

مطالعه ارتباط مدول استاتیک و دینامیک خاکریز راه‌آهن سریع‌السير

مرتضی اسماعیلی، دانشیار، دانشکده مهندسی راه‌آهن، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران

مینا معماری، کارشناس ارشد مهندسی عمران- راه و ترابری، تهران

فاطمه خطیبی*، دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی راه‌آهن، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران

E-mail: f_khatibi@iust.ac.ir

دریافت: ۹۳/۱۱/۱۰ - پذیرش: ۹۴/۰۳/۱۷

چکیده

مدول الاستیسیته استاتیک به دست آمده از سیکل دوم آزمایش بارگذاری صفحه (E_{v2}) پارامتری کلیدی در تعیین میزان ظرفیت باربری و نشست خاکریز راه‌آهن و در نتیجه ارزیابی کیفیت خط است. در خطوط سریع‌السير، تأمین ظرفیت باربری و کنترل نشست لایه‌های زیرسازی، نسبت به خطوط معمولی، از اهمیت بیشتری برخوردار است. لذا، آئین‌نامه‌های زیرسازی راه‌آهن سریع‌السير، مقدار مجاز پارامتر E_{v2} را برای هر لایه از خاکریز به طور مجزا تعریف می‌کنند. آزمایش بارگذاری صفحه، که برای تعیین E_{v2} صورت می‌گیرد، پرهزینه و زمان‌بر است. ولی آزمایش‌هایی مانند افت و خیزسنج ضربه‌ای سبک که مدول دینامیک خاکریز را اندازه‌گیری می‌کنند مقرون به صرفه‌تر هستند. در این مقاله، نتایج به دست آمده از آزمایش‌های میدانی بارگذاری صفحه و افت و خیزسنج ضربه‌ای سبک، که روی لایه‌های مختلف خاکریز در کیلومترهای مختلفی از مسیر راه‌آهن سریع‌السير قم- اصفهان انجام گرفته، پردازش شده و رابطه میان آنها به کمک روش‌های رگرسیون خطی و غیرخطی تعیین شده است. ارتباط میان نتایج این داده-های میدانی با نتایج تعدادی تست آزمایشگاهی در مورد نسبت باربری کالیفرنیا نیز به روشی مشابه استخراج شده است. همچنین، با به‌کارگیری تحلیل بازگشتی، مدول استاتیک و دینامیک هر لایه به تفکیک تعیین شده است.

واژه‌های کلیدی: آزمایش بارگذاری صفحه، آزمایش افت و خیزسنج ضربه‌ای سبک، نسبت باربری کالیفرنیا، مدول الاستیسیته، تحلیل بازگشتی

۱. مقدمه

مشخصات فنی، تأمین ایمنی حرکت قطار در سراسر طول خط و ایجاد شتاب قابل تحمل برای مسافری، دو چالش مهم در طراحی خطوط پرسرعت هستند. حل این چالش‌ها با محدود نمودن نشست‌های آبی و بلندمدت لایه‌های روسازی و زیرسازی مسیر ممکن می‌گردد. به دلیل سرعت قابل توجه و ارتعاشات زیاد ناشی از حرکت قطارهای سریع‌السير، ضوابط مربوط

در سال‌های اخیر، افزایش تعداد مسافر، محدودیت ظرفیت ناوگان هوایی و آسیب‌های زیست‌محیطی ناشی از سوخت هواپیماها، قطارهای سریع‌السير را به مطلوب‌ترین سیستم حمل و نقل در سرعت سیر بیشتر از ۲۰۰ کیلومتر بر ساعت تبدیل نموده است. از دیدگاه

می‌کنند، تاکنون تحقیقات زیادی در راستای استخراج رابطه میان نتایج آزمایش‌های اندازه‌گیری مدول الاستیسیته استاتیک و دینامیک صورت گرفته است.

آیین‌نامه آلمان در سال ۱۹۸۷، رابطه‌ای برای محاسبه نتیجه آزمایش بارگذاری صفحه از روی نتایج آزمایش LFWD ارائه کرده است. مقایسه مدول استاتیک به‌دست آمده از روش‌های آزمایشگاهی با مدول دینامیک آزمایش FWD در کارولینای شمالی نشان داد که نسبت مدول استاتیک به مدول دینامیک به‌دست آمده از FWD بین ۰/۱۸ و ۲/۴۴ تغییر می‌کند (علی و خوسلا، ۱۹۸۷). در تحقیقات مشابهی در ایالت واشنگتن، این نسبت بین ۰/۸ و ۱/۳ به‌دست آمد (نیوگمب، ۱۹۸۷). محققین دیگری با مطالعه عملکرد درازمدت لایه‌های روسازی، این نسبت را بیش از ۰/۱ و کمتر یا مساوی ۳/۵ محاسبه نموده‌اند (فون کینتاس و کیلینگزورث، ۱۹۹۸). در تحقیقات سایر محققین در این زمینه، براساس نوع لایه‌های روسازی، نسبت‌های مختلفی بین مدول استاتیک تعیین شده در آزمایشگاه و مدول دینامیک میدانی به‌دست آمده است. در یک نمونه از این تحقیقات، مدول استاتیک آزمایشگاهی تقریباً دو برابر مدول دینامیک تست FWD محاسبه شده است (چن و همکاران، ۱۹۹۹). بر اساس نتایج پروژه تحقیقاتی مینه‌سوتا، انجام آزمایش FWD روی لایه ساب‌گرید با مشکلات زیادی همراه است و رابطه ضعیفی بین مدول به‌دست آمده از آن و مدول استاتیک آزمایشگاهی به‌دست می‌آید (ون دوسان و همکاران، ۱۹۹۴؛ کامارگو و همکاران، ۲۰۰۶). اما در مطالعات صورت گرفته در ایالت می‌سی‌سی‌پی در مورد لایه بستر راه، با استفاده از تست FWD، رابطه قویتری بین نتایج این تست و تست‌های آزمایشگاهی اندازه‌گیری مدول الاستیسیته استاتیک حاصل شده است (جرج، ۲۰۰۳).

مروری بر تحقیقات انجام شده در این حوزه نشان می‌دهد که رابطه منحصر به فردی بین دو مدول

به زیرسازی این خطوط با ضوابط زیرسازی خطوط معمولی متفاوت است. آیین‌نامه اتحادیه بین‌المللی راه‌آهن‌ها (UIC716R) و نشریه ۳۹۴ سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی کشور، رعایت حدود مشخصی از E_{v2} را برای هر یک از لایه‌های زیرسازی ضروری می‌دانند. نشریه ۲۷۹ سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی کشور نیز رعایت حد مشخصی از درصد تراکم و شاخص CBR شرایط اشباع را برای هر لایه الزامی کرده است.

آزمایش بارگذاری صفحه، به عنوان روش تعیین E_{v2} ، یک آزمایش پرهزینه و زمان‌بر است. با افزایش طول و عرض خاکریز مورد بررسی، تعداد آزمایش‌های مورد نیاز در مقاطع طولی و عرضی افزایش یافته و با افزایش ارتفاع خاکریز، باید آزمایش را در ترازهای ارتفاعی مختلف تکرار نمود. لذا، به دلیل صرف زمان و هزینه قابل توجه، اندازه‌گیری E_{v2} تمام لایه‌ها از نظر اجرایی امکان‌پذیر نبوده و جایگزینی سریعتر و ارزان‌تر، ضروری به‌نظر می‌رسد.

در سال ۱۹۹۳، راهنمای طراحی آیین‌نامه آشتو، مدول برجهندگی M_R را به عنوان پارامتری برای ارزیابی روسازی راه معرفی نموده و روش استاندارد آزمایش جهت تعیین آن را ارائه نموده است. اما به دلیل پیچیدگی روش‌های آزمایشگاهی تعیین M_R ، آزمایش‌های میدانی ساده‌تری برای این منظور ابداع شده‌اند. آزمایش افت و خیزسنج ضربه‌ای (FWD)، اولین آزمایش در این حوزه است که با اندازه‌گیری تغییر شکل لایه مورد نظر و انجام محاسبات معکوس، مدول الاستیسیته دینامیک، E_h ، لایه‌های روسازی و زیرسازی راه را تعیین می‌نماید. به دلیل هزینه زیاد این آزمایش، نیاز به واسنجی منظم دستگاه و حضور اپراتور آموزش دیده، دستگاه این آزمایش اصلاح و تکمیل گردید و آزمایش‌های افت و خیزسنج ضربه‌ای سبک (LFWD و LWD) ابداع گردیدند. با توجه به وجود روابط آیین‌نامه‌ای مبتنی بر E_{v2} و سهولت بیشتر در انجام آزمایش‌هایی که پارامتر E_h را اندازه‌گیری

مدول الاستیسیته استاتیک و دینامیک، مدول استاتیک هر یک از لایه‌های خاکریز محاسبه شده است.

۲. مواد و روش‌ها

۲-۱. معرفی مسیر مورد بررسی و آزمایش‌ها

راه آهن سریع‌السیر تهران-قم-اصفهان اولین خط ریلی پُر سرعت ایران است. اجرای بخش قم-اصفهان در این پروژه از سال ۱۳۸۶ با طول ۴۱۸ کیلومتر و برای سرعت طرح ۳۵۰ کیلومتر بر ساعت آغاز شده است. شکل ۱ پلان این مسیر را روی یک عکس هوایی نشان می‌دهد. به منظور کنترل کیفیت بستر طبیعی و خاکریز، در طول مسیر تعداد زیادی آزمایش بارگذاری صفحه، افت و خیزسنج ضربه‌ای سبک و نسبت باربری کالیفرنیا انجام شده‌است. نتایج آزمایش‌های انجام شده در کیلومترهای ۰+۰۰۰ تا ۵۰+۰۰۰ در این مقاله پردازش شده‌اند. با توجه به تنوع خاک در طول مسیر، نتایج آزمایش‌های انجام شده روی مصالح خاکی از نوع CL، GM-GC، GM، SC، SM-SC و SM به‌دست آمده‌اند. در ادامه، جزئیات بیشتری از هر یک از آزمایش‌ها شرح داده شده است.

الاستیسیته استاتیک و دینامیک وجود ندارد و چنین رابطه‌ای باید برای هر پروژه به صورت جداگانه تعیین گردد. همچنین، روابط ارائه شده تاکنون، که در این حوزه به آنها اشاره می‌شود، به تحقیقات صورت گرفته روی لایه‌های روسازی و زیرسازی راه اختصاص دارند و در خصوص ارتباط میان E_{v2} و E_h خاکریزهای راه آهن، رابطه‌ای شاخص در ادبیات موضوع دیده نمی‌شود. از این رو، تعیین رابطه‌ای دقیق و کارآمد بین مدول الاستیسیته استاتیک و دینامیک خاکریز راه آهن ضروری به نظر می‌رسد.

در این مقاله، با هدف دستیابی به چنین رابطه‌ای، نتایج آزمایش‌های بارگذاری صفحه، افت و خیزسنج ضربه‌ای سبک و نسبت باربری کالیفرنیا که روی خاکریز راه آهن سریع‌السیر تهران-قم-اصفهان (بخش قم-اصفهان) انجام شده‌اند، پردازش شده و با کمک روش‌های رگرسیون خطی و غیرخطی، روابط میان نتایج آزمایش‌ها به‌دست آمده است. همچنین، با استفاده از انجام تحلیل بازگشتی نتایج آزمایش افت و خیزسنج ضربه‌ای سبک، مدول الاستیسیته دینامیک لایه‌های زیربالاست، بستر و بستر طبیعی به تفکیک محاسبه شده است. سپس، با استفاده از روابط تحلیلی موجود میان



شکل ۱. نقشه هوایی مسیر راه آهن قم-اصفهان

توسعه و تکامل تست FWD به‌دست آمده، دارای دستگاهی سبک و قابل حمل بوده و اجرای آن نیاز به مهارت زیادی ندارد. استقرار دستگاه در محل و

۲-۲. آزمایش افت و خیزسنج ضربه‌ای سبک

آزمایش افت و خیزسنج ضربه‌ای سبک^۱ (LWD) که از

1- Light Weight Deflectometer

لایه‌های خاکریز در آئین‌نامه‌های راه آهن است. در مسیر راه آهن قم- اصفهان، به منظور ایجاد امکان مقایسه میان نتایج آزمایش‌ها، محل انجام تست‌های بارگذاری صفحه و افت و خیز سنج ضربه‌ای سبک منطبق می‌باشند. اما به دلیل اینکه انجام آزمایش بارگذاری صفحه مستلزم صرف زمان و هزینه بیشتر است، تعداد ۱۴۰ تست بارگذاری صفحه با دو نوع صفحه بارگذاری مربعی (با بُعد ۳۰ سانتی‌متر) و دایره‌ای (با قطر ۴۵ سانتی‌متر) در طول مسیر انجام شده است. شکل ۳ تصویر یکی از آزمایش‌های صورت گرفته در مسیر را نشان می‌دهد.

۲-۴. آزمایش نسبت باربری کالیفرنیا

آزمایش تعیین نسبت باربری کالیفرنیا^۲ به طور گسترده جهت بررسی کیفیت مصالح خاکریز، زیراساس و اساس راه‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد. این آزمایش روی نمونه‌هایی از خاک که با درصد رطوبت بهینه طبق استاندارد ASTM-D۶۹۸ و یا ASTM-D۱۵۵۷ متراکم شده‌اند، انجام می‌شود. محاسبه عدد CBR مطابق رابطه (۱) صورت می‌پذیرد:



شکل ۳. آزمایش بارگذاری صفحه در مسیر خاکریز راه آهن قم- اصفهان

داده‌برداری با سرعت زیادی صورت می‌پذیرد. دستگاه دارای صفحاتی به قطر ۱۵ و ۳۰ سانتی‌متر بوده و اعمال بار ضربه‌ای با سقوط وزنه ۱۰ کیلوگرمی از ارتفاع ۵ اینچ (۰/۱۲۷ متر) الی ۲۷ اینچ (۰/۶۸۶ متر) صورت می‌گیرد. تاریخچه زمانی نیرو با استفاده از نیروسنج با دقت ۰/۳ نیوتن، و حداکثر افت و خیز ایجاد شده توسط ژئوفون و با دقت ۰/۱ میکرون اندازه‌گیری می‌شود. استفاده از این آزمایش در مسیر راه آهن قم- اصفهان اولین تجربه کاربرد این آزمایش در راه آهن ایران است. در طول این مسیر، از کیلومتر ۱+۰۰۰ تا ۴۸+۵۰۰، تعداد ۷۸۵۰ تست افت و خیز سنج ضربه‌ای سبک انجام شده است. شکل ۲ تصویر دستگاه در مسیر مورد بررسی را نشان می‌دهد.



شکل ۲. استقرار دستگاه افت و خیز سنج ضربه‌ای سبک در مسیر خاکریز راه آهن قم- اصفهان

۲-۳. آزمایش بارگذاری صفحه

آزمایش بارگذاری صفحه^۱، آزمایشی شناخته شده و قدیمی برای تعیین مدول الاستیسیته استاتیک خاک است. مدول الاستیسیته سیکل دوم بارگذاری این دستگاه که با نام E_{v2} شناخته می‌شود معیار ارزیابی

2- California Bearing Ratio

1- Plate Load Test

۲-۵. پردازش اطلاعات و استخراج روابط

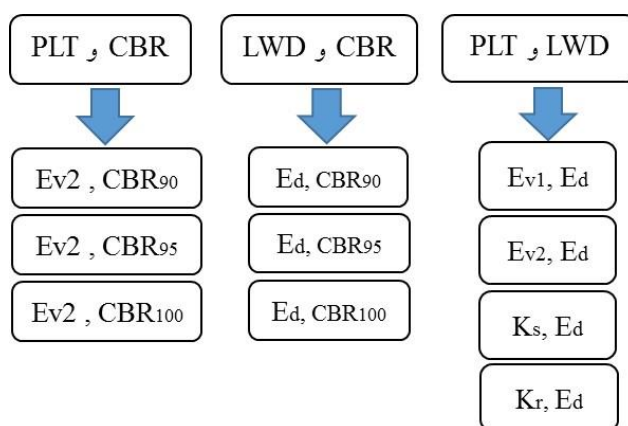
برای استخراج رابطه میان مدول الاستیسیته استاتیک و دینامیک و همچنین مدول الاستیسیته استاتیک و عدد CBR، از روش‌های رگرسیون با توابع خطی، سهموی و نمایی استفاده شده است. ضریب همبستگی در فرایند رگرسیون بیانگر میزان نزدیکی رابطه به دست آمده به نتایج واقعی مورد استفاده است. هر چقدر ضریب همبستگی به عدد یک نزدیک‌تر باشد خطای رابطه استخراج شده کمتر خواهد بود. در ادامه، روابط استخراج شده میان نتایج آزمایش‌های مختلف ارائه شده و رابطه‌ای که کمترین میزان خطا را داشته به عنوان رابطه بهینه انتخاب شده است. پارامترهای خروجی هر یک از آزمایش‌ها در جدول ۱ معرفی شده‌اند. شکل ۴، دسته‌بندی آزمایش‌هایی که داده‌های آنها در کنار یکدیگر پردازش شده و رابطه‌ای میان آنها استخراج شده است را نشان می‌دهد.

$$CBR = \frac{\sigma_{0.1} \text{ or } \sigma_{0.2}}{\sigma_s} \times 100 \quad (1)$$

که $\sigma_{0.1}$ و $\sigma_{0.2}$ به ترتیب تنش لازم جهت فرو بردن پیستونی با سطح مقطع ۳ اینچ مربع (۱۹/۳۵ سانتی‌متر مربع) به درون خاک متراکم شده با درصد رطوبت بهینه تا عمق ۰/۱ یا ۰/۲ اینچ (۰/۲۵۴ یا ۰/۵۰۸ سانتی‌متر) و σ_s تنش استاندارد است که مقدار آن ۷۰ و یا ۱۰۵ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع در نظر گرفته می‌شود. در مسیر پروژه راه‌آهن سریع‌السیر قم-اصفهان، از کیلومتر ۱+۰۰۰ تا ۴۸+۵۰۰ حدود ۸۰ تست CBR و ۱۲۰ آزمایش سنجش تراکم انجام شده است.

جدول ۱. معرفی پارامترهای خروجی آزمایش‌های مورد بررسی

مدول الاستیسیته استاتیک سیکل اول بارگذاری	E_{v1}	آزمایش بارگذاری صفحه (PLT)
مدول الاستیسیته استاتیک سیکل دوم بارگذاری	E_{v2}	
ضریب عکس‌العمل بستر طبیعی در سیکل اول بارگذاری	K_s	
ضریب عکس‌العمل بستر طبیعی در سیکل دوم بارگذاری	K_r	
مدول الاستیسیته دینامیک	E_d	آزمایش افت و خیزسنج ضربه‌ای سبک (LWD)
شاخص نسبت باربری کالیفرنیا برای خاک با تراکم ۹۰٪	CBR_{90}	آزمایش نسبت باربری کالیفرنیا (CBR)
شاخص نسبت باربری کالیفرنیا برای خاک با تراکم ۹۵٪	CBR_{95}	
شاخص نسبت باربری کالیفرنیا برای خاک با تراکم ۱۰۰٪	CBR_{100}	



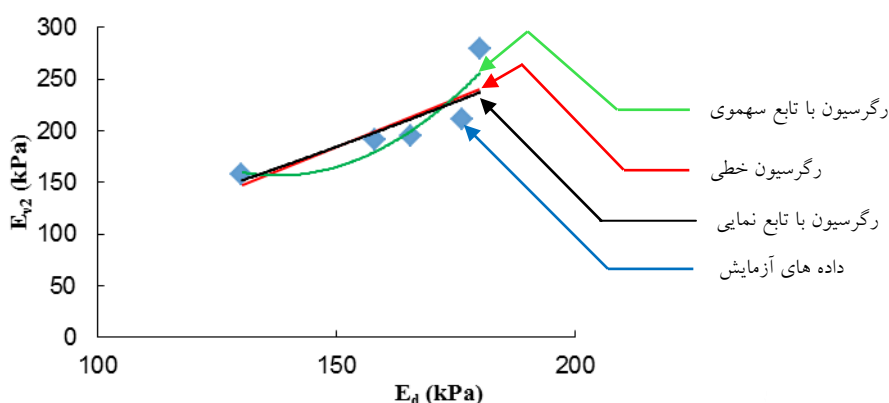
شکل ۴. دسته‌بندی داده‌های مورد بررسی آزمایش‌ها برای استخراج رابطه

۳. نتایج و بحث

۳-۱. تعیین روابط میان نتایج آزمایش‌های بارگذاری صفحه و افت و خیزسنج ضربه‌ای سبک

بر اساس جدول ۱، مدول الاستیسیته استاتیک و ضریب واکنش بستر طبیعی خروجی‌های آزمایش بارگذاری

صفحه و مدول الاستیسیته دینامیک خروجی آزمایش افت و خیزسنج ضربه‌ای سبک می‌باشد. به عنوان نمونه‌ای از نحوه استخراج توابع رگرسیون میان نتایج این دو آزمایش، منحنی‌های برازش یافته میان E_d و E_{v2} خاک رده SM در شکل ۵ نشان داده شده است.



شکل ۵. منحنی‌های برازش یافته میان E_d و E_{v2} خاک نوع SM

توابع رگرسیون میان نتایج مدول‌ها در جدول ۲ ارائه شده است. همانطور که در شکل ۵ مشاهده می‌گردد، و ضرایب همبستگی جدول ۲ نیز نشان می‌دهند، رابطه مربوط به رگرسیون با تابع سهموی کمترین میزان خطا را دارد. این فرایند برای خاک نوع SW-SM نیز تکرار گردید و بهترین رابطه از رگرسیون با تابع سهموی استخراج گردید. این عملیات برای استخراج رابطه میان دو مدول E_d و E_{v1} تکرار شده و خلاصه

نتایج در جدول ۳ ارائه گشته است. همانطور که مشاهده می‌گردد، این بار، در مورد خاک نوع SW-SM، استفاده از تابع نمایی به رابطه دقیق‌تری میان مدول استاتیک و دینامیک منجر شده است. اما به هر حال، مقایسه ضرایب همبستگی نشان می‌دهد که در مورد هر دو نوع خاک، بین E_d و E_{v2} نسبت به E_d و E_{v1} ، رابطه قوی‌تری وجود دارد، هرچند این تفاوت قابل ملاحظه نیست.

جدول ۲. روابط به دست آمده از برازش منحنی میان E_d و E_{v2}

رابطه استخراج شده میان E_d و E_{v2}	ضریب همبستگی	نوع خاک
$E_{v2} = 1.870 E_d - 96.08$	$R^2 = 0.680$	SM
$*E_{v2} = 0.055 E_d^2 - 15.34 E_d + 1213$	$R^2 = 0.807$	
$E_{v2} = 0.186 E_d^{1.376}$	$R^2 = 0.740$	
$E_{v2} = 0.775 E_d - 1.068$	$R^2 = 0.800$	SW-SM
$*E_{v2} = 0.002 E_d^2 - 0.613 E_d + 191.5$	$R^2 = 0.866$	
$E_{v2} = 1.619 E_d^{0.862}$	$R^2 = 0.656$	

*رابطه بهینه

جدول ۳. روابط نهایی به دست آمده از برازش منحنی میان E_{v1} و E_d

رابطه استخراج شده میان E_{v1} و E_d	ضریب همبستگی	نوع خاک
$E_{v1} = 0.264 E_d + 1.488$	$R^2 = 0.756$	
$*E_{v1} = -0.002 E_d^2 + 1.148 E_d - 85.34$	$R^2 = 0.791$	SM
$E_{v1} = 0.210 E_d^{1.047}$	$R^2 = 0.734$	
$E_{v1} = 0.149 E_d + 30.85$	$R^2 = 0.749$	
$E_{v1} = -0.0003 E_d^2 + 0.39 E_d - 4.6$	$R^2 = 0.8009$	SW-SM
$*E_{v1} = 1.653 E_d^{0.67}$	$R^2 = 0.811$	

*رابطه بهینه

روابط میان مدول دینامیک آزمایش افت و خیزسنج ضربه‌ای سبک و ضرایب واکنش بستر طبیعی آزمایش بارگذاری صفحه، در جداول ۴ و ۵ ارائه شده‌اند. نگاهی به ضرایب همبستگی نشان می‌دهد که رابطه بین E_d و K_r نسبت به سایر روابط تحقیق شده قویتر بوده و خطای کمتری دارد.

جدول ۴. روابط به دست آمده از برازش منحنی میان K_s و E_d

رابطه استخراج شده میان K_s و E_d	ضریب همبستگی	نوع خاک
$K_s = 0.064 E_d + 14.49$	$R^2 = 0.594$	
$*K_s = -0.0003 E_d^2 + 0.205 E_d - 1.52$	$R^2 = 0.651$	SM
$K_s = 1.19 E_d^{0.590}$	$R^2 = 0.649$	
$K_s = 0.144 E_d - 7.568$	$R^2 = 0.678$	
$*K_s = -0.000 E_d^2 + 0.386 E_d - 31.11$	$R^2 = 0.702$	SW-SM
$K_s = 0.009 E_d^{1.458}$	$R^2 = 0.768$	
$K_s = 0.057 E_d + 14.97$	$R^2 = 0.774$	
$*K_s = 0.0001 E_d^2 - 0.0162 E_d + 26.18$	$R^2 = 0.791$	SC
$K_s = 1.656 E_d^{0.521}$	$R^2 = 0.663$	

*رابطه بهینه

جدول ۵. روابط نهایی به دست آمده از برازش منحنی میان K_r و E_d

رابطه استخراج شده میان K_r و E_d	ضریب همبستگی	نوع خاک
$K_r = 0.130 E_d + 46.56$	$R^2 = 0.778$	
$*K_r = -0.0009 E_d^2 + 0.591 E_d - 5.758$	$R^2 = 0.971$	SM
$K_r = 6.436 E_d^{0.458}$	$R^2 = 0.841$	
$K_r = 0.132 E_d + 16.71$	$R^2 = 0.806$	
$*K_r = 0.000 E_d^2 - 0.017 E_d + 38.96$	$R^2 = 0.819$	SW-SM
$K_r = 1.191 E_d^{0.676}$	$R^2 = 0.626$	
$K_r = 0.266 E_d - 0.076$	$R^2 = 0.896$	
$*K_r = 0.0006 E_d^2 - 0.151 E_d + 62.88$	$R^2 = 0.932$	SC
$K_r = 0.392 E_d^{0.931}$	$R^2 = 0.916$	

*رابطه بهینه

شده است. در تحقیقات ایالت می‌سی‌سی‌پی، آزمایش‌های FWD و PLT روی ۱۰ قطعه بستر، شامل دامنه گستره‌ای از انواع خاک‌ها، انجام شده است. با توجه به تعداد آزمایش‌های صورت گرفته و دامنه وسیع خاک‌های مورد بررسی، رابطه ایالت

در بعضی موارد، ضریب K_r با K_{30} نشان داده می‌شود که منظور از آن ضریب عکس‌العمل سیکل دوم آزمایش بارگذاری صفحه، با صفحه بارگذاری مربعی ۳۰ سانتی‌متری می‌باشد. در ادبیات فنی، روابطی میان E_1 و K_{30} بستر طبیعی جاده‌ها توسط محققین ارائه

می‌سی‌سی‌پی یکی از روابط معتبر در این زمینه محسوب می‌شود. روابط بهینه به دست آمده از این تحقیق و رابطه ایالت می‌سی‌سی‌پی در جدول ۶ ارائه شده‌اند.

جدول ۶. مقایسه روابط بهینه به دست آمده از برازش منحنی میان E_d و K_r با رابطه ایالت می‌سی‌سی‌پی

رابطه میان E_d و K_r یا K_{30}	ضریب همبستگی	نوع خاک
$K_r = -0.0009 E_d^2 + 0.591 E_d - 5.758$	$R^2 = 0.971$	SM
$K_r = 0.000 E_d^2 - 0.017 E_d + 38.96$	$R^2 = 0.819$	SW-SM
$K_r = 0.0006 E_d^2 - 0.151 E_d + 62.88$	$R^2 = 0.932$	SC
$K_{30} = 0.287 E_d + 11.5$	$R^2 = 0.90$	رابطه ایالت می‌سی‌سی‌پی

۲-۳. تعیین روابط میان آزمایش‌های CBR و خیزسنج ضربه‌ای سبک و افت و خیزسنج ضربه‌ای سبک روابط میان مدول الاستیسیته دینامیک E_d آزمایش افت و خیزسنج ضربه‌ای سبک و عدد CBR در سه زیرشاخه CBR خاک با تراکم ۹۰، ۹۵ و ۱۰۰ درصد در جدول ۷ ارائه شده است.

جدول ۷. روابط به دست آمده از برازش منحنی میان E_d و عدد CBR

رابطه استخراج شده میان E_d و CBR	ضریب هم بستگی	تراکم خاک
$E_d = 13.48 CBR - 87.89$	$R^2 = 0.728$	CBR (%۹۰)
$*E_d = -1.073 CBR^2 + 75.96 CBR - 965$	$R^2 = 0.840$	
$E_d = 1.627 CBR^{1.551}$	$R^2 = 0.712$	
$E_d = 6.714 CBR - 178.5$	$R^2 = 0.755$	CBR (%۹۵)
$*E_d = 0.321 CBR^2 - 30.67 CBR + 865.8$	$R^2 = 0.922$	
$E_d = 0.322 CBR^{1.593}$	$R^2 = 0.781$	
$E_d = 4.340 CBR - 223.2$	$R^2 = 0.748$	CBR (%۱۰۰)
$E_d = 0.032 CBR^2 - 2.292 CBR + 111.2$	$R^2 = 0.756$	
$*E_d = 0.026 CBR^{1.945}$	$R^2 = 0.836$	

*رابطه بهینه

۳-۳. تعیین روابط میان آزمایش‌های CBR و بارگذاری صفحه روابط میان عدد CBR و مدول الاستیسیته سیکل دوم بارگذاری صفحه با تراکم ۹۰، ۹۵ و ۱۰۰ درصد در جدول ۸ ارائه شده است.

جدول ۸. روابط به دست آمده از برازش منحنی میان E_{v2} و عدد CBR

رابطه استخراج شده میان E_{v2} و CBR	ضریب هم بستگی	تراکم خاک
$E_{v2} = 3.561 CBR + 54.13$	$R^2 = 0.852$	CBR (%۹۰)
$*E_{v2} = -0.073 CBR^2 + 9.324 CBR - 41.98$	$R^2 = 0.884$	
$E_{v2} = 12.17 CBR^{0.759}$	$R^2 = 0.834$	
$E_{v2} = 17.76 CBR - 1078$	$R^2 = 0.771$	CBR (%۹۵)
$*E_{v2} = 5.677 CBR^2 - 776.3 CBR + 26662$	$R^2 = 0.985$	
$E_{v2} = 0.000 CBR^{7.023}$	$R^2 = 0.820$	
$E_{v2} = 2.251 CBR - 98.36$	$R^2 = 0.895$	CBR (%۱۰۰)
$*E_{v2} = 0.098 CBR^2 - 20.38 CBR + 1187$	$R^2 = 0.959$	
$E_{v2} = 0.09 CBR^{1.575}$	$R^2 = 0.902$	

*رابطه بهینه

۴. تعیین مدول الاستیسیته لایه‌ها با تحلیل بازگشتی

زمانی که آزمایش افت و خیزسنج ضربه‌ای سبک و یا بارگذاری صفحه روی سطح خاکریز انجام می‌شود، الزاماً مشخصات تمامی لایه‌های زیرین در مدول به‌دست آمده از آزمایش تأثیرگذار است. برای محاسبه مدول هر لایه به صورت جداگانه، از تحلیل بازگشتی استفاده می‌شود. در نرم‌افزارهای تحلیل بازگشتی، تحلیل مستقیم یک محیط لایه‌ای تحت بار ثابت با استفاده از یک مدل رفتاری الاستیک صورت می‌گیرد. سپس، از یک الگوریتم بهینه‌سازی برای کمینه نمودن تابع خطای بین تغییرشکل محاسباتی و اندازه‌گیری شده استفاده می‌شود. در اینجا، برای انجام تحلیل بازگشتی روی نتایج تست LWD از نرم‌افزار ELMOD5.0 و روش تطبیق کاسه نشست استفاده شده است. این روش مبتنی بر عملیات سعی و خطا می‌باشد. برای شروع تحلیل، یک‌سری مدول فرضی اولیه به لایه‌ها اختصاص داده شده و سپس تغییرشکل لایه‌ها محاسبه می‌گردد. تغییرشکل‌های محاسباتی نرم‌افزار با تغییرشکل‌های واقعی اندازه‌گیری شده در محل مقایسه می‌شوند. مدول‌های فرضی آنقدر تغییر می‌کنند تا تطابق قابل قبول میان این دو دسته تغییرشکل مشاهده گردد. پس از دستیابی به این تطابق، مدول‌های فرضی به عنوان مدول واقعی لایه‌ها پذیرفته می‌شوند. در این روش، حداکثر ۵ لایه مورد تحلیل قرار می‌گیرند.

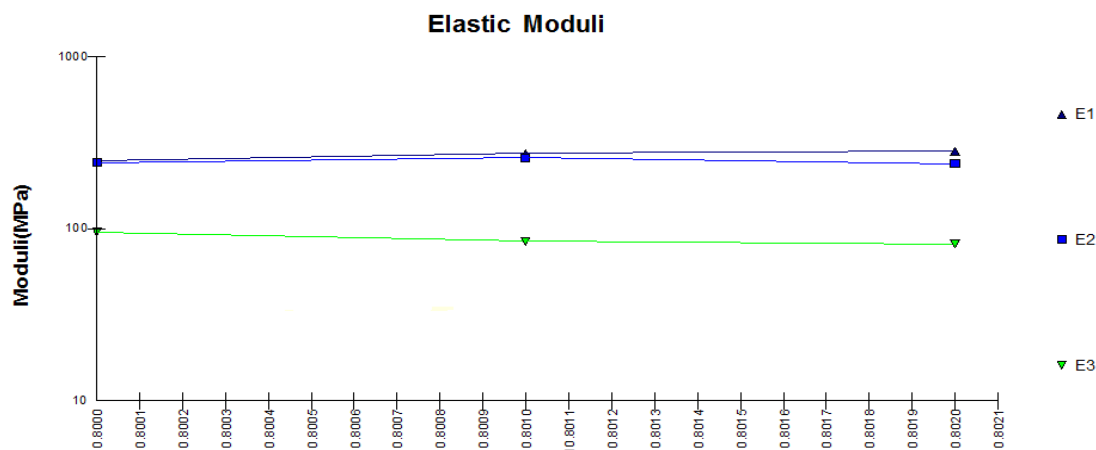
پس از محاسبه مدول الاستیسیته دینامیک هر لایه، با استفاده از یک رابطه تحلیلی بین مدول الاستیسیته استاتیک و دینامیک، مدول استاتیک هر لایه نیز محاسبه می‌گردد.

۴-۱. تعیین E_d هر لایه با تحلیل بازگشتی

نرم‌افزار ELMOD5.0

برای انجام تحلیل بازگشتی، ۶ ایستگاه با ۶ نوع مصالح متفاوت درشت دانه و ریزدانه انتخاب شده و آزمایش افت و خیزسنج ضربه‌ای سبک با تعداد و فواصل یکسانی از ژئوفون‌ها صورت گرفته است. در هر ایستگاه، داده‌های برداشت شده در سه نقطه سمت چپ، مرکز و سمت راست خاکریز قرائت گردیده است. به عنوان نمونه، در شکل ۶، گراف‌های مدول دینامیک لایه‌های زیربالاست، بستر و بستر طبیعی که برترتیب با E_1 ، E_2 و E_3 معرفی شده‌اند، برای خاک SM نشان داده شده است.

مقدار مدول‌های به‌دست آمده برای خاک SM در سه قرائت مختلف در جدول ۹ و برای سایر خاک‌ها در جدول ۱۰ ارائه شده است. با استفاده از این سه قرائت می‌توان میانگین مدول‌های محاسباتی و انحراف معیار نسبت به مقدار میانگین را محاسبه نمود. نسبت انحراف معیار به میانگین مدول محاسبه شده کمتر از ۲٪ است. لذا، خطای محاسبه ناچیز محسوب شده و مدول‌های محاسباتی به عنوان مدول واقعی لایه‌ها قابل قبول می‌باشند.



شکل ۶. مدول محاسبه شده توسط نرم افزار ELMOD5.0 از کیلومتر ۱۰+۸۰۰ تا ۱۰+۸۰۲ برای خاک SM

جدول ۹. مدول دینامیک محاسباتی لایه‌ها در سه قرائت مختلف و میانگین و انحراف معیار داده‌ها- خاک SM

کیلومتر ایستگاه	مدول دینامیک زیر بالاست	مدول دینامیک بستر	مدول دینامیک بستر طبیعی
	E_{d1} (Mpa)	E_{d2} (Mpa)	E_{d3} (Mpa)
۱۰+۸۰۰	۲۴۹/۸۳	۲۴۳	۹۵/۷۷
۱۰+۸۰۱	۲۷۵/۹۴	۲۶۰	۸۴/۸۰
۱۰+۸۰۲	۲۸۴/۳۰	۲۴۰	۸۲/۰۹
میانگین ۳ قرائت	۲۷۰/۰۲	۲۴۷/۶۷	۸۷/۵۵
انحراف معیار	۱/۰۷۰	۱/۰۴۴	۱/۰۸۵

جدول ۱۰. میانگین و انحراف معیار مدول‌های دینامیک محاسباتی هر لایه توسط نرم افزار ELMOD5.0 برای خاک‌های مختلف

انحراف معیار	میانگین مدول			کیلومتر ایستگاه	نوع خاک
	E_{d3} (Mpa)	E_{d2} (Mpa)	E_{d1} (Mpa)		
۱/۰۸۵	۸۲	۲۴۳	۲۵۳	۱۴+۳۰۰	SC-SM
۱/۰۱۷	۹۰	۲۷۵	۲۹۰	۱۷+۸۰۰	GM
۱/۰۲۲	۷۰	۲۰۸	۲۲۹	۲۰+۷۰۰	GC-GM
۱/۰۱۱	۸۴	۲۴۱	۲۴۶	۲۱+۳۰۰	CL
۱/۱۴۵	۲۴۴	۶۶۹	۶۸۶	۲۱+۶۰۰	SC

نرم‌افزار، E_d ، برای مسیر قم- اصفهان، از روش‌های رگرسیون خطی و سهموی استفاده شده و به ترتیب روابط (۲) و (۳) به دست آمده‌اند. منحنی‌های برازش یافته در شکل ۷ نشان داده شده‌اند. با توجه به این که خطای رابطه (۳) بسیار کم می‌باشد، می‌توان از این رابطه برای تعیین نسبت نهایی میان مدول استاتیک و دینامیک استفاده نمود:

۴-۲. تعیین مدول استاتیک هر لایه با استفاده از

مدول دینامیک

پس از انجام تحلیل بازگشتی و تعیین مدول دینامیک هر لایه، می‌توان مدول استاتیک هر لایه را نیز به کمک روابط تحلیلی تعیین نمود. برای استخراج چنین رابطه‌ای بین مدول واقعی اندازه‌گیری شده در آزمایش بارگذاری صفحه، E_s ، و مدول دینامیک محاسباتی

ایالت می‌سی‌سی‌پی، یکی از معتبرترین روابط موجود بین مدول الاستیسیته استاتیک و دینامیک در ادبیات فنی است:

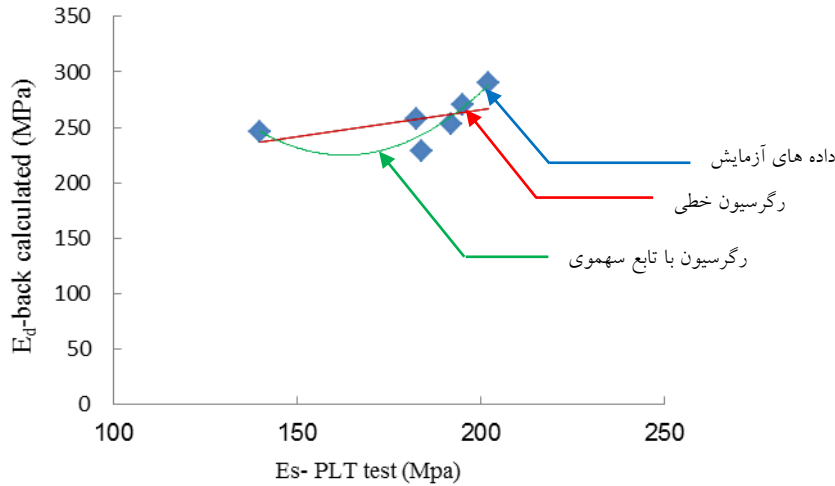
$$E_{v2} = (E_d + 7.48) / 1.41 \quad (4)$$

در رابطه فوق، E_d مدول الاستیسیته دینامیک آزمایش افت و خیزسنگ ضربه‌ای سبک و E_{v2} مدول الاستیسیته استاتیک لایه بستر با واحد مگاپاسکال می‌باشد.

$$E_d = 0.595E_s + 150.19, (R^2 = 0.404) \quad (2)$$

$$E_d = 0.0447E_s^2 - 14.61E_s + 1416, (R^2 = 0.978) \quad (3)$$

در پروژه تحقیقاتی ایالت می‌سی‌سی‌پی، آزمایش‌ها روی دامنه وسیعی از انواع خاک‌ها صورت گرفته‌اند و روابط به‌دست آمده برای خاک‌های مختلف قابل استفاده هستند. رابطه (۴) مربوط به پروژه تحقیقاتی



شکل ۷. استخراج رابطه میان مدول استاتیک اندازه‌گیری شده و مدول دینامیک محاسباتی

رابطه (۴) مربوط به ایالت می‌سی‌سی‌پی نیز محاسبه شده و در جدول ارائه شده‌اند.

با استفاده از رابطه (۳) و با داشتن مقادیر مدول دینامیک هر لایه، مقدار مدول استاتیک تعیین شده و در جدول ۱۱ ارائه شده است. برای مقایسه، مقادیر E_{v2} با

جدول ۱۱. مدول دینامیک و استاتیک محاسباتی لایه‌ها با استفاده از تحلیل بازگشتی و روابط تحلیلی

مدول استاتیک از رابطه (۳) (MPa)			مدول استاتیک از رابطه ایالت می‌سی‌سی‌پی (MPa)			مدول دینامیک از تحلیل بازگشتی نرم‌افزار ELMOD5.0 (MPa)			کیلومتر ایستگاه	نوع خاک
بستر طبیعی	بستر	زیربالاست	بستر طبیعی	بستر	زیربالاست	بستر طبیعی	بستر	زیربالاست		
E_{s3}	E_{s2}	E_{s1}	E_{s3}	E_{s2}	E_{s1}	E_{d3}	E_{d2}	E_{d1}		
*	۱۸۷/۴۷	۱۹۶/۱۲	۶۷	۱۷۹/۰۶	۱۹۶/۸	۸۷	۲۴۸	۲۷۰	۱۰+۸۰۰	SM
*	۱۸۵/۰۱	۱۸۹/۶۸	۶۳	۱۷۶	۱۸۴	۸۲	۲۴۳	۲۵۳	۱۴+۳۰۰	SC- SM
*	۱۹۷/۸۱	۲۰۲/۴۰	۶۹	۲۰۰	۲۱۰	۹۰	۲۷۵	۲۹۰	۱۷+۸۰۰	GM
*	*	۱۷۵/۸۰	۵۵	۱۵۲	۱۶۸	۷۰	۲۰۸	۲۲۹	۲۰+۷۰۰	GC-GM
*	۱۸۳/۹۵	۱۸۶/۵۰	۶۵	۱۷۶	۱۷۸	۸۴	۲۴۱	۲۴۶	۲۱+۳۰۰	CL
۱۸۵/۵۳	۲۶۳/۴۱	۲۶۵/۳۰	۱۷۸	۴۸۰	۴۹۲	۲۴۴	۶۶۹	۶۸۶	۲۱+۶۰۰	SC

* با توجه به این که E_s از معادله درجه دوم ارائه شده در رابطه (۳) محاسبه می‌گردد، در بعضی موارد معادله مذکور فاقد ریشه حقیقی بوده است.

۵. نتیجه‌گیری

درصد تراکم خاکریز و شاخص نسبت باربری کالیفرنیا، دو معیاری هستند که از گذشته به‌طور تجربی برای کنترل کیفی خاکریز راه‌آهن مورد استفاده قرار گرفته‌اند. آئین‌نامه‌های UIC 719R نشریه ۳۹۴ سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی کشور، کنترل مدول ارتجاعی لایه‌های خاکریز و بستر طبیعی را برای کنترل شکل‌پذیری الزامی دانسته‌اند. از این رو، ارزیابی خاکریز راه‌آهن سریع‌السیر بر اساس ضوابط آئین‌نامه‌ای، مستلزم دسترسی به مدول الاستیسیته استاتیک، E_{v2} ، است. این پارامتر از منحنی بار نشست مربوط به سیکل دوم آزمایش بارگذاری صفحه به‌دست می‌آید. با توجه به دشواری‌های اجرای این آزمایش و امکان اجرای سریعتر آزمایش‌هایی مانند افت و خیزسنج ضربه‌ای سبک و نسبت باربری کالیفرنیا، روش‌های مختلف رگرسیون برای استخراج رابطه‌ای مناسب میان نتایج این سه آزمایش به‌کار گرفته شده است. این آزمایش‌ها روی خاکریز راه‌آهن سریع‌السیر قم- اصفهان انجام شده‌اند. با توجه به وجود الزامات آئین‌نامه‌ای برای E_{v2} ، هر یک از لایه‌های خاکریز راه‌آهن سریع‌السیر، ابتدا با کمک تحلیل بازگشتی به‌وسیله نرم‌افزار ELMOD5.0 روی نتایج تست افت و خیزسنج ضربه‌ای سبک، مدول دینامیک لایه‌ها به تفکیک محاسبه شده است. سپس، با استفاده از روابط تحلیلی میان مدول استاتیک و دینامیک، مدول استاتیک هر لایه

تعیین گردیده است. خلاصه‌ای از مهمترین نتایج به‌دست‌آمده از این تحقیق به شرح زیر است:

- برآزش منحنی میان داده‌های آزمایش‌ها بر خاک- های مختلف نشان داد که تقریباً در تمام موارد، رگرسیون با تابع سهموی به رابطه‌ای قویتر و با خطای کمتر میان پارامترهای مورد بررسی منجر می‌شود.

- در بررسی رابطه میان مدول دینامیک به‌دست آمده از آزمایش افت و خیزسنج ضربه‌ای سبک (E_d) با داده‌های تست بارگذاری صفحه شامل E_{v1} ، E_{v2} ، K_s و K_r ملاحظه گردید که قویترین رابطه میان E_d و K_r به‌دست می‌آید.

- در مقایسه روابط استخراج شده میان مدول دینامیک به‌دست آمده از آزمایش افت و خیزسنج ضربه‌ای سبک (E_d) و داده‌های تست بارگذاری صفحه شامل E_{v1} ، E_{v2} ، K_s و K_r برای خاک‌های مختلف مشاهده گردید که کمترین خطا مربوط به رابطه به‌دست آمده برای خاک رده SC است.

- در استخراج رابطه میان نتایج تست نسبت باربری کالیفرنیا با داده‌های آزمایش‌های بارگذاری صفحه و افت و خیزسنج ضربه‌ای سبک، در هر دو مورد بهترین رابطه برای $CBR(95\%)$ و با رگرسیون به‌وسیله تابع سهموی محاسبه گردید.

- بر اساس بررسی‌های صورت گرفته، جهت تعیین مدول استاتیک لایه‌های خاکریز راه‌آهن سریع‌السیر از روی مدول دینامیک، رابطه (E_d)

$$E_s = 1416 + 14.61 E_s^2 - 0.0447 E_s^3$$
 پیشنهاد می‌گردد.

۶. مراجع

- AASHTO. 1993. "AASHTO Guide for Design of Pavement Structures". American Association of State Highway and Transportation Officials.
- Ali, N. A. and Khosla, N. P. 1987. "Determination of Layer Moduli using a Falling Weight Deflectometer". Transportation Research Record 1117, National Research Council, Washington, D.C., pp. 1-10.
- Camargo, F., Larsen, B., Chadbourn, B., Roberson, R. and Siekmeier, J. 2006. "Intelligent Compaction: A Minnesota Case History". 54th Annual University of Minnesota Geotechnical Conference, February 17.
- Chen, D. H., Bilyeu, J. and He, R. 1999. "Comparison of Resilient Moduli between Field and Laboratory Testing: A Case Study". The 78th Annual Meeting of the Transportation Research Board, Washington, D.C.

- George, K. P. 2003. "Falling Weight Deflectometer for Estimating Subgrade Resilient Moduli". Final Report, Research Division, Mississippi Department of Transportation, Jackson.
- Newcomb, D. E. 1987. "Comparison of field and laboratory estimated resilient moduli of pavement materials". Association of Asphalt Paving Technologists, Asphalt Paving Technol. 56: 91-106.
- Ullidtz, P. 1987. "Pavement Analysis". Elsevier, Amsterdam, The Netherlands.
- Van Deusen, D. A., Lenngren, C. A. and Newcomb, D. E. 1994. "A Comparison of Laboratory and Field Subgrade Moduli at the Minnesota Road Research Project". In: Von Quintas, H. L., Bush, A. J., Baladi, G. Y. (Eds.), Nondestructive Testing of Pavements and Backcalculation of Moduli, ASTM STP 1198.
- Von Quintas, H. L. and Killingsworth, B. M. 1998. "Comparison of Laboratory and In-Situ Determined Elastic Moduli". The 76th Annual Meeting of the Transportation Research Board, Washington, D.C.