۱۹۹۳) [۲۳]
$\frac{E_T}{E_T} = \frac{(1.8T+22)^{0.4462}}{(1.8T+22)^{0.4462}}$	Chen و همکاران (۲۰۰۱) [۱۷]
$\frac{E_T}{E_T} = 0.4829 e^{0.262T}$	مدل ارائه شده توسط پژوهش حاضر

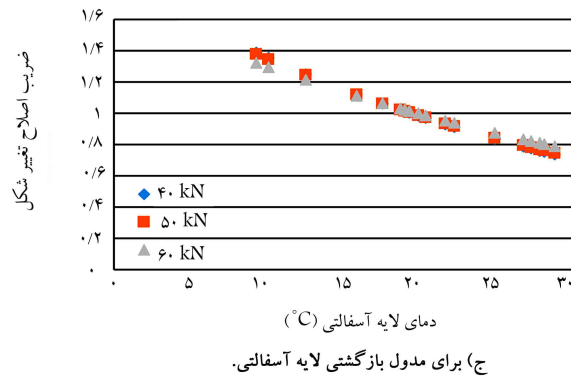
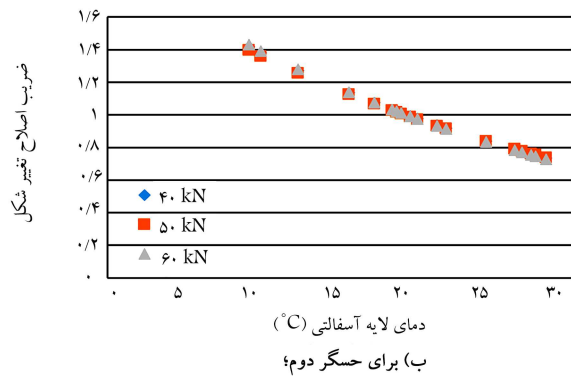
\* در تمامی روابط بالا  $E_T$  و  $E_T$  به ترتیب مدول بازگشتی در دمای مرجع و مدول بازگشتی در دمای آزمایش FWD است.  
 $T$  و  $T_1$  نیز به ترتیب دمای مرجع و دمای موثر لایه‌ی آسفالتی در آزمایش است.



شکل ۱۳. مقایسه‌ی ضرایب اصلاح دمای مدول آسفالتی به روش پژوهشگران مختلف.

نتایج به دست آمده با روش پیشنهادی برای مقایسه انتخاب شده است. زیرا مدول‌های بازگشتی به دست آمده با استفاده از روش پیشنهادی نسبت به روش ELMOD همبستگی بیشتری با دما داشته و پس از اصلاح دما نیز پراکندگی کمتری داشته و به مقادیر آزمایشگاهی نیز نزدیک‌تر بوده‌اند.

در شکل ۱۳، ضرایب اصلاح دمایی به دست آمده از مدل‌های جدول ۴ در دماهای مختلف مقایسه شده است. همان‌طور که قبلاً اشاره شد، به دلیل اینکه هر کدام از مدل‌ها برای شرایط محیطی همان منطقه توسعه داده شده‌اند، در یک دمای مشخص ضرایب به دست آمده از هر مدل متفاوت است. بهتر است در صورت امکان برای هر منطقه از ضرایب توسعه یافته از داده‌های همان منطقه و یا از مدلی استفاده شود که در شرایط محیطی مشابه توسعه یافته است. با توجه به شکل ۱۳، اختلاف ضرایب مدل‌ها در دماهای بالا و یا خیلی پایین بیشتر به چشم می‌خورد. بنابراین هر چه بازه‌ی دمایی مورد بررسی گسترده‌تر باشد، استفاده از مدلی مناسب برای شرایط محیطی همان منطقه ضروری به نظر می‌رسد. بیشینه‌ی اختلاف ضرایب مدل پژوهش حاضر با ضرایب سایر مدل‌ها در بازه‌ی دمایی مورد بررسی در پژوهش حاضر، ۳۴٪ به دست آمده است. برای مقایسه‌ی دقت مدل ارائه شده در پژوهش حاضر با سایر مدل‌ها، ابتدا مدول‌های بازگشتی به کمک ضرایب ارائه شده توسط مدل‌های مختلف اصلاح شدند. سپس اختلاف مدول‌های اصلاح شده با مدول معادل دمای مرجع در مطالعه‌ی موردی پژوهش حاضر (۳۳۱۷ مگاپاسکال) مقایسه شدند. مقدار RMSE بین مدول‌های بازگشتی اصلاح شده به کمک مدل پژوهش حاضر با مدول بازگشتی در دمای مرجع، ۴۶٪ بوده است، اما پارامتر مذکور برای مدول‌های اصلاح شده به کمک مدل‌های Kim و Chen، Stubstad، Ullidtz، Antunes، و Kim به ترتیب: ۶۱، ۹۶، ۹۶، ۱۸۷، ۱۸ درصد به دست آمدند.



شکل ۱۴. مقایسه‌ی ضرایب اصلاح تغییرشکل برای سطوح بارگذاری مختلف.

هم نزدیک هستند. بنابراین روابط ارائه شده برای اصلاح تغییرشکل حسگرها و مدول‌های بازگشتی که برای نیروی ۴۰ کیلو نیوتن محاسبه شدند، با تقریب بسیار خوبی برای سایر نیروهای میدانی نیز معتبر است. به عبارت دیگر، رابطه‌ی اصلاح دمایی تغییرشکل و مدول بازگشتی وابستگی چندانی به میزان نیروی اعمالی به سطح روسازی در آزمایش میدانی ندارد. در مطالعه‌ی کیم و همکارانش برای بررسی اثر سطح نیرو در ضرایب اصلاح دما، نمودار نیمه لگاریتمی تغییرشکل مرکزی در ۴ سطح نیروی ۶، ۹، ۱۲ و ۱۵ (کیلو نیوتن) در مقابل تغییرات دمای مؤثر لایه‌ی آسفالتی رسم شده است. در هر ۴ سطح بارگذاری ذکر شده، روند تغییرات تغییرشکل - دما مشابه بوده است.<sup>[۱۱]</sup> در صورتی که رابطه‌ی خطی بین نیروی اعمالی و تغییرشکل مرکزی برقرار باشد، این نتیجه منطقی خواهد بود.<sup>[۱۲]</sup> بنابراین در صورتی که رابطه‌ی مذکور برقرار نباشد، امکان تعمیم مدل‌ها به سایر سطوح تنش نیز امکان پذیر نخواهد بود. شکل ۱۵، نشان دهنده‌ی تغییرات افت و خیز مرکزی با تغییرات نیروی وارد به روسازی در پژوهش حاضر است که با همبستگی بسیار بالایی به صورت خطی تغییر می‌کند.

## ۱۰. مقایسه‌ی ضرایب اصلاح دمایی در سطوح نیروی مختلف

روابط اصلاح دمایی تغییرشکل و مدول بازگشتی ارائه شده در قسمت‌های قبل، حاصل آنالیز نتایج افت و خیزهای به دست آمده از نیروی استاندارد ۴۰ کیلو نیوتنی به سطح روسازی بوده است. مطابق روش ذکر شده، ضرایب اصلاح دمایی برای تغییرشکل حسگرهای اول و دوم و مدول‌های بازگشتی برای نیروهای ۵۰ و ۶۰ کیلو نیوتن به سطح روسازی محاسبه شدند. مطابق شکل ۱۴، ضرایب اصلاح تغییرشکل و همچنین مدول‌های بازگشتی در هر سه نیروی ارائه شده بسیار به

شرایط روسازی بازیاقتی منطقه ارائه و با پژوهش‌های پیشین مقایسه شدند. براساس بررسی‌های انجام شده در پژوهش حاضر، این نتایج به دست آمده است:

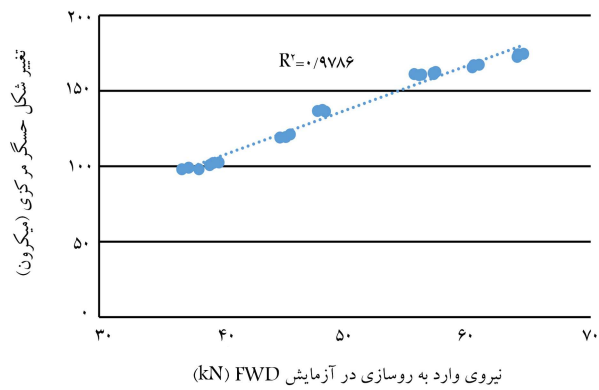
۱. بررسی اثر دما در تغییرشکل‌ها نشان داده است که تغییرشکل حسگرهای اول و دوم به شدت تحت تأثیر دماست. میزان RMSE بین تغییرشکل‌های حسگرهای اول و دوم با تغییرشکل میدانی معادل دمای مرجع قبل از اصلاح دما به ترتیب ۲۱ و ۱۹ درصد بوده است، که پس از اعمال ضرایب پیشنهادی این اختلاف به ترتیب به ۵٫۸ و ۶٫۸ درصد رسید.

۲. نتایج پژوهش حاضر نشان داد که در روسازی‌های بازیاقت شده با چسبیده‌ی قیری، اصلاح دمایی نتایج لایه‌ی اساس بازیاقتی نیز مانند لایه‌ی آسفالتی ضروری است.

۳. برای هر دو لایه‌ی آسفالتی و اساس بازیاقتی، مدول‌های بازگشتی محاسبه شده به روش پیشنهادی نسبت به روش ELMOD به نتایج آزمایشگاهی نزدیک‌تر بوده‌اند.

۴. استفاده از ضرایب اصلاح دمایی مدول بازگشتی ارائه شده در پژوهش حاضر نسبت به ضرایب مطالعات پیشین، نتایج آزمایش FWD را به داده‌های آزمایشگاهی نزدیک‌تر می‌کند.

۵. اگر رابطه‌ی خطی بین نیروی وارد به روسازی و تغییرشکل مرکزی برقرار باشد، امکان تعمیم مدل اصلاح دمایی که از نتایج آزمایش FWD در یک سطح تنش مشخص به دست آمده است، به سایر سطوح تنش وجود دارد.



شکل ۱۵. تغییرات افت و خیزهای ثبت شده برای حسگر مرکزی در مقابل نیروهای وارده به روسازی.

## ۱۱. نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر، مدول لایه‌های روسازی از دو روش متفاوت محاسبه شدند. در روش اول، مدول‌های بازگشتی آزمایش FWD به کمک آنالیز معکوس محاسبه شدند. در روش دوم، مدول‌های ارتجاعی نمونه‌های مغزه‌گیری شده از محل به کمک آزمایش کشش غیرمستقیم به دست آمدند. حساسیت دمایی مدول‌های به دست آمده از هر دو روش ارزیابی و با هم مقایسه شدند. مدل‌های اصلاح دمایی با توجه به

## پانوشته‌ها

1. Ji
2. Kim
3. Nazzal and Mohammad
4. Basic

## منابع (References)

1. Goktepe, A.B., Agar, E. and Lav, A.H. "Advances in backcalculating the mechanical properties of flexible pavements", *Advances in Engineering Software*, **37**(7), pp. 421-431 (2006).
2. Papaginnakis, A.T. and Masad, E.A. *Pavement Design and Materials*, John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey, USA (2007).
3. Li, M. and Wang, H. "Development of ANN-GA program for backcalculation of pavement moduli under FWD testing with viscoelastic and nonlinear parameters", *International Journal of Pavement Engineering*, **20**(4), pp.490-498 (2019).
4. Gedafa, D.S., Hossain, M. and Romanoschi, S.A. "Perpetual pavement temperature prediction model", *Road Materials and Pavement Design*, **15**(1), pp. 55-65 (2013).
5. Zhou, L. "Temperature correction factor for pavement moduli backcalculated from falling weight deflectometer test", *14th COTA International Conference of Transportation Professionals, Changsha, China* (2014).
6. Park, S.W. and Kim, Y.R. "Temperature correction of backcalculated moduli and deflections using linear viscoelasticity and time-temperature Superposition", *Transportation Research Board*, **1570**(1), pp. 108-117 (1997).
7. Xiong, H., Zhang, Y. and Wang, L. "Temperature effect on deflection prediction of asphalt pavement with drainage layer", *Journal of Materials in Civil Engineering*, **29**(4), 04016261 (2017).
8. Ji, Y., Siddiki, N., Nantung, T. and Kim, D. "Effect of moisture variation on subgrade and base material MR design values and its implementation in MEPDG", Proc. of Transportation Research Board 91st Annual Meeting Transportation Research Board, Washington, DC. USA (2012).
9. Akbarzadeh, H., Bayat, A. and Soleymani, H. "Analytical review of the HMA temperature correction factors from laboratory and falling weight deflectometer tests", *International Journal of Pavement Research and Technology*, **5**(1), pp. 30-39 (2011).
10. Garsia, A.R. and Castro, M. "Analysis of the temperature influence on flexible pavement deflection", *Construction and Building Materials*, **25**(8), pp. 3530-3539 (2011).
11. Kim, Y.R., Hibbs, B.O. and Lee, Y.C. "Temperature correction of deflections and backcalculated asphalt concrete moduli", *Transportation Research Board*, **1473**, pp. 55-62 (1995).
12. Chang, J.R., Lin, J.D., Chung, D.C. and et al. "Evaluating the structural strength of flexible pavement In

- Taiwan using the falling weight deflectometer”, *International Journal Of Pavement Engineering*, **3**(3), pp. 131-141 (2002).
13. Mamlouk, M.S., Houston, W.K., Houston, S.L. and et al. “Rational characterization of pavement structures using deflection analysis”, Report No. FHWA-AZ87-254, Arizona Dept. of Transp., Phoenix, Tempe. Arizona (1988).
  14. Nazzal, D.M. and Mohammad, N.L. “Estimation of resilient modulus of subgrade soils using falling weight deflectomete”, *Journal of the Transportation Research Board*, **2186**(1), pp. 1-10. (2010).
  15. Mateos, A. and Soares, B.J. “Characterization of the stiffness of unbound materials for pavement design: Do we follow the right approach?”, *Journal of Transportation Engineering*, **140**(4):04014001 (2014).
  16. Von Quintus, H.R. and Killingsworth, B. “Analyses relating to pavement material characterizations and their effects on pavement performance”, No. FHWA-RD-97-085, McLean, VA. USA (1998).
  17. Chen, D.H., Bilyeu, J., Lin, H.H. and et al. “Temperature Correction on Falling Weight Deflectometer Measurements”, *Transportation Research Board*, **1716**(1), pp. 30-39 (2000).
  18. Ng, K., Henrichs, Z., Ksaibati, K. and et al. “Measurement of the resilient modulus of subgrade materials for mechanistic-empirical pavement design guide”, Road Material and Pavement Design (2017).
  19. Appea, A.K. “Validation of FWD testing results at the virginia smart road”, Theoretically and by Instrument Responses, Blacksburg, Virginia, USA (2003).
  20. AASHTO Guide for Design of Pavement Structures, AASHTO, Washington, D.C., USA. (1993).
  21. Stubstad, R.N., Baltzer, S., Lukanen, E.O. and et al. “Prediction of AC mat temperature for routine load/deflection measurements”, *4<sup>th</sup> International Conference of Bearing Capacity of Roads and Airfields*, Minneapolis, USA (1994).
  22. Ullidtz, P. “Pavement Analysis”, Elsevier, Amsterdam, the Netherlands (1987).
  23. Antunes, M.L. “Pavement bearing capacity evaluation using dynamic nondestructive tests”, Ph.D. Thesis, IST, Lisbon, Portugal (1993) .