



## دقت پیش بینی مدول الاستیسیته با استفاده از روش محاسبات معکوس و مدل های مبتنی بر پارامترهای مستقل در مقایسه با نتایج آزمایشگاهی

نرگس خردمندی، امیر مدرس<sup>۱\*</sup>

دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، بابل، ایران

### تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۹ شهریورماه ۱۳۹۶  
بازنگری: ۲۱ آبان ماه ۱۳۹۶  
پذیرش: ۲۱ آذر ماه ۱۳۹۶  
ارائه آنلاین: ۲۶ آذر ماه ۱۳۹۶

### کلمات کلیدی:

افت و خیزسنج ضربه ای  
مدول لایه های روسازی  
محاسبات بازگشتی  
پارامترهای کاسه ی انحنا  
مدول سطح.

**چکیده:** هدف از این پژوهش ارائه ی روش های جدید جهت تعیین مدول الاستیسیته ی لایه های روسازی و بررسی دقت این روش ها در تخمین مدول، از طریق مقایسه با مدول های آزمایشگاهی می باشد. به این منظور، بر روی مقاطع متعددی از محور شوش-اندیمشک و سمنان-دامغان آزمایش افت و خیزسنج ضربه ای انجام شد. در همان نقاط، از لایه های روسازی مغزه گیری شده و در آزمایشگاه، آزمایش های کشش غیرمستقیم با بارگذاری تکراری و سه محوری دینامیکی جهت تعیین مدول لایه های آسفالت و اساس و بسترانجام گرفت. داده های آزمایش افت و خیزسنج ضربه ای توسط نرم افزار ELMOD6.0 تحلیل شد و در کنار آن، یک روش جدید برای محاسبات بازگشتی کدنویسی و پیشنهاد گردید. مقایسه ی نتایج نرم افزار ELMOD و روش پیشنهادی با مقادیر مدول الاستیسیته ی آزمایشگاهی نشان داد که دقت پیش بینی مدول توسط روش پیشنهادی بیشتر از نرم افزار ELMOD است. در این پژوهش علاوه بر ارائه روش پیشنهادی مبتنی بر محاسبات بازگشتی، مدل هایی ارائه شده اند که مدول لایه های روسازی را سریع و با دقت بالا تخمین می زنند. با استفاده از این مدل ها و بدون نیاز به محاسبات بازگشتی و دشواری های الگوریتم سعی و خطا می توان مدول آسفالت، اساس و بسترا را پیش بینی نمود. در این مدل ها با استفاده از پارامترهایی همچون ضخامت لایه ها، پارامترهای کاسه ی انحنا و بار وارده در آزمایش افت و خیزسنج ضربه ای، مدول لایه های روسازی با دقت بالا قابل پیش بینی اند.

### ۱- مقدمه

در زمان و هزینه و عدم اختلال در ترافیک منطقه اشاره نمود [۴]. به طور کلی دوروش برای تعیین پارامترهای معرف وضعیت سازه ای روسازی به کمک آزمایش غیر مخرب FWD وجود دارد. روش اول شامل ارائه مدل هایی مبتنی بر پارامترهای به دست آمده از خروجی های FWD (به طور مثال پارامترهای کاسه ی انحنا) و روش دوم مبتنی بر محاسبات بازگشتی است. در پژوهش های مختلفی به روش اول پرداخته شده است و مدل های زیادی ارائه شده اند که با استفاده از پارامترهای کاسه ی انحنا و خروجی های FWD به صورت مستقیم، وضعیت سازه ای روسازی را تعریف می کنند. به طور مثال به کمک داده های FWD، شاخص هایی نظیر SCI<sup>۲</sup>، SHI<sup>۳</sup> و MSI<sup>۴</sup> قابل تخمین است که با استفاده از آن ها می توان در مورد رویکردهای تعمیر و نگهداری تصمیم گیری های لازم را انجام داد. SCI یا شاخص وضعیت سازه ای روسازی به صورت نسبت عدد سازه ای مؤثر به عدد سازه ای مورد نیاز تعریف می شود. کاووسی و همکاران<sup>۵</sup> در سال ۲۰۱۷ به کمک اطلاعات افت و خیز دو حسگر مرکزی

اساس مدیریت روسازی و هرگونه عملیات تعمیر و نگهداری، ارزیابی وضعیت موجود می باشد. یکی از مناسب ترین روش ها برای ارزیابی وضعیت راه ها بهره گرفتن از آزمایش های غیر مخرب است. امروزه به صورت گسترده از فناوری های غیر مخرب به عنوان ابزاری مهم برای کنترل کیفیت روسازی در حال سرویس استفاده می شود [۱]. روش افت و خیزسنج ضربه ای (FWD) یکی از کاربردی ترین ابزارهای آزمایش غیر مخرب روسازی می باشد که روشی بسیار رایج و گسترده در بین سایر آزمایش های غیر مخرب است [۲]. در آزمایش FWD باری معادل بار چرخ وسایل نقلیه به روسازی وارد شده و تغییر شکل ها در فواصل مختلف از محل بارگذاری توسط ۷ حسگر (یا بیشتر) اندازه گیری می شود. محدوده ی بارگذاری برای دستگاه FWD از نوع سنگین آن، بین ۳۰ تا ۲۴۰ کیلو نیوتون می باشد [۳]. از جمله مزایای FWD می توان به کوتاه بودن زمان آزمایش، توانایی پوشش نقاط بیشتری از مقاطع، عدم دست خوردگی مصالح، عدم دخالت نیروی انسانی، صرفه جویی

2 Structural Condition Index

3 Structural Health Index

4 Modified Structural Index

5 Kavussi et al

1 Falling Weight Deflectometer (FWD)

نویسنده عهده دار مکاتبات: a.modarres@nit.ac.ir

غیرخطی و الگوریتم ژنتیک از این تحلیل بهره می‌گیرند. روش پایگاه اطلاعاتی شامل داده‌های نتایج یک مجموعه تحلیل‌های از پیش انجام‌شده برای انواع روسازی‌ها است. این روش خود به دودسته تقسیم می‌شوند. دسته‌ی اول، استفاده از پایگاه اطلاعاتی هم‌زمان در تحلیل است که در آن افت‌وخیزهای اندازه‌گیری شده را با تحلیل‌های از پیش انجام‌شده مقایسه کرده و بهترین تطابق را با در نظر گرفتن بعضی از محدودیت‌ها به دست آورده به‌عنوان حل مسئله در نظر می‌گیرد. دسته‌ی دوم برپایه‌ی استفاده از پایگاه اطلاعاتی برای یافتن روابطی میان افت‌وخیزها و مدول لایه‌های روسازی است [۱۳]. در محاسبات بازگشتی با شبکه‌های عصبی مصنوعی روش پایگاه اطلاعاتی بهره گرفته می‌شود. در سال‌های اخیر استفاده از روش محاسبات نرم از جمله شبکه‌ی عصبی برای تحلیل روسازی بسیار رایج شده است [۱۴ و ۱۵]. برای بهبود توانایی روش محاسبات نرم، الگوریتم ژنتیک نیز برکنار شبکه عصبی به کار گرفته شده است. لی و وانگ در سال ۲۰۱۷ در پژوهش خود با ترکیب روش شبکه‌ی عصبی و الگوریتم ژنتیک، فرآیند آنالیز معکوس را توسعه بخشیده‌اند [۱۱]. نرم‌افزارهای متعددی در زمینه‌ی آنالیز معکوس وجود دارند که پژوهشگران در مطالعات مختلف از آن‌ها استفاده نموده‌اند. به‌عنوان مثال می‌توان به نرم‌افزارهای BAKFAA، MODULUS و ELMOD و غیره اشاره نمود [۱۶ و ۱۷]. اخیراً از نرم‌افزارهای دینامیکی جهت تحلیل داده‌های FWD استفاده می‌شود تا اثر وابسته به زمان در افت‌وخیزها در نظر گرفته شود. به‌عنوان مثال لونبرگ و مادسن در سال ۲۰۱۷ نتایج آزمایش FWD را به ازای دامنه‌های بارگذاری مختلف جمع‌آوری نموده و رفتار دینامیکی، وابسته به زمان و شبه غیرخطی مصالح را بررسی نمودند [۱۲].

در همین خصوص، در این پژوهش یک روش محاسبه‌ی معکوس جدید پیشنهاد شده است. مزیت روش پیشنهادی در مقایسه با روش‌های ذکر شده این است که این متد با استفاده از یک الگوریتم ساده، در زمان‌های کمتری نسبت به روش‌های دیگر، مدول بازگشتی لایه‌های روسازی را تخمین می‌زند.

تخمین مدول الاستیسیته از طریق محاسبات بازگشتی مستلزم انتخاب الگوریتم و نرم‌افزار مناسب برای آنالیز معکوس و یادگیری و به‌کارگیری نرم‌افزار می‌باشد. طبیعتاً هر یک از این مراحل زمان‌بر است. بنابراین اگر روابطی وجود داشته باشد که مدول لایه‌های روسازی را با دقت بالا و بدون نیاز به محاسبات بازگشتی و سریع تخمین بزند، دشواری‌های استفاده از الگوریتم سعی و خطا در نرم‌افزار را به حداقل می‌رساند. در بخش دوم پژوهش، مدل‌های مبتنی بر پارامترهای

و حسگر در فاصله‌ی ۹۰ سانتی‌متری از محل بارگذاری، مدلی را ارائه کردند که عدد سازه‌ای مؤثر روسازی را پیش‌بینی می‌کند [۵]. هم‌چنین در تحقیق مشابه‌ای در سال ۲۰۱۲، اسنور و هوراک<sup>۱</sup> نیز برای پیش‌بینی عدد سازه‌ای مؤثر، مدلی بر مبنای پارامترهای کاسه‌ی انحنای پیشنهاد داده‌اند [۶]. با وجود این مدل‌ها، تخمین پارامتر SCI مستقیماً از طریق خروجی‌های FWD امکان‌پذیر شده است [۷]. در همین راستا پژوهش دیگری در سال ۲۰۱۶ انجام شده است که به کمک آزمایش FWD، پارامتر SHI یا شاخص سلامت سازه‌ای روسازی قابل محاسبه می‌باشد. این شاخص یکپارچگی سازه‌ی روسازی را برآورد می‌کند و مقدار آن از صفر تا ۱۰۰ متغیر است [۸]. هم‌چنین برای همکاران<sup>۲</sup> در سال ۲۰۱۳ پارامتر MSI یا شاخص سازه‌ای اصلاح‌شده را تعریف کردند. این شاخص با نرخ خرابی روسازی همبستگی دارد. در مدل ارائه‌شده در این پژوهش با داشتن ضخامت روسازی، میزان بار وارده، مدول برجهنگی بستر و اندازه‌گیری‌های FWD در یکسری فواصل مشخص از محل بارگذاری، می‌توان شاخص MSI را محاسبه نمود [۹]. علاوه بر شاخص‌های ارزیابی روسازی، مدل‌های متعددی توسط محققین مختلف ارائه شده که با استفاده از آن‌ها می‌توان مدول الاستیسیته‌ی لایه‌های مختلف روسازی را با استفاده از پارامترهای کاسه‌ی انحنای برآورد نمود [۱۰]. روش دوم بر پایه‌ی محاسبات بازگشتی است که به‌صورت گسترده‌تر استفاده شده است. محاسبات بازگشتی یک فرآیند تکراری است که بر پایه‌ی مدول‌های فرضی اولیه و الگوریتم سعی و خطا می‌باشد و با استفاده از نرم‌افزارهای آنالیز معکوس انجام می‌گیرد [۱۱]. نرم‌افزارهای آنالیز معکوس در میزان پیچیدگی، الگوریتم، فرضیات و ساده‌سازی‌ها با یکدیگر متفاوت‌اند. معمول‌ترین روشی که هنوز هم به‌صورت گسترده رواج دارد بر پایه‌ی استفاده از مقادیر ماکزیمم افت‌وخیز که تأثیرات اینرسی و رفتار وابسته به زمان مصالح را نادیده گرفته و به رفتار خطی و همگن مصالح محدود می‌شود [۱۲].

تاکنون روش‌های مختلفی همچون روش‌های بازگشتی و جست‌وجو در پایگاه داده‌ها برای انجام محاسبه معکوس بکار گرفته شده‌اند. روش‌های بازگشتی از روند تکرار عددی برای حل مسئله کمک می‌گیرند. بدین ترتیب که تغییر شکل‌های روسازی در نقاط متناظر با محل قرارگیری حسگرها، با توجه به محدوده مدول‌های فرضی هر لایه محاسبه می‌شود. سپس این افت‌وخیزهای محاسبه‌شده با افت‌وخیزهای اندازه‌گیری شده مقایسه شده و مدول‌های هر لایه در یک فرآیند تکرار آن قدر تصحیح می‌شوند تا بین مقدار افت‌وخیزهای محاسبه‌شده و اندازه‌گیری شده نزدیکی دلخواه حاصل شود. روش‌های محاسبات بازگشتی بهینه‌سازی

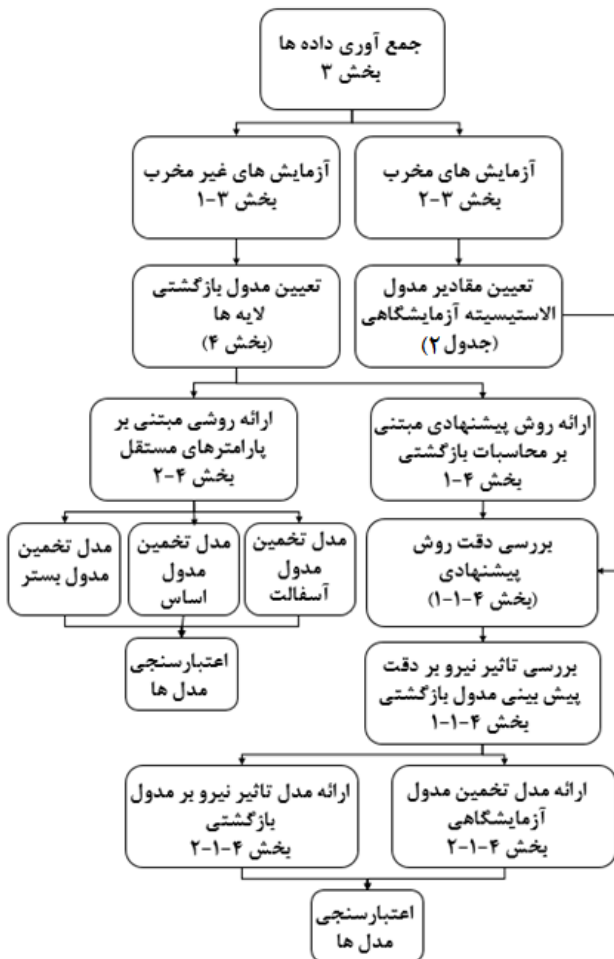
3 Li and Wang

4 Levenberg and Madsen

1 Schnoor and Horak

2 Bryce et al.

برای RMSE، دقت مدل‌ها بررسی گشت. روش دوم برای تخمین مدول لایه‌های روسازی، مبتنی بر استفاده از پارامترهای کاسه‌ی انحنای و خروجی‌های FWD می‌باشد. در این روش بدون نیاز به محاسبه‌ی معکوس می‌توان مدول لایه‌های مختلف را پیش‌بینی نمود. با استفاده از این روش، سه مدل برای تخمین مدول لایه‌های آسفالت و اساس و بستر ارائه شده‌اند. در انتها نیز میزان دقت این روش در تخمین مدول‌ها از طریق اعتبارسنجی بررسی شد.



شکل ۱. فلوجارت مراحل پژوهش  
Flowchart of research methodology

### ۳- آزمایش‌های میدانی و جمع‌آوری داده‌ها

#### ۳-۱- آزمایش‌های غیر مغرب

##### FWD - ۳-۱-۱

دستگاه FWD استفاده شده در این پژوهش از نوع دایناتست ۸۰۰۰ می‌باشد که با اعمال تنش‌ی مشابه بار چرخ محور ۸/۲ تنی به روسازی در مدت زمان ۲۵ الی ۳۰ میلی‌ثانیه، مقدار افت و خیز را به کمک ۹ حسگر اندازه‌گیری می‌کند. آرایش این حسگرها به ترتیب برابر ۰-۲۰-۳۰-۴۵-۶۰-۹۰-۱۲۰-۱۵۰-۱۸۰ سانتی‌متری از مرکز بارگذاری می‌باشد. شعاع

مستقل ارائه شدند که مدول لایه‌های روسازی را بدون استفاده از محاسبات بازگشتی و به صورت مستقیم با استفاده از خروجی‌های FWD پیش‌بینی می‌کند. در مطالعات گذشته نیز به این مورد پرداخته شده است، اما در هیچ‌یک از مدل‌های ارائه شده تأثیر تنش به عنوان یک پارامتر مستقل بر مدول بازگشتی لایه‌های روسازی دیده نشده است. از طرفی به دست آوردن مدول الاستیسیته‌ی اساس و بستر با استفاده از داده‌های FWD و در قالب یک مدل مبتنی بر پارامترهای مستقل کار بسیار پیچیده‌ای است. زیرا به طور دقیق نمی‌توان گفت که تغییر شکل کدام حسگر، منعکس‌کننده‌ی رفتار لایه اساس و بستر است [۱۸]. در این پژوهش ضمن در نظر گرفتن تأثیر پارامتر تنش، سه مدل مجزا برای تخمین مدول لایه‌های آسفالت، اساس و بستر ارائه شده است.

### ۲- الگوسازی نظری

مراحل تحقیق مطابق با فلوجارت ارائه شده در شکل ۱ می‌باشد. پس از بررسی و مطالعه پژوهش‌های گذشته در مرحله‌ی دوم اطلاعات میدانی و آزمایشگاهی جمع‌آوری شد. به این منظور آزمایش‌های میدانی FWD و رادار نفوذپذیر زمین (GPR) و بررسی‌های آزمایشگاهی شامل کشش غیرمستقیم با بارگذاری تکراری و سه محوری دینامیکی جهت تعیین مدول آسفالت، اساس و بستر موجود در محورهای شوش - اندیمشک و سمنان - دامغان انجام شد.

برای تخمین مدول الاستیسیته‌ی لایه‌های روسازی از دو روش بهره گرفته شده است. روش اول، محاسبات معکوس می‌باشد که در اولین گام از نرم‌افزار ELMOD جهت تحلیل داده‌های FWD استفاده شد. سپس روش پیشنهادی جدیدی برای محاسبه معکوس کد نویسی شده و ارائه گردید. دقت دو روش پیشنهادی و نرم‌افزار ELMOD در تخمین مدول الاستیسیته‌ی لایه‌ها، از طریق مقایسه با نتایج آزمایشگاهی بررسی شد. هم‌چنین در این بخش مدول‌هایی ارائه شدند که به کمک آن و با داشتن مدول بازگشتی، مدول‌های آزمایشگاهی قابل پیش‌بینی است. از آنجایی که نیروی وارد در آزمایش FWD، یکی از اساسی‌ترین پارامترهای این مدل می‌باشد، تأثیر نیروی وارد در آزمایش FWD بر دقت تخمین مدول بازگشتی نیز بررسی شد. دقت مدل‌های ذکر شده نیز از طریق اعتبارسنجی بررسی گردید. از تعداد مشخصی از کل مقاطع مورد آزمایش، فقط جهت اعتبارسنجی مدول‌ها استفاده شده است. با استفاده از پارامتر آماری مجذور میانگین مربع خطاها (RMSE)<sup>۲</sup>، میزان خطای بین داده‌های اعتبارسنجی و خروجی‌های مدل مورد نظر تعیین شد. با در نظرگیری حدود مجاز

1 Ground Penetrating Radar

2 Root Mean Square Error

مطابق جدول درمجموع از اطلاعات ۲۰ ایستگاه در محورهای شوش - اندیمشک و سمنان - دامغان برای انجام آزمایش‌های میدانی و آزمایشگاهی استفاده شده است. تعداد مشخصی از کل این ۲۰ مقطع، فقط جهت اعتبارسنجی مدل‌ها استفاده شده است. از محدودیت‌های این تعداد ایستگاه می‌توان به نادیده گرفتن اثر ضخامت لایه‌های روسازی و جنس مصالح اشاره نمود. زیرا محدوددهی تغییرات ضخامت لایه‌ها، به خصوص برای لایه‌ی اساس در این محورها خیلی محسوس نمی‌باشد. باین حال این ۲۰ مقطع به‌گونه‌ای انتخاب شدند تا طیف وسیع‌تری از ضخامت لایه‌های آسفالت و اساس را در برگیرند. هم‌چنین در طول کیلومترهای مختلف در هر یک از محورهای شوش - اندیمشک و سمنان - دامغان، تغییرات عمده‌ای در جنس مصالح لایه‌های روسازی دیده نشده است. بنابراین در این پژوهش، از تأثیر جنس مصالح در تحلیل نتایج نیز به‌ناچار چشم‌پوشی شده است.

صفحه بارگذاری در این آزمایش ۱۵۰ میلی‌متر است. هم‌چنین این دستگاه قادر است دمای هوا و دمای سطح آسفالت را به‌طور خودکار اندازه‌گیری و ثبت نماید.

### ۲-۱-۳-GPR

از دستگاه GPR به‌منظور تعیین ضخامت لایه‌های روسازی موجود استفاده شده است. رادار نفوذپذیر زمین، روش غیر مخربی است که با نفوذ امواج الکترومغناطیس، وضعیت داخلی روسازی را ارزیابی می‌کند. این دستگاه قادر است ضخامت لایه‌های روسازی را بسیار سریع و مقرون به صرفه از نظر مالی اندازه‌گیری کند. آزمایش رادار نفوذپذیر زمین طبق استاندارد ASTM D 6432-11 انجام شده است [۱۹].

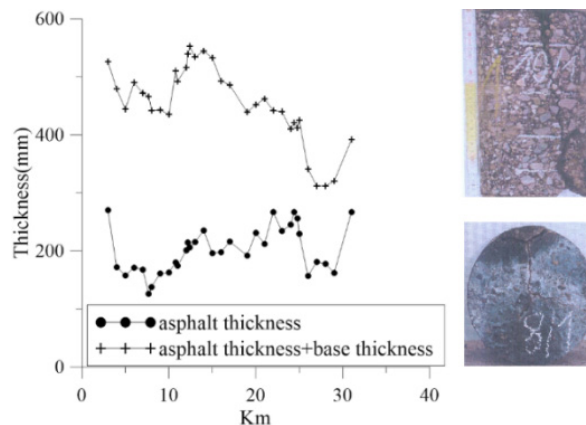
مشخصات مقاطع آزمایش، شامل نام ایستگاه، کیلومتر و ضخامت لایه‌های روسازی به تفکیک در جدول ۱ ارائه شده است.

### جدول ۱. مشخصات مقاطع آزمایش Specifications of test sections

نام ایستگاه	محور مورد نظر	کیلومتر	ضخامت (میلی‌متر)		نام ایستگاه	محور مورد نظر	کیلومتر	ضخامت (میلی‌متر)	
			آسفالت	اساس				آسفالت	اساس
1-SecA	شوش-اندیمشک	۱/۲	۲۰۷	۲۶۲	11-SecA	شوش-اندیمشک	۸/۲	۱۷۴	۲۴۳
2-SecA	شوش-اندیمشک	۳/۴	۱۴۴	۳۳۱	12-SecA	شوش-اندیمشک	۸/۸	۱۴۵	۳۱۰
3-SecA	شوش-اندیمشک	۴/۴	۱۴۷	۳۱۸	13-SecA	شوش-اندیمشک	۱۰/۴	۱۵۳	۲۴۱
4-SecA	شوش-اندیمشک	۴/۶	۱۳۴	۳۳۵	14-SecA	شوش-اندیمشک	۱۰/۸	۱۸۰	۳۳۰
5-SecA	شوش-اندیمشک	۵/۴	۱۳۸	۲۹۹	15-SecA	شوش-اندیمشک	۳۱/۸	۲۵۴	۱۳۵
6-SecA	شوش-اندیمشک	۶	۱۷۱	۳۱۹	1-SecB	دامغان-سمنان	۴۹/۳	۱۳۴	۱۷۱
7-SecA	شوش-اندیمشک	۶/۲	۱۴۹	۲۹۷	2-SecB	دامغان-سمنان	۵۵/۸	۱۴۳	۱۷۴
8-SecA	شوش-اندیمشک	۶/۶	۱۳۷	۳۴۴	3-SecB	دامغان-سمنان	۶۱/۲	۱۳۹	۱۶۷
9-SecA	شوش-اندیمشک	۷	۱۶۸	۳۰۴	1-SecC	سمنان-دامغان	۸/۲	۱۸۵	۲۲۱
10-SecA	شوش-اندیمشک	۷/۷	۱۲۶	۳۴۰	2-SecC	سمنان-دامغان	۹/۳	۱۸۲	۲۱۴

ضخامت لایه‌های موجود در چند نقطه با مغزه‌گیری مقایسه شد. نمونه از مغزه‌گیری در شکل ۲ آورده شده است.

نمونه‌ای از خروجی‌های به‌دست‌آمده از آزمایش GPR در شکل ۲ مشاهده می‌شود. مطابق این شکل برای کالیبره کردن نتایج GPR،



شکل ۲. الف) نمونه‌ای از خروجی‌های GPR و ب) نمونه‌ای از مغزه‌گیری‌ها  
a - Example of GPR outputs, b - Pavement condition survey and extracted cores

## ۲-۳- آزمایش های مخرب

### ۱-۲-۳- مدول برجهندگی آسفالت

این آزمایش طبق استاندارد ASTM D۴۱۲۳ برای تعیین مدول الاستیسیته ی لایه ی آسفالت مورد استفاده قرار گرفت. بدین منظور مغزه هایی از لایه ی آسفالت استخراج شده و در آزمایشگاه پارامتر مدول برجهندگی اندازه گیری شد. پارامتر مدول برجهندگی ( $M_r$ ) با استفاده از رابطه ی ۱ محاسبه گردید:

$$M_r = \frac{P}{Ht} (0.27 + \mu) \quad (1)$$

### ۲-۲-۳- مدول برجهندگی اساس و بستر

برای اندازه گیری مدول برجهندگی لایه ی اساس و بستر از دستگاه سه محوری دینامیکی طبق استاندارد AASHTO T۳۰۷ استفاده شد. در انتهای آزمایش از طریق رابطه ی ۲ مدول برجهندگی نمونه ها به دست می آید.

$$M_r = \frac{\sigma_d}{\epsilon_r} \quad (2)$$

که در آن  $\sigma_d$  تنش انحرافی وارد بر نمونه (MPa)،  $\epsilon_r$  کرنش ارتجاعی و  $M_r$  مدول برجهندگی (MPa) است.

در ۴ مقطع از نقاطی که آزمایش FWD انجام گرفت، از لایه های روسازی مغزه گیری شده و در آزمایشگاه آزمایش های بخش ۱-۲-۳ و ۳ و ۲-۲-۳ انجام شده است. نتایج به دست آمده از بررسی های آزمایشگاهی در جدول ۲ ارائه شده است.

**جدول ۲. مدول الاستیسیته ی به دست آمده در آزمایشگاه laboratory values**

نام مقطع	مدول آسفالت (مگا پاسکال)		
	آسفالت (۲۰ °C)	اساس	بستر
۱-SecA	۳۴۲۲	۲۴۵	۷۱
۱۳-SecA	۳۲۰۷	۲۹۶	۸۹
۱۵-SecA	۲۸۷۹	۲۶۴	۹۳
۱-SecC	۴۱۲۵	۲۷۵	۱۲۷

که در آن  $P$  بار وارده (N)،  $H$  تغییر شکل افقی (mm)،  $t$  ضخامت نمونه (mm)،  $\mu$  ضریب پواسون و  $M_r$  مدول برجهندگی (MPa) است.

## ۴- تعیین مدول الاستیسیته ی لایه های روسازی

### ۱-۴- محاسبات بازگشتی

در این پژوهش نتایج حاصل از FWD از طریق نرم افزار ELMOD۶، تحلیل شده و در کنار آن یک روش جدید برای آنالیز معکوس پیشنهاد

داده شده است. ELMOD از یک فرآیند تکراری جهت آنالیز معکوس استفاده می کند. در ابتدا تعدادی مدول فرضی در نظر گرفته و تغییر شکل ها را محاسبه می کند و سپس این تغییر شکل ها را با اندازه گیری های FWD مقایسه کرده و بهترین مدول فرضی را به عنوان خروجی می دهد. فرض اصلی نرم افزار ELMOD این است که لایه های روسازی همگن، همسان و دارای رفتار الاستیک خطی اند. به جز بستر که رفتار آن را طبق رابطه ۳ غیرخطی فرض کرده و از این طریق خطاهای محاسباتی را تا حدود زیادی کاهش می دهد.

$$E = C * \left[ \frac{\sigma_1}{P_a} \right]^n \quad (3)$$

که در آن  $E$  مدول الاستیسیته (MPa)،  $\sigma_1$  تنش اصلی (MPa)،  $P_a$  ۱۰ درصد فشار مرجع (MPa) و  $C, n$  ضرایب ثابت ( $n \leq 0$ ) است. روابط ادمارک که نرم افزار از طریق آن، کل لایه ها را به یک لایه ی معادل تبدیل می کند برای فرض است که تنش و کرنش زیر هر لایه فقط به سفتی همان لایه بستگی دارد. بنابراین اگر ضخامت، مدول و ضریب پواسون لایه ها تغییر کند اما سفتی ثابت بماند تنش و کرنش زیر لایه نیز ثابت باقی می ماند. رابطه ی ضخامت معادل به صورت رابطه ۴ تعریف می شود.

$$H_e = h_1 * \sqrt[3]{\frac{E_1 * (1 - \nu_2^2)}{E_2 * (1 - \nu_1^2)}} \quad (4)$$

از آنجایی که ضریب پواسون همه لایه ها در ELMOD برابر می باشد، نسبت  $\frac{1 - \nu_2^2}{1 - \nu_1^2}$  برابر با یک است. رابطه ی ۵ رابطه ی نهایی ضخامت معادل برای سیستم های چند لایه ی روسازی را ارائه می نماید.

$$H_{e,n} = f * \sum_{i=1}^{n-1} h_i * \sqrt[3]{\frac{E_i}{E_n}} \quad (5)$$

که در آن  $H_{e,n}$  ضخامت معادل ( $h_i$ ، mm)، ضخامت لایه ای که قرار است به ضخامت معادل تبدیل شود ( $E_n$ ، mm)، مدول لایه ای که همه ی لایه ها به آن تبدیل می شوند (MPa) و  $E_i$  مدول لایه ای که قرار است به لایه ی معادل تبدیل شود (MPa) می باشد.

بعد از اینکه تمام لایه های روسازی به یک لایه تبدیل شد، تغییر شکل های سطح محاسبه شده و با تغییر شکل های FWD مقایسه می شود. از روابط بوسینسک برای به دست آوردن تغییر شکل ها زیر بار محوری و در فواصل مختلف از بار استفاده می گردد. با محاسبه ی تغییر شکل ها، کاسه ی انحنای به دست آمده و با تغییر شکل های اندازه گیری شده در آزمایش FWD مقایسه می شود. یکی از خروجی های نرم افزار، پارامتر RMSE می باشد که بیانگر میزان خطا است و به صورت

رابطه ۶ تعریف می‌شود.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n ((d_{fwd} - d_{elmod})^2)}{n}} \quad (6)$$

که در آن RMSE مجذور میانگین مربع خطاها  $(\mu m)$ ،  $d_{fwd}$  تغییرشکل اندازه‌گیری شده در آزمایش FWD  $(\mu m)$ ،  $d_{elmod}$  تغییرشکل محاسبه شده توسط روابط ادمارک - بوسینسک  $(\mu m)$  و  $n$  تعداد حسگر در آزمایش FWD است.

نرم افزار آن قدراین فرآیند را با مدول های فرضی مختلف تکرار می‌کند تا مقدار RMSE به مقدار قابل قبول برسد (معمولاً زیر ۵ میکرون). و در نهایت آن مقدار از مدول فرضی که بهترین تطبیق بین کاسه انحناها را به دست می‌دهد به عنوان خروجی به کار گزارش می‌شود [۲۰ و ۲۱]. در این پژوهش علاوه بر نرم افزار ELMOD یک روش دیگر برای آنالیز معکوس نیز پیشنهاد شده و نتایج آن با نتایج حاصل از نرم افزار ELMOD مقایسه شده است. در این روش تحلیلی که از کدنویسی با استفاده از زبان برنامه نویسی پایه‌ای بهره گرفته شده، می‌توان برای لایه‌های مختلف روسازی ضریب پواسون‌های مختلفی تعریف کرد. برای محاسبه‌ی تغییرشکل‌ها از روش ضخامت معادل بهره گرفته شده است. در این روش کلیه‌ی لایه‌ها با فرض همگن، همسان و الاستیک خطی بودن مصالح تحلیل شده‌اند. هم‌چنین تعداد حس‌گر توسط کاربر قابل تغییر می‌باشد. مبانی تئوری روش به‌طور خلاصه در ادامه بیان شده و جزئیات کدنویسی در پیوست مقاله ارائه گردیده است.

در این روش در ابتدا ترکیب‌های مختلفی از نسبت‌های  $\frac{E_1}{E_3}$  و  $\frac{E_2}{E_3}$  که در آن  $E_1$ ،  $E_2$  و  $E_3$  به ترتیب مدول الاستیسیته‌ی لایه‌های آسفالت، اساس و بستر می‌باشد، برای برنامه مشخص می‌شود. سپس با فرض کردن یک مدول اولیه برای لایه بستر که به دلخواه انتخاب می‌شود، تحلیل آغاز می‌گردد. همانند نرم‌افزار ELMOD و با استفاده از روابط ضخامت معادل (رابطه ۴) تمامی لایه‌های روسازی به یک لایه تبدیل گشته و توسط روابط ۷ و ۸ تغییرشکل‌های سطح روسازی در زیر بار و در فواصل مختلف از محل بارگذاری پیش‌بینی می‌شود [۲۲].

$$d_z = \frac{(1+\nu)\sigma_0 a}{E} \left[ \frac{1}{\sqrt{1+\left(\frac{z}{a}\right)^2}} + (1-2\nu) \left( \sqrt{1+\left(\frac{z}{a}\right)^2} - \frac{z}{a} \right) \right] \quad (7)$$

$$d_{z,r} = \frac{\sigma_0 a^2}{2E} \left[ (1+\nu)z^2 \frac{1}{\sqrt{(r^2+z^2)^3}} + 2(1-\nu^2) \frac{1}{\sqrt{(r^2+z^2)}} \right] \quad (8)$$

که در آن  $d_{z,r}$  تغییر شکل در عمق  $Z$  و زیر بار محوری  $(\mu m)$

تغییر شکل در عمق  $Z$  و در فاصله  $r$  از محل بارگذاری  $(\mu m)$ ،  $Z$  عمق موردنظر از سطح روسازی (mm)،  $\nu$  ضریب پواسون لایه موردنظر،  $\sigma_0$  تنش وارده (MPa)،  $E$  مدول الاستیسیته‌ی لایه موردنظر (kPa) و  $a$  شعاع صفحه بارگذاری (mm) است.

اساس این روش، مینیمم کردن اختلاف بین تغییرشکل‌های پیش‌بینی شده و تغییرشکل‌های حاصل از اندازه‌گیری‌های FWD می‌باشد. رابطه ۹ میزان خطا بین این دو مقدار را نشان می‌دهد که باید کمترین میزان ممکن باشد.

$$e = \sum_{i=1}^s \left( \frac{d_i^m - d_i^p}{d_i^m} \right)^2 \quad (9)$$

برای حداقل کردن خطا، از طرفین رابطه‌ی ۹ نسبت به مدول بستر مشتق گرفته شده و مطابق با رابطه ۱۰ برابر با صفر قرار داده می‌شود.

$$\frac{\partial e}{\partial E_{SG}} = \sum_{i=1}^s 2 \left( 1 - \frac{d_i^p}{d_i^m} \right) \left( -\frac{1}{d_i^m} \frac{\partial d_i^p}{\partial E_{SG}} \right) = 0 \quad (10)$$

تغییرشکل‌های پیش‌بینی شده در حس‌گر  $i$  یا  $d_i^p$  که از روابط ۷ و ۸ محاسبه می‌شود، مطابق با رابطه ۱۱ تابعی از مدول الاستیسیته  $E_K$ ، ضریب پواسون  $\mu_K$  ضخامت لایه  $H_K$ ، شعاع صفحه‌ی بارگذاری  $a$  و تنش وارده در آزمایش  $\sigma$  می‌باشد. پارامتر  $K$  معرف تعداد لایه‌های روسازی است.

$$d_i^p = f_i(E_K, \mu_K, H_K, a, \sigma) \quad (11)$$

رابطه ۱۱ را با تقسیم کردن مدول لایه‌های روسازی به مدول بستر می‌توان به صورت رابطه ۱۲ نوشت.

$$d_i^p = \frac{\sigma a}{E_{SG}} f_i \left( \frac{E_1}{E_{SG}}, \frac{E_2}{E_{SG}}, \dots, \frac{E_n}{E_{SG}} \right) = \frac{\sigma a}{E_{SG}} f_i \quad (12)$$

با جایگزین کردن رابطه‌ی ۱۲ در رابطه‌ی ۱۰ و فاکتور گرفتن از عبارت  $\frac{(\sigma a)^2}{E_{SG}^3}$ ، رابطه ۱۳ به دست می‌آید.

$$\frac{(\sigma a)^2}{E_{SG}^3} \sum_{i=1}^s \left( \frac{E_{SG}}{\sigma a} - \frac{f_i}{d_i^m} \right) \frac{f_i}{d_i^m} = 0 \quad (13)$$

با فاکتور گرفتن از  $f_1^2$  از رابطه ۱۳ رابطه ۱۴ به دست می‌آید که در آن  $f_1$  تابع تغییر شکل برای حس‌گر اول است.

$$f_1^2 \sum_{i=1}^s \left( \frac{E_{SG}}{a\sigma f_1} - \frac{f_i}{f_1 d_i^m} \right) \frac{f_i}{f_1 d_i^m} = 0 \quad (14)$$

این دو روش پرداخته شده است. در تحقیقات انجام شده در این زمینه برای تعیین دقت یک روش در تخمین مدول، معمولاً نتایج آن با مقادیر آزمایشگاه مقایسه می‌شود [۲۰]. هرچقدر که مدول‌های تخمین زده شده در فرآیند آنالیز معکوس به مقادیر آزمایشگاهی آن که مصداق مقدار واقعی مدول می‌باشد نزدیک‌تر باشد یک گام مثبت در زمینه‌ی تحلیل غیرمستقیم روسازی تلقی می‌شود.

مهم‌ترین دلایل در انحراف مقادیر مدول بازگشتی از نتایج آزمایشگاهی، تفاوت در شرایط اعمال تنش و مدت زمان بارگذاری در دو آزمایش، مشخصات مصالح و دما می‌باشد [۲۰]. علاوه بر این خطاهایی در مقادیر حاصل از آنالیز معکوس پیش می‌آید که عمدتاً به دلیل فشار غیریکنواخت، گرادیان رطوبت و دما، وضعیت بارگیری نامناسب در لبه‌ی روسازی، غیرخطی بودن و تنوع مشخصات مصالح و انتخاب الگوریتم مناسب برای سازگاری کاسه‌ی انحنای می‌باشد [۲۴]. هم‌چنین با توجه به ساده‌سازی‌هایی که در محاسبات بازگشتی انجام می‌شود، اختلاف بین مقادیر آزمایشگاهی و میدانی امری طبیعی است. یکی از این ساده‌سازی‌ها، خطی در نظر گرفتن رفتار مصالح روسازی می‌باشد. در این تحقیق جهت مقایسه‌ی دقت روش پیشنهادی و نرم‌افزار ELMOD6.0 از نتایج آزمایشگاهی استفاده شده است. به این شکل که مدول‌های به‌دست آمده از هر دو روش با مدول‌های آزمایشگاهی مقایسه شده و پارامتر RMSE محاسبه شد. جدول ۳ مقادیر RMSE به‌دست آمده از مقایسه‌ی مدول‌های آنالیز معکوس و آزمایشگاه برای لایه‌های مختلف روسازی را نشان می‌دهد. همان‌طور که از جدول ۳ مشخص است، RMSE روش پیشنهادی برای لایه‌های آسفالت و اساس در مقایسه با نرم‌افزار ELMOD کمتر می‌باشد. بنابراین دقت پیش‌بینی مدول آسفالت و اساس با استفاده از روش پیشنهادی بیشتر بوده و به‌طور کلی می‌توان گفت که روش جدیدی که کد نویسی شده است برای لایه‌های آسفالت و اساس بهتر از نرم‌افزار ELMOD عمل کرده است. اما چون نرم‌افزار ELMOD رفتار غیرخطی بستر را نیز در نظر می‌گیرد، مدول برجهندگی بستر را با دقت بیشتری نسبت به روش کد نویسی تخمین زده است.

### جدول ۳. مقایسه‌ی دقت روش پیشنهادی و ELMOD در مقایسه با مقادیر آزمایشگاهی

#### Evaluating the accuracy of the suggested method and ELMOD compared to laboratory values

نام لایه	نرم‌افزار ELMOD6.0	روش پیشنهادی (RMSE بر حسب مگاپاسکال)
آسفالت (در ۲۰ درجه سانتی‌گراد)	۲۶۳۷	۲۳۶۳
اساس	۵۲۱	۴۴۵
بستر	۱۴۲	۱۶۸

$$\sum_{i=1}^s \left( \frac{f_i E_{SG}}{a \sigma f_1^2 d_i^m} \right) - \sum_{i=1}^s \left( \frac{f_i}{f_1 d_i^m} \right)^2 = 0 \quad (15)$$

در نهایت با استفاده از رابطه‌ی ۱۶ می‌توان مدول بستر را به‌دست آورد:

$$E_{SG} = \frac{\sum_{i=1}^s \left( \frac{f_i}{f_1 d_i^m} \right)^2}{\sum_{i=1}^s \left( \frac{f_i}{\text{Pa} d_i^m f_1^2} \right)} = \sigma a f_1 \frac{\sum_{i=1}^s \left( \frac{f_i}{f_1 d_i^m} \right)^2}{\sum_{i=1}^s \left( \frac{f_i}{d_i^m f_1} \right)} \quad (16)$$

که در آن  $f_1$  برابر است با:

$$f_1 = d_1^p \times \frac{E_3}{a \times \sigma} \quad (17)$$

که در آن  $E_{SG}$  مدول بستر محاسبه شده‌ای که به ازای آن کمترین اختلاف بین تغییر شکل اندازه‌گیری شده و محاسبه شده وجود دارد  $\sigma$  (MPa)، تنش وارده (MPa)، شعاع صفحه بارگذاری (mm)،  $E_3$  مدول فرضی اولیه برای بستر که به دلخواه فرض می‌شود (MPa)  $d_1^p$ ، تغییر شکل محاسبه شده از روابط ۷ و ۸  $d_1^m$  ( $\mu\text{m}$ ) تغییر شکل اندازه‌گیری شده در آزمایش FWD ( $\mu\text{m}$ ) و  $S$  تعداد حس‌گراست.

با جایگذاری تغییر شکل‌های محاسبه شده از روابط ۷ و ۸ در رابطه ۱۶، به ازای هر یک از نسبت‌های مختلف  $\frac{E_1}{E_3}$  و  $\frac{E_2}{E_3}$  مدول بستر جدید به‌دست می‌آید. در واقع با حداقل کردن اختلاف بین تغییر شکل‌های محاسبه شده و اندازه‌گیری شده، فرض اولیه‌ی مدول بستر توسط رابطه ۱۶ اصلاح می‌گردد و کلیه‌ی مراحل به ازای این فرض جدید تکرار می‌شود. آن ترکیب مدولی  $\left( \frac{E_1}{E_3} \right)$  و  $\left( \frac{E_2}{E_3} \right)$  که کم‌ترین خطا را به دنبال داشته باشد به‌عنوان پارامتر خروجی در نظر گرفته می‌شود.

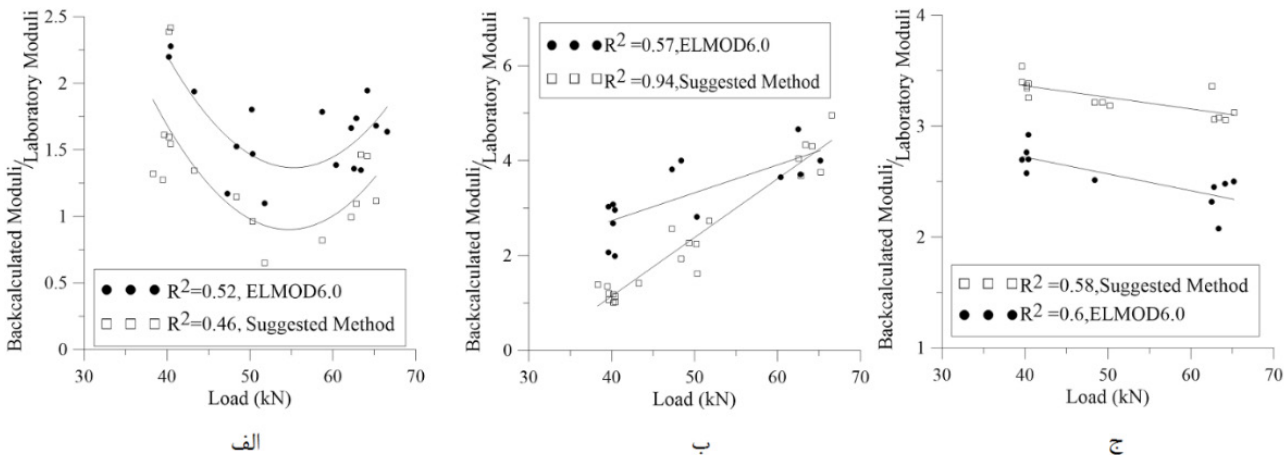
پس از اتمام کدنویسی روش پیشنهادی، به کمک کد نوشته شده و نرم‌افزار ELMOD6.0 مدول‌های بازگشتی لایه‌های روسازی تخمین زده شدند. سپس مدول‌های به‌دست آمده برای لایه‌ی آسفالتی در شرایط متفاوت آب و هوایی، با ضریب معینی به مدول نظیره ۲ درجه سانتی‌گراد (۶۸ درجه فارنهایت) که اکثراً به‌عنوان دمای استاندارد تعیین شده است، تبدیل می‌گردد [۲۳]. زیرا تغییر دمای محیط، درافت و خیز اندازه‌گیری شده‌ی روسازی در مرکز صفحه بارگذاری تأثیر گذاشته و باعث تغییر در مدول الاستیسیته لایه‌ها و به‌خصوص لایه آسفالتی خواهد شد.

### ۱-۱-۴- بررسی دقت روش پیشنهادی و نرم‌افزار ELMOD6.0 در مقایسه با مقادیر آزمایشگاهی

در بخش قبل، مدول‌های بازگشتی توسط ELMOD و روش پیشنهادی تخمین زده شدند. در این بخش به بررسی دقت نتایج

می‌دهد. همان‌طور که از شکل‌ها مشخص است در اساس با افزایش و در بستر با کاهش بار وارده، اختلاف بین مدول بازگشتی و مدول آزمایشگاهی افزایش می‌یابد. بنابراین در اساس به ازای نیروی کمتر (حدود نیروی ۴۰ کیلو نیوتون) و در بستر به ازای نیروی بزرگ‌تر (حدود نیروی ۶۰ کیلو نیوتون) مقادیر میدانی به آزمایشگاهی نزدیک‌تر خواهد بود. مطابق نمودار (ب) و (ج) و همانند نتایج آسفالت، مدول‌های بازگشتی اساس و بستر بزرگ‌تر از مقادیر آزمایشگاهی هستند. اما در شکل (ب) نمودار مربوط به نتایج روش پیشنهادی پایین‌تر از نمودار ELMOD است. به‌طور مثال برای نیروی ۴۰ کیلو نیوتون در روش پیشنهادی، میانگین نسبت مدول بازگشتی به مدول آزمایشگاهی برابر است با ۱/۲ و برای نتایج حاصل از نرم‌افزار ELMOD این نسبت برابر با ۲/۶۳ می‌باشد. بنابراین روش پیشنهادی، مدول بازگشتی لایه‌ی اساس را در نیروی ۴۰ کیلو نیوتون بسیار بهتر از نرم‌افزار ELMOD و نزدیک به مقدار واقعی تخمین می‌زند. با توجه به آنکه مطابق شکل ۳-ب شیب نمودار روش پیشنهادی بیشتر از روش ELMOD به دست آمده است، نسبت مقادیر مدول الاستیسیته در نیروهای بالاتر از ۶۰ کیلو نیوتون برای روش پیشنهادی از روش ELMOD بیشتر خواهد بود. این مسئله بیانگر این است که روش پیشنهادی در محدوده‌ی نیروهای بالاتر از ۶۰ کیلو نیوتون دقت کمتری از ELMOD خواهد داشت. برای بستر برخلاف آسفالت و اساس، مطابق شکل ۳-ج نسبت مدول الاستیسیته بازگشتی به آزمایشگاهی برای مصالح بستر در روش ELMOD کمتر از روش پیشنهادی بوده و به یک نزدیک‌تر بوده است.

جهت بررسی تأثیر نیروی وارده بر دقت پیش‌بینی مدول لایه‌های روسازی، آزمایش FWD در محدوده‌ی نیروهای ۴۰ تا ۶۰ کیلو نیوتون انجام شده است. شکل ۳-الف تغییرات نسبت مدول بازگشتی به مدول آزمایشگاهی را به ازای نیروهای مورد آزمایش برای لایه‌ی آسفالت نشان می‌دهند. در این شکل روند تغییرات مطابق با منحنی درجه ۲ می‌باشد. این روند برای نتایج ELMOD و روش پیشنهادی مشابه یکدیگر است. با توجه به اینکه در تمام محدوده‌های مورد آزمایش، همه اعداد تقریباً از یک بزرگ‌ترند می‌توان این‌گونه نتیجه گرفت که مدول‌های بازگشتی بزرگ‌تر از مقادیر آزمایشگاهی تخمین زده شدند. همان‌طور که از شکل مشخص است علی‌رغم یکسان بودن روندها، نمودار مربوط به نتایج روش پیشنهادی پایین‌تر از نمودار ELMOD است. در واقع نسبت مدول بازگشتی به مدول آزمایشگاهی برای لایه‌ی آسفالت در روش پیشنهادی به ۱ نزدیک‌تر است. این مسئله ناشی از دقت بالاتر روش پیشنهادی در تخمین مدول الاستیسیته آسفالت است. در روش پیشنهادی، میانگین نسبت مدول بازگشتی به مدول آزمایشگاهی به ازای سه نیروی ۴۰، ۵۰ و ۶۰ کیلو نیوتون به ترتیب برابر با ۱/۶۹، ۱/۹۲ و ۱/۱۶ و برای نتایج حاصل از نرم‌افزار ELMOD برابر ۱/۴۱، ۲/۱۴ و ۱/۶۲ بوده است. بنابراین همان‌طور که از شکل هم مشخص است مدول بازگشتی لایه‌ی آسفالت به ازای نیروهای ۵۰ تا ۶۰ کیلو نیوتون به نتایج آزمایشگاهی نزدیک‌تر خواهد بود. شکل ۳-ب و ۳-ج تغییرات نسبت مدول بازگشتی به مدول آزمایشگاهی را به ازای نیروهای مختلف به ترتیب برای اساس و بستر نشان



شکل ۳. تغییرات نسبت مدول بازگشتی به مدول آزمایشگاهی در مقابل بار وارده (الف) آسفالت (ب) اساس (ج) بستر  
 versus load magnitude a-asphalt layer b-base c-subgrade  $\frac{E_{FWD}}{E_{lab}}$

رابطه ۱۸ برای لایه‌ی آسفالت ارائه شده است. از آنجایی که دما بر میزان مدول الاستیسیته‌ی آسفالت بسیار تأثیرگذار می‌باشد برای تخمین مدول آزمایشگاهی با استفاده از رابطه‌ی ۱۸ لازم است مدول‌های بازگشتی برای دمای آزمایشگاه که معمولاً ۲۰ درجه سانتی‌گراد می‌باشد، اصلاح شده باشند.

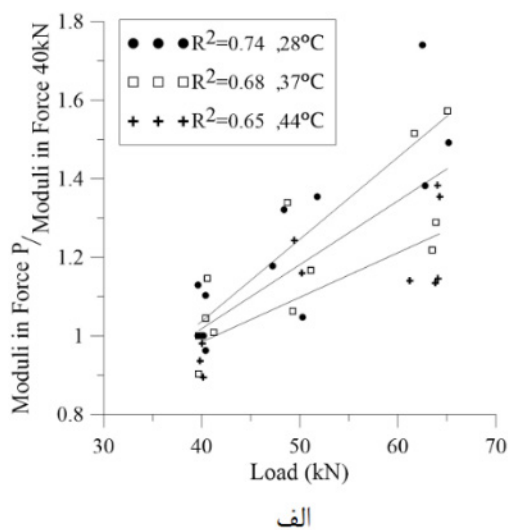
۲-۱-۴- ارائه مدل تخمین مدول آزمایشگاهی با استفاده از مدول‌های بازگشتی  
 به کمک شکل ۳ که در بخش قبل آمده است، به ترتیب روابط ۱۸ تا ۲۰ به دست آمده‌اند. به کمک این مدل‌ها و با داشتن مدول بازگشتی، می‌توان مدول آزمایشگاهی لایه‌ی آسفالت، اساس و بستر را تخمین زد.



### ۳-۱-۴- ارائه مدل تأثیر نیرو بر مدول بازگشتی

همان‌طور که در بخش ۴-۱-۱ بررسی شد، لایه‌ی اساس دانه‌ای در نیروی کمتر و بستریز دانه در نیروهای بزرگ‌تر به مقادیر آزمایشگاه نزدیک‌ترند. پس می‌توان کلیه‌ی اطلاعات FWD در نیروهای مختلف را به نیرویی تبدیل نمود که به ازای آن مدول‌های بازگشتی به مدول‌های آزمایشگاهی نزدیک‌تر است. علاوه بر آن گاهی جهت تحلیل نتایج FWD و بررسی یک پارامتر خاص (به‌عنوان مثال دما) بر نتایج آن، لازم است کلیه‌ی اطلاعات در یک نیروی مشخص باشند.

در این قسمت مدل‌هایی ارائه شده‌اند که مدول‌های بازگشتی مربوط به یک نیرو را برای نیروی دیگر نرمالیزه می‌کند. از شکل ۴-الف و ۴-ب، ضریب لازم جهت تبدیل مدول لایه‌های اساس و بستر در یک نیروی دلخواه به مدول نیروی مورد نظر به دست می‌آید. نیرویی که قرار است بقیه داده‌ها به آن تبدیل شوند برای لایه اساس نیروی ۴۰ کیلو نیوتون و برای لایه بستر ۶۰ کیلو نیوتون می‌باشد. زیرا در لایه‌ی اساس دانه‌ای و بستریز دانه به ترتیب به ازای نیروی ۴۰ و ۶۰ کیلو نیوتون مدول بازگشتی به مدول آزمایشگاهی نزدیک‌تر بوده است.



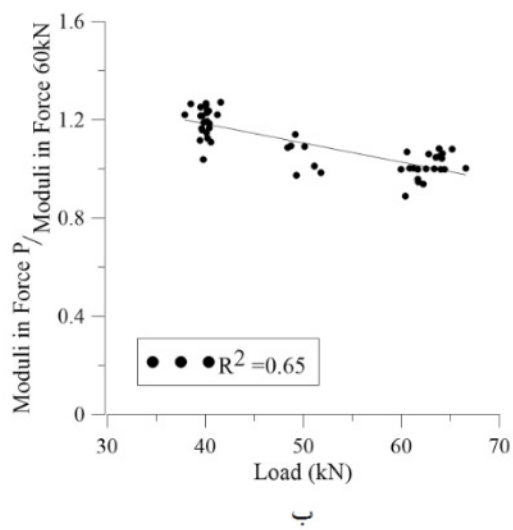
$$\frac{E_{FWD}}{E_{LAB}} = 0/0036P^2 - 0/3973P + 12/35, R^2 = 0/52 \quad (18)$$

روابط ۱۹ و ۲۰ به ترتیب مربوط به لایه‌ی اساس و بستر می‌باشند. از آنجایی که دما بر میزان تغییر شکل‌های اندازه‌گیری شده در آزمایش FWD تأثیرگذار می‌باشد و در محاسبات معکوس از همین تغییر شکل‌ها استفاده می‌شود، بنابراین مدول اساس و بستر نیز تا حدودی با دما تغییر می‌کند. این مسئله را باید به خاطر ماهیت دستگاه FWD و تحلیل غیرمستقیم روسازی پذیرفت. بنابراین پارامتر دما نیز به رابطه‌های ۱۹ و ۲۰ اضافه شده است.

$$\frac{E_{FWD}}{E_{LAB}} = 0/038P - 0/094T + 4/177, R^2 = 0/7 \quad (19)$$

$$\frac{E_{FWD}}{E_{LAB}} = -0/014P - 0/051T + 4/733, R^2 = 0/85 \quad (20)$$

که در آن  $E_{FWD}$  مدول بازگشتی از نرم‌افزار ELMOD (MPa)،  $E_{LAB}$  مدول آزمایشگاهی (MPa)،  $P$  بار وارده در آزمایش FWD (kN) و  $T$  دمای سطح آسفالت (°C) است.



شکل ۴. تأثیر نیرو بر مدول بازگشتی (الف) اساس (ب) بستر  
Effect of load magnitude on back-calculated moduli a - base layer b - sub grade

مدول الاستیسیته در نیروی ۶۰ کیلو نیوتون (MPa) است.

### ۴-۱-۴- اعتبارسنجی

دقت مدل‌های ذکر شده در بخش‌های قبل (روابط ۱۸ تا ۲۲) از طریق اعتبارسنجی در این بخش بررسی شد. جهت اعتبارسنجی مدل‌ها از پارامتر RMSE استفاده شده است که مطابق رابطه ۸ محاسبه می‌گردد. RMSE کمتر از ۲۵ درصد به‌عنوان محدوده‌ی مجاز برای رسیدن به نتیجه‌ی نهایی در نظر گرفته شده است. این محدوده توسط موسسه SHRP پیشنهاد شده است [۲۵]. در اعتبارسنجی مدل‌ها، از

روابط ۲۱ و ۲۲ برای تبدیل مدول‌های اساس و بستر به مدول در نیروی ۴۰ و ۶۰ کیلو نیوتون است:

$$\frac{E_P}{E_{40}} = 0/016P - 0/01T + 0/748, R^2 = 0/7 \quad (21)$$

$$\frac{E_P}{E_{60}} = -0/0078P + 1/4951, R^2 = 0/65 \quad (22)$$

که در آن  $P$  بار وارده در آزمایش FWD (kN)،  $T$  دمای سطح آسفالت (°C)،  $E_P$  مقدار مدول الاستیسیته در نیروی  $P$  (MPa)،  $E_{40}$  مقدار مدول الاستیسیته در نیروی ۴۰ کیلو نیوتون (MPa) و  $E_{60}$  مقدار

آمده در جدول ۴ آورده شد. همان طور که از جدول مشخص است به جز رابطه ی ۲۱، سایر مدل ها دقت و اعتبار کافی را دارا می باشند.

اطلاعات ایستگاه های SecA-3 و SecA-5 و SecA-6 و SecA-7 و SecA-8 و SecA-9 و SecC-1 استفاده شد و نتایج RMSE به دست

**جدول ۴. اعتبارسنجی مدل های ارائه شده در روابط ۱۸ تا ۲۲**  
**Validation of the models presented in Equation (18) to (22)**

مدل	RMSE (%)	معیار (%)	اعتبارسنجی	مدل	RMSE (%)	معیار (%)	اعتبارسنجی
رابطه ۱۸	۶۶	۲۵	غیر قابل قبول	رابطه ۲۱	۱۳	۲۵	قابل قبول
رابطه ۱۹	۲۳	۲۵	قابل قبول	رابطه ۲۲	۹	۲۵	قابل قبول
رابطه ۲۰	۲۳	۲۵	قابل قبول	-	-	-	-

شکل ۵ نمودار مدول بازگشتی آسفالت Eac در مقابل SCI را در مقیاس لگاریتمی نشان می دهد. نمودار نشان می دهد که با زیاد شدن مدول لایه ی آسفالتی کاهش پیدا می کند. اگر بار دیگر همین نمودار در مقابل پارامتر BDI رسم شود، مشاهده می شود که ارتباط بین مدول بازگشتی آسفالت و پارامتر BDI نیز در مقیاس لگاریتمی خطی است. بنابراین پارامتر BDI نیز به معادله ی رگرسیون اضافه شده است. در شکل ۵-الف نمودار مدول بازگشتی آسفالت با SCI به ازای سطح تنش های مختلف برای ایستگاه SecA-1 رسم شده است. در این نمودار مشاهده می شود که روند تغییرات مدول با SCI به ازای سطح تنش ۵۰۰ تا ۷۰۰ کیلو پاسکال و سطح تنش ۷۰۰ تا ۹۰۰ کیلو پاسکال روند مشابهی دارند اما کاملاً مجزا از یکدیگرند. بنابراین نیاز است پارامتر تنش نیز به پارامترهای معادله رگرسیون اضافه گردد. شکل ۵-ب تغییرات مدول بازگشتی آسفالت با SCI به ازای ضخامت های مختلف برای لایه ی آسفالتی را نشان می دهد. از آنجایی که ارتباط بین مدول الاستیسته و پارامترهای مدل در مقیاس لگاریتمی خطی می باشد، از لگاریتم پارامترها جهت رگرسیون خطی استفاده شده است. بنابراین لگاریتم پارامترهای Eac، Hac، BDI، SCI و تنش وارده در آزمایش FWD به عنوان ورودی، به نرم افزار SPSS داده شده و با استفاده از رگرسیون خطی ارتباط بین این پارامترها و مدول الاستیسته آسفالت مطابق رابطه ۲۳ به دست آمد.

## ۲-۴- پیش بینی مدول الاستیسته با استفاده از پارامترهای مستقل

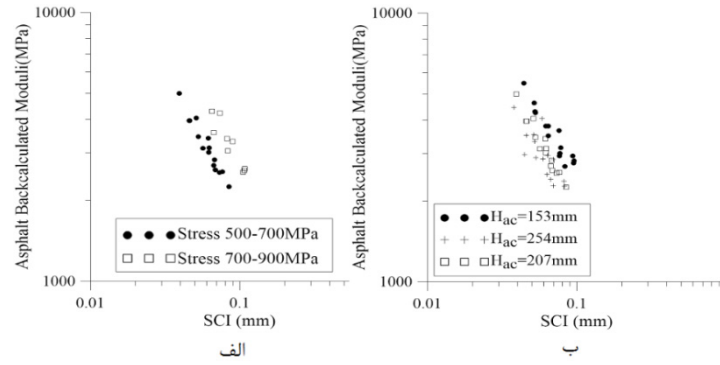
در بخش های قبل روش جدیدی مبتنی بر محاسبات بازگشتی ارائه شد و دقت نتایج آن بررسی گشت. اما مدل های ارائه شده در این بخش بدون استفاده از فرآیند محاسبات بازگشتی و با استفاده از پارامترهایی که مستقیماً از اندازه گیری FWD به دست می آید، مدول لایه های روسازی را تخمین می زنند. از جمله این پارامترها می توان به پارامترهای کاسه ی انحنای اشاره نمود. برخی از پارامترهایی که در مدل های این بخش استفاده می شوند عبارت اند از SCI که برابر است با  $D_0 - D_{300}$ ، BDI، که برابر است با  $D_{600} - D_{300}$  و  $D_6$  که تغییر شکل در فاصله ی ۹۰ سانتی متری از محل بارگذاری می باشد.

### ۱-۲-۴- لایه ی آسفالت

از آنجایی که پارامترهای کاسه ی انحنای و مدول الاستیسته ی لایه های روسازی با هم در ارتباط اند، می توان برای پیش بینی مدول لایه ی آسفالتی از این پارامترها استفاده نمود. از بین پارامترهای کاسه ی انحنای، پارامتر SCI بیانگر وضعیت سازه ی لایه ی اساس می باشد [۲۶]. بر اساس مطالعات گذشته اگر نمودار مدول الاستیسته ی آسفالت به ازای SCI رسم شود، دیده می شود که ارتباط این دو خطی است. بنابراین SCI می تواند نماینده ی خوبی برای بیان وضعیت لایه های بالایی، مخصوصاً لایه ی آسفالت هم باشد [۱۰].

$$\log E_{ac} = -1/438 \log SCI - 0/904 \log H_{ac} + 0/65 \log \sigma + 0/761 \log BDI + 3/074, R^2 = 0/7, SEE = 0/0762 \quad (23)$$

که در آن  $E_{ac}$  مدول بازگشتی آسفالت (MPa)،  $H_{ac}$  ضخامت لایه ی آسفالت و  $\sigma$  تنش وارده در آزمایش FWD (kPa) است.



شکل ۵. تغییرات مدول بازگشتی لایه‌ی آسفالت با پارامتر SCI الف) در سطح تنش‌های مختلف ب) در ضخامت‌ها مختلف  
Asphalt elastic modulus versus SCI at various a - stress levels b - H<sub>ac</sub>

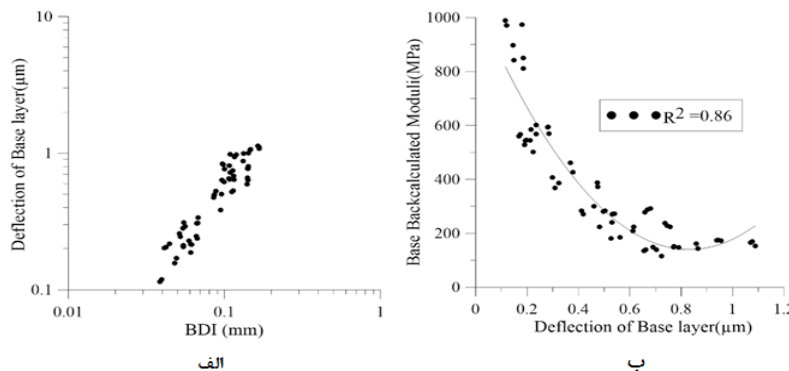
پارامتر BDI در مقیاس لگاریتمی نشان می‌دهد. همان‌طور که مشخص است رابطه خطی می‌باشد. بنابراین می‌توان پارامتر BDI را به‌عنوان نماینده‌ای از عکس‌العمل لایه‌ی اساس ( $\delta_{base}$ ) در نظر گرفت. علاوه بر پارامتر BDI، تغییر شکل لایه‌ی اساس تابعی از تنش وارده و ضخامت لایه‌ها می‌باشد. بنابراین پارامترهای H<sub>base</sub>، H<sub>ac</sub>، BDI،  $\delta_{base}$  و تنش وارده در آزمایش FWD به‌عنوان ورودی، به نرم‌افزار SPSS داده‌شده و با استفاده از رگرسیون خطی ارتباط بین این پارامترها و تغییر شکل لایه‌ی اساس مطابق رابطه ۲۴ به‌دست آمد.

$$\log \delta_{base} = 1/691 \log BDI + 1/377 \log H_{ac} - 0/674 \log \sigma + 0/002 H_{base} - 0/29, R^2 = 0/97, SEE = 0/0497 \quad (24)$$

ضخامت لایه‌ی آسفالت و اساس و  $\sigma$  تنش وارده در آزمایش FWD (kPa) است.

۲-۲-۴- لایه‌ی اساس  
برخلاف مدول لایه‌ی آسفالتی که در بخش قبلی بررسی شد، محاسبه‌ی مدول لایه‌ی اساس به‌صورت مستقیم و با استفاده از پارامترهای کاسه‌ی انحنای بسیار پیچیده و دشوار می‌باشد. به همین منظور ابتدا با استفاده از پارامترهای کاسه‌ی انحنای می‌توان میزان افت و خیز لایه‌ی اساس را محاسبه نمود و سپس با استفاده از رابطه‌ای که بین تغییر شکل و مدول لایه‌ی اساس برقرار است، مدول الاستیسیته‌ی اساس را محاسبه کرد. شکل ۶-الف نمودار تغییرات افت و خیز لایه‌ی اساس را به ازای

که در آن  $\delta_{base}$  تغییر شکل لایه‌ی اساس ( $\mu m$ )،  $H_{ac}$  و  $H_{base}$  به ترتیب



شکل ۶. الف) تغییرات تغییر شکل لایه‌ی اساس با پارامتر BDI ب) تغییرات مدول بازگشتی به ازای تغییر شکل لایه‌ی اساس  
a - Deflection of base layer versus BDI b - Back-calculated moduli versus the deflection of base layer

بازگشتی اساس (MPa) است.

### ۳-۲-۴- بستر

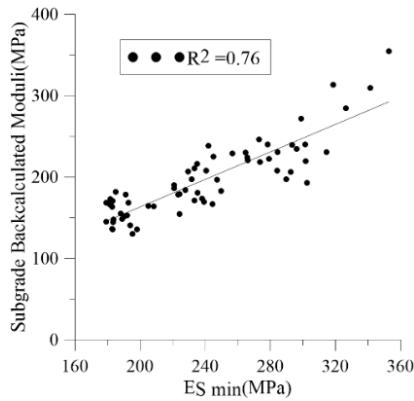
در این بخش برای پیش‌بینی مدول بستر از روابط بوسینسک بهره گرفته شده است. رابطه‌ی بوسینسک برای محاسبه‌ی تغییر شکل سطح به شکل رابطه ۲۶ می‌باشد. با بازنویسی رابطه‌ی ۲۶ می‌توان  $E_{S(r)}$  یا مدول سطح را به‌دست آورد. مدول سطح، میانگین وزنی مدول الاستیسیته‌ی لایه‌های روسازی تعریف می‌شود. به کمک این رابطه

شکل ۶-ب نیز رابطه‌ی غیرخطی بین مدول الاستیسیته و تغییر شکل را برای لایه‌ی اساس نشان می‌دهد که مطابق با منحنی درجه ۲ می‌باشد. رابطه‌ی ۲۵ با استفاده از برازش بهترین منحنی برداده‌های شکل ۶-ب به‌دست آمده است. با استفاده از رابطه‌ی ۲۵ و با داشتن تغییر شکل لایه‌ی اساس می‌توان مدول الاستیسیته اساس را محاسبه نمود.  
$$E_{base} = 1327/1\delta_{base}^2 - 2203/3\delta_{base} + 1054/4, R^2 = 0/86 \quad (25)$$

که در آن  $\delta_{base}$  تغییر شکل لایه‌ی اساس ( $\mu m$ ) و  $E_{base}$  مدول

شکل ۸ نمودار ارتباط بین مدول برجهندگی بستر و مدول سطح حداقل را نشان می‌دهد که با استفاده از رگرسیون خطی به دست آمده است. هم‌چنین رابطه ۲۸ نشان‌دهنده ارتباط بین پارامترهای فوق و مقدار  $R^2$  مدل می‌باشد.

$$E_{SG} = 0/8455E_{Smin} - 5/8423 \quad R^2 = 0/76 \quad (28)$$



شکل ۸: تغییرات مدول بازگشتی بستر به ازای  $E_{Smin}$   
Subgrade back-calculated moduli versus  $E_{Smin}$

#### ۴-۲-۴- اعتبارسنجی و مقایسه با مدل‌های مشابه

جهت بررسی صحت عملکرد مدل‌های پیشنهاد شده در روابط ۲۳، ۲۵ و ۲۸ از دودسته اعتبارسنجی استفاده شده است. دسته‌ی اول اعتبارسنجی‌ها با استفاده از داده‌های FWD موجود در همین پژوهش که از ابتدا جهت ارزیابی کاربرد مدل‌ها و اعتبارسنجی آن‌ها کنار گذاشته شده بود، انجام شد. از اطلاعات ایستگاه‌های SecA-3 و SecA-5 و SecA-7 و SecA-8 و SecA-9 و SecA-11 و SecA-12 و SecA-14 و SecA-2 در جدول ۱ به منظور محاسبه‌ی RMSE استفاده شده است. مطابق جدول ۵ هر سه مدل از دقت و اعتبار کافی برخوردار می‌باشند.

#### جدول ۵. اعتبارسنجی مدل‌های روابط ۲۳، ۲۵ و ۲۸

Validation of the models presented in Equation (23), (25) and (28)

مدل	RMSE (%)	معیار (%)	اعتبارسنجی
رابطه (۲۳)	۱۲	۲۵	قابل قبول
رابطه (۲۵)	۱۸	۲۵	قابل قبول
رابطه (۲۸)	۱۳	۲۵	قابل قبول

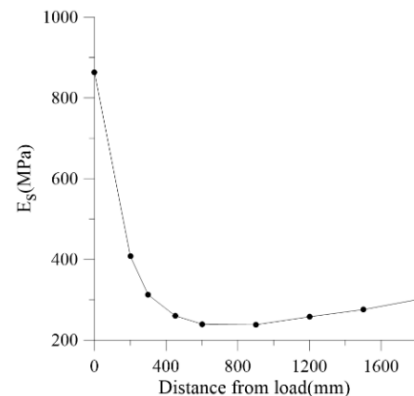
به منظور بررسی دقیق‌تر عملکرد مدل‌های این بخش، از خروجی‌های آزمایش FWD در یک محور دیگر واقع در داکوتای جنوبی در ایالت متحده آمریکا به عنوان دسته‌ی دوم اعتبارسنجی‌ها استفاده شده است. این آزمایش ۶ بار در دفعات مختلف و در طول یک سال از ماه جولای تا نوامبر سال ۱۹۹۴ در بزرگراه ایستگاه ۱۸۰۴ واقع در شمال پولاک

و با جایگذاری تغییرشکل حس‌گری که رفتار بستر را منعکس می‌کند، می‌توان مدول برجهندگی بستر را پیش‌بینی نمود.

$$D_{(r,0)} = \frac{(1-\nu^2)p}{r \cdot E \cdot \pi} \rightarrow E_{S(r)} = \frac{(1-\nu^2)pa^2}{r \cdot D_r} \quad (26)$$

که در آن  $E_{S(r)}$  مدول سطح (MPa)،  $P$  بار وارده (MPa)،  $a$  شعاع صفحه بارگذاری (mm)،  $D_r$  تغییرشکل در فاصله‌ی  $r$  از محل بارگذاری (mm) و  $\nu$  ضریب پواسون است.

با توجه به پروفیل مدول سطح در فواصل مختلف از محل بارگذاری، با افزایش فاصله از محل بارگذاری مدول سطح کاهش می‌یابد. در حس‌گرهای اول و زیر بار وارده، مقدار مدول سطح حداکثر است و رفتار کل روسازی را منعکس می‌کند. با دور شدن از محل بارگذاری، حس‌گرها رفتار لایه‌های پایین‌تر را نشان می‌دهند. تغییرشکل حس‌گری که حداقل مدول سطح در آن اتفاق می‌افتد را می‌توان به عنوان نماینده‌ی بستر در نظر گرفت. مطالعات زیادی صورت گرفته است که رابطه‌ی بین مدول سطح حداقل و مدول برجهندگی بستر را بررسی می‌کند [۲۷]. شکل ۷، منحنی مدول سطح مربوط به ایستگاه ۱-SecA را به عنوان مثال نشان می‌دهد. همان‌طور که از شکل مشخص است، با فاصله از محل بارگذاری مدول سطح کاهش یافته و از حس‌گر ششم به بعد تقریباً یک روند ثابت پیدا می‌کند.



شکل ۷. تغییرات مدول سطح با فاصله از محل بارگذاری  
 $E_s$  value at various distances from the loading center

با بررسی نمودارهای مدول سطح با فاصله از محل بارگذاری برای سایر نقاط در سه ایستگاه ۱-SecA، ۱۳-SecA و ۱۵-SecA مشاهده شد که در اکثر نقاط، مدول سطح در حس‌گر ششم (در فاصله‌ی ۹۰ سانتی‌متری از محل بارگذاری) به کمترین مقدار خود می‌رسد. بنابراین برای به دست آوردن  $E_{Smin}$  از تغییرشکل حس‌گر ششم استفاده شده و رابطه‌ی مدول سطح به صورت رابطه‌ی ۲۷ اصلاح شد.

$$E_{S(r)} = \frac{(1-\nu^2)pa^2}{r \cdot D_6}, r = 900mm, a = 150mm, \nu = 0/35 \rightarrow E_{S(r)} = \frac{21/94p}{D_6} \quad (27)$$

نمودار میزان پراکندگی مدول های محاسبه شده با رابطه ۲۳ را از خط  $X=Y$  نشان می دهد. مطابق جدول ۶ مقدار پارامتر RMSE که بیانگر دقت مدل می باشد، برای این مدل ۲۵ درصد یا ۵۲۹ مگاپاسکال محاسبه شده است. نمودار ۹-ب نیز میزان پراکندگی مدول های تخمین زده شده توسط مدل ژو و همکارانش را از مقادیر اصلی مدول بازگشتی آسفالت نشان می دهد که مقدار RMSE برابر ۸۴ درصد یا ۱۹۸۴ مگاپاسکال می باشد. پراکندگی داده ها در نمودار ۹-ج نیز دقت مدل پیشنهادی بهبهانی و صحاف را نشان می دهد که RMSE در آن ۱۹۰ درصد می باشد. با مشاهده میزان پراکندگی مدول های تخمینی توسط مدل ها از مقادیر مدول بازگشتی اصلی برای لایه ی آسفالت در سه نمودار شکل ۹ و هم چنین مقایسه ی مقدار RMSE در جدول ۶، می توان نتیجه گرفت که مدل پیشنهادی در این پژوهش دقت بیشتری از دو مدل مشابه دارد. دقت بالاتر این مدل را می توان به علت در نظر گرفتن تأثیر تنش وارده در پارامترهای مدل دانست. با توجه به اینکه از اطلاعات FWD مربوط به یک کشور دیگر برای ارزیابی این مدل استفاده شد و نتیجه ی اعتبارسنجی تا حدودی قابل قبول بود، پس این مدل به اندازه کافی اعتبار دارد.

انجام شده است و نتایج آن توسط موسسه SHRP با شناسه بخش ۴۶۰۸۰۴ منتشر شده است. هم چنین در این بخش علاوه بر مدل های ارائه شده در این پژوهش، از مدل های مشابه دیگر که در پژوهش های پیشین ارائه شده اند نیز جهت مقایسه بهره گرفته شده است. در بسیاری از پژوهش های مرتبط، مدل های زیادی برای تخمین مدول آسفالت پیشنهاد شده است که شبیه به مدل ارائه شده در پژوهش پیش رو می باشد با این تفاوت که تأثیر تنش به عنوان یک پارامتر مستقل در آن ها دیده نشده است. به عنوان مثال بهبهانی و صحاف<sup>۱</sup> در پژوهش خود مدلی مشابه با رابطه ۲۳ ارائه نمودند که در آن ضرایب پارامترهای  $\log H_{ac}$ ،  $\log BDI$ ،  $\log SCI$  به ترتیب حدوداً ۰/۷، ۸ و ۰/۹ برابر ضرایب رابطه ۲۳ می باشد [۱۸]. هم چنین ژو و همکارانش<sup>۲</sup> مدل دیگری را برای تعیین مدول آسفالت پیشنهاد داده اند که در آن ضرایب پارامترهای  $\log H_{ac}$ ،  $\log BDI$ ،  $\log SCI$  به ترتیب حدوداً ۱/۲، ۱/۱ و ۸ برابر ضرایب رابطه ۲۳ می باشد [۱۰]. برای بررسی دقت رابطه ۲۳ در تخمین مدول بازگشتی آسفالت، از اطلاعات ایستگاه ۱۸۰۴ (منتشر شده توسط موسسه SHRP) مطابق نمودار شکل ۹-الف استفاده شده است. این

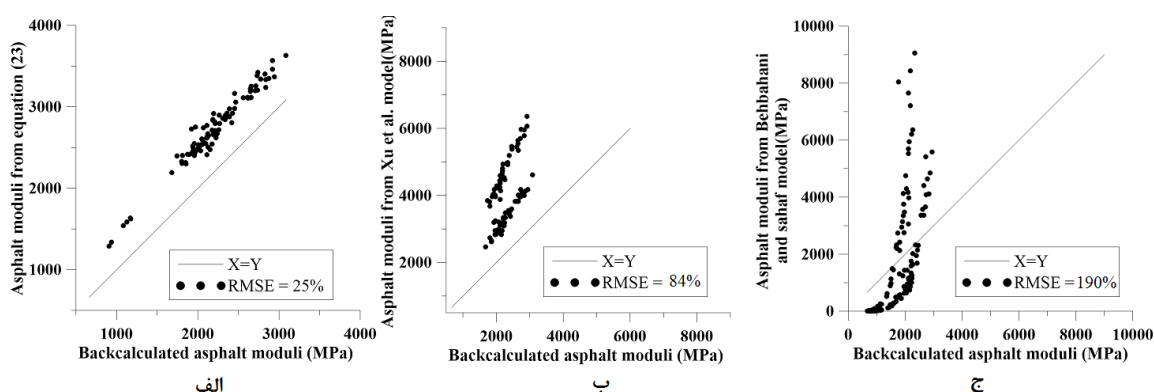
### جدول ۶. بررسی دقت رابطه ۲۳ در تخمین مدول آسفالت در مقایسه با دو مدل مشابه دیگر

#### Investigation of the accuracy of Equation (23) in the estimation of the asphalt modulus compared to other similar models

مدل	میانگین مدول های پیش بینی شده با مدل	میانگین مدول های حاصل از محاسبات بازگشتی	RMSE (%)	RMSE (مگاپاسکال)
رابطه ۲۳	۲۷۲۲	۲۲۰۰	۲۵	۵۲۹
مدل ژو و همکارانش <sup>۱</sup>	۳۹۰۷	۲۲۰۰	۸۴	۱۹۸۴
مدل بهبهانی و صحاف <sup>۲</sup>	۶۰۰۷	۲۲۰۰	۱۹۰	۴۶۳۸

$${}^1 \log E_{ac} = -1/7718 \log SCI - 2/5124 \log H_{ac} + 0/8395 \log BDI + 0/0030 H_{ac} + 7/7696$$

$${}^2 \log E_{ac} = -10/19 \log SCI - 0/898 \log H_{ac} + 5/87 \log BDI + 1/33$$



### شکل ۹. بررسی دقت رابطه ۲۳ در تخمین مدول آسفالت در مقایسه با دو مدل مشابه دیگر

#### Investigation of the accuracy of Equation (23) in the estimation of the asphalt modulus compared to other similar models

اساس، شکل ۱۰ رسم شده است. این شکل میزان پراکندگی مدول های محاسبه شده توسط رابطه ی ۲۵ را که با استفاده از اطلاعات FWD ایستگاه ۱۸۰۴ به دست آمده است، از مقادیر اصلی مدول بازگشتی

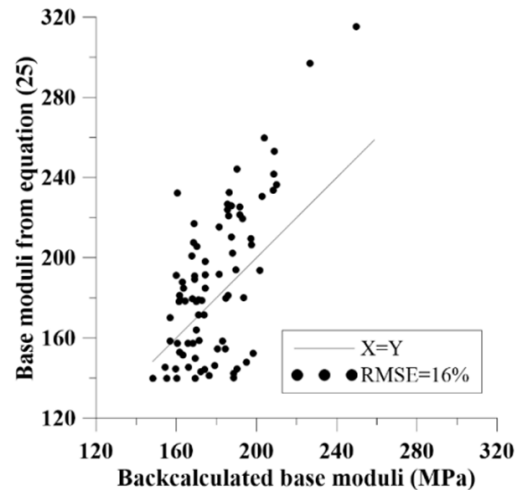
به منظور بررسی صحت عملکرد رابطه ی ۲۵ در تعیین مدول لایه ی

1 Behbahani and Sahaf

2 Xu et al

در انتهای این بخش، به منظور بررسی میزان دقت مدل پیشنهادی در این پژوهش برای بستر در مقایسه با سایر مدل‌های مشابه، از روابط ارائه شده در جدول ۷ استفاده گردید. مدل ژو و همکارانش، مدول بستر را به کمک  $E_{Smin}$ ، ضخامت و مدول لایه‌های آسفالت و اساس تخمین می‌زند [۱۰]. هم‌چنین زیاری و مستوفی افشار<sup>۱</sup> مدول بستر را فقط به پارامتر  $D_{300}$  وابسته کرده‌اند [۲۸]. همان‌طور که از جدول ۷ مشخص است دقت مدل ژو و همکارانش با RMSE برابر با ۳۰ درصد، بیشتر از دو مدل دیگر است. در این مدل پارامترهای  $E_{ac}$  و  $E_{base}$  به چشم می‌خورند که به ترتیب مدول‌های بازگشتی لایه‌ی آسفالت و اساس می‌باشند. بنابراین برای محاسبه‌ی مدول بستر به کمک این رابطه، ابتدا باید مدول‌های آسفالت و اساس تخمین زده شوند. این مسئله را می‌توان به‌عنوان نقطه‌ی ضعف این مدل، تلقی کرد. هم‌چنین در مدل زیاری و مستوفی افشار، پارامتر RMSE برابر با ۷۰ درصد محاسبه شده است که به معنای دقت پایین‌تر این مدل در تخمین مدول برجهندگی بستر در مقایسه با دو مدل دیگر است. مدل پیشنهادی در این پژوهش برای تخمین مدول بستر فقط به پارامترهای کاسه‌ی انحنا و خروجی‌های FWD وابسته است. بنابراین بسیار سریع‌تر و آسان‌تر می‌تواند مستقیماً از خروجی‌های FWD، مدول بازگشتی بستر را پیش‌بینی نماید. از آنجایی که RMSE برای این مدل برابر ۳۵ درصد می‌باشد و حد ۲۵ درصد را ارضا نمی‌کند، می‌توان نتیجه گرفت که این مدل دقت خیلی بالایی در تخمین مدول بستر ندارد. اما با توجه به توضیحات داده شده، این مدل از دو مدل مشابه، بهتر و کاربردی‌تر است و ضمن اینکه این مدل، رفتار مصالح بستر را غیرخطی در نظر می‌گیرد. شکل ۱۱ پراکندگی داده‌های اعتبارسنجی در سه مدل را نسبت به خط  $X=Y$  نشان می‌دهد.

اساس نشان می‌دهد. مقدار RMSE برابر با ۱۶ درصد می‌باشد. از آنجایی که این مدل برای داده‌های یک کشور دیگر نیز جواب داده است، می‌توان گفت که مدل به اندازه کافی اعتبار دارد. اما یکی از نقاط ضعف مدل‌های ارائه شده در روابط ۲۳ و ۲۵، الاستیک خطی فرض کردن رفتار مصالح لایه‌ی آسفالت و اساس می‌باشد، زیرا در واقعیت این‌طور نیست. به همین دلیل ممکن است خروجی‌های این مدل با مقادیر مدول آزمایشگاهی مطابقت چندانی نداشته باشند که البته با استفاده از خروجی‌های این مدل‌ها و به کمک روابط ارائه شده در بخش ۴-۱-۲ می‌توان مقادیر آزمایشگاهی متناظر برای هر لایه را به دست آورد. شایان ذکر است که این روابط، فقط مدول‌های بازگشتی لایه‌های روسازی را مستقیماً از خروجی‌های FWD محاسبه می‌کنند و صرفاً جایگزین یک نرم‌افزار محاسبه معکوسی است که از تحلیل استاتیکی بهره می‌گیرد. با این تفاوت که سریع‌تر و آسان‌تر، مدول‌ها را پیش‌بینی کرده و سختی‌ها و پیچیدگی‌های نرم‌افزارها را ندارد.



شکل ۱۰. بررسی دقت رابطه ۲۵ در تخمین مدول لایه‌ی اساس  
Investigation of the accuracy of Equation (25) in the estimation of the base modulus compared to other similar models

جدول ۷. بررسی دقت رابطه ۲۸ در تخمین مدول بستر در مقایسه با دو مدل مشابه دیگر

Investigation of the accuracy of Equation (28) in the estimation of the subgrade modulus compared to other similar models

مدل	میانگین مدول‌های پیش‌بینی شده با مدل	میانگین مدول‌های حاصل از محاسبات بازگشتی	RMSE (%)	RMSE (مگا پاسکال)
رابطه (۲۸)	۹۳	۱۴۴	۳۵	۵۱
مدل ژو و همکارانش <sup>۱</sup>	۱۰۲	۱۴۴	۳۰	۴۲
مدل زیاری و مستوفی افشار <sup>۲</sup>	۸۶	۱۴۴	۷۰	۶۶

$$1- E_{sg} = \frac{E_{Smin} - 1.9719F_{ac}^2 - 42.3259F_{ac} + 11.8892}{0.0861F_{ac}^2 - 0.3233F_{ac} + 1.1059}, F_{ac} = \frac{H_{ac} \sqrt[3]{E_{ac}} + H_{base} \sqrt[3]{E_{base}}}{4850}$$

$$2- E_{sg} = 31594D_{300}^{-1.1578}$$

و آزمایشگاهی در دو محور شوش-اندیمشک و سمنان-دامغان انجام گرفت و دوش جدید برای تعیین پارامترمدول الاستیسیته با استفاده از داده‌های FWD پیشنهاد گشت. نتایج تحلیل عبارت‌اند از:

- روش جدیدی مبتنی بر محاسبات بازگشتی پیشنهاد شد که الگوریتم آن کد نویسی شد و نتایج آن با نتایج حاصل از نرم‌افزار ELMOD ۶٫۰ مقایسه گردید. مقایسه‌ی نتایج نرم‌افزار ELMOD پیشنهادی با مدول‌های آزمایشگاهی نشان داد که روش پیشنهادی در مقایسه با نرم‌افزار ELMOD بهتر عمل کرده و با دقت بیشتری مدول لایه‌های روسازی را تخمین می‌زند.

- از مقایسه‌ی روند تغییرات نسبت مدول بازگشتی به مدول آزمایشگاهی در مقابل بارورده برای لایه‌های مختلف روسازی این نتیجه حاصل شد که مدول بازگشتی لایه‌ی آسفالت و بستر در نیروهای بیشتر و مدول بازگشتی اساس در نیروهای کمتر به آزمایشگاه نزدیک است. به همین منظور مدل‌هایی ارائه شدند که مدول بازگشتی در یک نیرو را برای نیروهای دیگر نرمالیزه می‌کند. هم‌چنین مدل‌های دیگری ارائه شدند که مدول آزمایشگاهی را با استفاده از مدول‌های بازگشتی تخمین می‌زند.

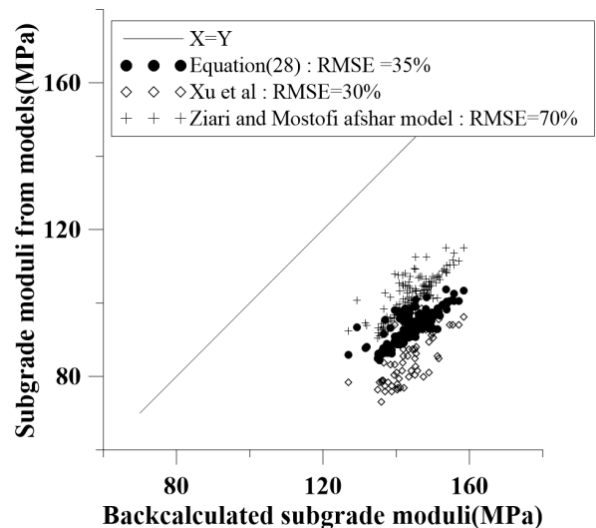
- روش دوم، مبتنی بر پارامترهای مستقل ارائه شد که سه مدل مجزا به منظور تعیین مدول آسفالت، اساس و بستر ارائه شد. این مدل‌ها با استفاده از پارامترهایی همچون بارورده در آزمایش FWD، پارامترهای کاسه‌ی انحنای ضریب پواسون و دیگر موارد مدول‌ها را تخمین می‌زنند. نتایج اعتبارسنجی این مدل‌ها نشان داد که مقادیر حاصل از آن با تقریب خوبی منطبق بر نتایج محاسبات معکوس می‌باشد.

- مدل‌های ارائه‌شده بر پایه‌ی پارامترهای مستقل، مدول لایه‌های روسازی را سریع‌تر از محاسبات بازگشتی و بدون احتیاج به دشواری‌های الگوریتم سعی و خطا تخمین می‌زنند. بنابراین از نظر صرفه‌جویی در زمان و سهولت در تحلیل، مدل‌های مبتنی بر پارامترهای مستقل نسبت به روش پیشنهادی (بر پایه‌ی محاسبات بازگشتی) در اولویت قرار دارند. اما از نظر دقت پیش‌بینی مدول الاستیسیته، روش مبتنی بر محاسبات بازگشتی تا حدودی بهتر عمل کرده‌است.

## مراجع

[1] P. Icenogle, M.S. Kabir, Evaluation of Non-destructive Technologies for Construction Quality Control of HMA and PCC Pavements in Louisiana, Louisiana Transportation Research Center, Louisiana Department of Transportation and Development, Baton Rouge, 2013.

[2] B.H. Nam, J. An, M. Kim, M.R. M., Z. Zhang, Improvements to the structural condition index (SCI) for pavement structural evaluation at network level, International Journal of



شکل ۱۱. بررسی دقت رابطه ۲۸ در تخمین مدول بستر در مقایسه با دو مدل مشابه دیگر  
Investigation of the accuracy of Equation (28) in the estimation of the subgrade modulus compared to other similar models

## ۵- مقایسه‌ی روش محاسبات بازگشتی پیشنهادی و مدل‌های مبتنی بر پارامترهای مستقل

همان‌طور که در بخش‌های ۱-۴ و ۲-۴ توضیح داده شده‌است، دو روش برای تعیین مدول الاستیسیته لایه‌های روسازی ارائه شد. روش اول مبتنی بر محاسبات بازگشتی و روش دوم بر پایه‌ی پارامترهای مستقل بوده‌است. محاسبات بازگشتی یک فرآیند تکراری و زمان‌بر است که برای انجام آن به یک رایانه شخصی با سرعت داده‌پردازی تقریباً بالا و ظرفیت کافی نیاز است [۲۸]. علاوه بر آن برای تحلیل به کمک محاسبات بازگشتی، نیاز به یک مدول فرضی اولیه و انجام الگوریتم سعی و خطا است. بنابراین روش پیشنهادی ارائه‌شده مبتنی بر محاسبات بازگشتی، یک فرآیند زمان‌بر و نسبتاً پیچیده و دشوار است. اما مدل‌های ارائه‌شده مبتنی بر پارامترهای مستقل، قادرند مدول لایه‌های روسازی را سریع و بدون نیاز به محاسبات بازگشتی و دشواری‌های الگوریتم سعی و خطا پیش‌بینی کنند. بنابراین از نظر صرفه‌جویی در زمان و سهولت در تحلیل، مدل‌های مبتنی بر پارامترهای مستقل نسبت به روش پیشنهادی (بر پایه‌ی محاسبات بازگشتی) در اولویت قرار دارند. اما از نظر دقت پیش‌بینی مدول الاستیسیته، روش مبتنی بر محاسبات بازگشتی تا حدودی بهتر عمل کرده‌است.

## ۶- نتیجه‌گیری

در این پژوهش به منظور ارائه روش‌های جدید برای تعیین مدول الاستیسیته توسط اندازه‌گیری‌های آزمایش FWD، بررسی‌های میدانی

under rubblised PCC slabs using multilevel FWD loads, *International Journal of Pavement Engineering*, 10(1) (2009) 9-18.

[15] K. Gopalakrishnan, S. Kim, H. Ceylan, O. Kaya, *Development of Asphalt Dynamic Modulus Master Curve Using Falling Weight Deflectometer Measurements*, Iowa Department of Transportation, Ames, 2014.

[16] B. Izevbekhai, N. Pederson, *Investigation of Deflection and Vibration Dynamics of Concrete and Bituminous Pavements Constructed Over Geofoam* Minnesota Department of Transportation, Paul, 2010.

[17] S. Kumlai, B. Sangpetngam, S. Chalermpong, *Development of Equations for Determining Layer Elastic Moduli Using Pavement Deflection Characteristics*, Transportation Research Board, 2014.

[18] H. Behbahani, S.A. Sahaf, *Designing a Mathematical Model for Predicting the Mechanical Characteristics of Asphalt Pavements Using Dynamic Loading*, *International Journal of Civil Engineering*, 5(3) (2007) 236-245.

[19] ASTM D6432-11, *Standard guide for using the surface ground penetrating radar method for subsurface investigation*, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2011.

[20] A.K. Appea, *Validation of FWD Testing Results at the Virginia Smart Road: Theoretically and by Instrument Responses*, Virginia Polytechnic Institute and State University, Virginia, Blacksburg, 2003.

[21] E.O. Klu, *Correlation between the dynamic cone penetration index and the subgrade resilient modulus obtained from the Falling Weight Deflectometer*, Kwame Nkrumah University of Science and Technology, Kumasi, Ghana, 2011.

[22] A.T. Papaginnakis, E.A. Masad, *Pavement Design and materials*, John Wiley & Sons, Inc, USA, New Jersey, Hoboken, 2007.

[23] P. Ullidtz, *Pavement Analysis*, Elsevier, Amsterdam, the Netherlands, 1987.

[24] A. Nega, H. Nikraz, I.A. Al-Qadi, *Dynamic analysis of falling weight deflectometer*, *Journal of traffic and transportation engineering*, 3(5) (2016) 427-437.

[25] G.R. Rada, C.A. Richter, P. Jordahl, *SHRP's Layer Moduli Backcalculation Procedure*, ASTM international, Washington, DC, 1994.

[26] E. Horak, S. Emery, J. Maina, *Review of Falling Weight Deflectometer Deflection Benchmark Analysis on Roads and Airfields*, in: *Conference on Asphalt Pavements in Southern Africa (CAPSA)*, Suncity South Africa, 2015.

*Pavement Engineering*, 17(8) (2015) 680-697.

[3] ASTM D4694-09, *Standard test method for deflections with a falling-weight-type impulse load device*, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2015.

[4] M.Y. Shahin, *Pavement Management for Airports, Roads, and Parking Lots*, Springer, USA, New York, 2006.

[5] A. Kavussi, M. Abbasghorbani, F. Moghadas Nejad, A.B. Ziksari, *A new method to determine maintenance and repair activities at network-level pavement management using falling weight deflectometer*, *Journal of Civil Engineering and Management*, 23(7) (2017) 338-346.

[6] H. Schnoor, E. Horak, *Possible method of determining structural number for flexible pavements with the falling weight deflectometer*, in *Proceedings of the 31th Southern African Transport Conference (SATC 2012)*, Pretoria, South Africa, (2012) 94-109.

[7] M.Y. Kim, D.Y. Kim, M.R. Murphy, *Improved Method for Evaluating the Pavement Structural Number with Falling Weight Deflectometer Deflections*, *Transportation Research Record*, (2013) 120-126.

[8] O. Elbagalati, M. Elseifi, K. Gaspard, Z. Zhang, *Development of the pavement structural health index based on falling weight deflectometer testing*, *International Journal of Pavement Engineering*, 2016.

[9] J. Bryce, G. Flintsch, S. Katicha, B. Diefenderfer, *Developing a Network-Level Structural Capacity Index for Structural Evaluation of Pavements*, *Journal of Transportation Engineering*, 139(2) (2013) 123-129.

[10] B. Xu, S.R. Ranjithan, Y.R. Kim, *New relationships between falling weight deflectometer deflection and asphalt pavement layer condition indicators*, *Transportation Research Record*, (2002) 48-56.

[11] M. Li, H. Wang, *Development of ANN-GA program for backcalculation of pavement moduli under FWD testing with viscoelastic and nonlinear parameters*, *International Journal of Pavement Engineering*, 2017.

[12] S.S. Madsen, E. Levenberg, *Dynamic backcalculation with different load-time histories*, *Road Materials and Pavement Design*, 2017.

[13] A. Kavussi, N. Soltanifar, *Analysis of backcalculations result in FWD test for asphalt pavement*, *First Transport Infrastructure Conference (TIC)*, Iran University of Science and Technology, Iran, 2013.

[14] S. Mun, Y.R. Kim, *Backcalculation of subgrade stiffness*



[28] H. ziari, A.M. Afshar, Quick estimation of subgrade modulus with FWD measurement, in 4th Conference on Asphalt and Asphalt Mixes, University of Tehran, Tehran, IRAN, (2008). (In Persian)

[27] F.W. Jung, D.F.E. Stolle, Nondestructive Testing with Falling Weight Deflectometer on Whole and Broken Asphalt Concrete Pavements, Transportation Research Board, (1377) (1992) 183-192.

برای ارجاع به این مقاله از عبارت زیر استفاده کنید:



Please cite this article using:

N. Kheradmandi, A. Modarres, Precision of Elastic Moduli Prediction Using Back-Calculation and Independent Parameters Models in Comparison with Experimental Studies, Amirkabir J. Civil Eng., 51(2)(2019)267-283.

DOI: 10.22060/ceej.2017.13392.5400