

بررسی محاسبه معکوس ضرایب ارتجاعی لایه‌های روسازی به روش‌های استاتیکی و دینامیکی، با استفاده از نرم افزارهای

DBSID و EVERCALC5.0,ELMOD5.0,MODULUS6.0

محمود عامری، دانشیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران
ندا یآوری، کارشناس ارشد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران
E-mail: ameri@iust.ac.ir

چکیده

()
FWD (Falling Weight Deflectometer)

FWD

FWD

EVERCALC5.0C ELMOD5.0 MODULUS6.0

DBSID

FWD

(
Apron Taxiway Runway

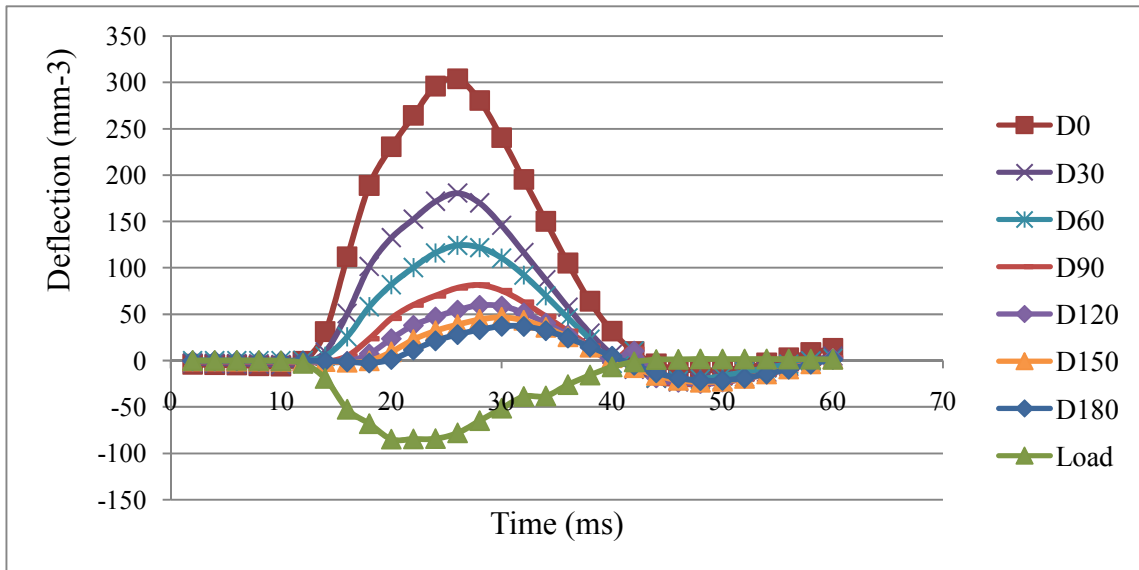
)
MODULUS6.0 (

واژه‌های کلیدی: محاسبه معکوس، حوضچه تغییر شکل، الاستواستاتیک، دینامیکی، FWD، ویسکوالاستیک، مدول الاستیسیته.

۱. مقدمه

می‌کنند که بار به طور استاتیکی به سیستم روسازی وارد می‌شود. به این ترتیب روسازی حاضر به صورت یک سیستم الاستیک لایه‌ای با مصالح دارای رفتار خطی یا غیر خطی (وابسته به تنش) مدل و تحلیل می‌شود. پس از آن مشخصات مصالح با کمینه‌سازی

مدول الاستیسیته (ضریب ارتجاعی)، از پارامترهای اساسی برای تحلیل‌های عمر باقیمانده و طرح روکش است. اغلب الگوریتم‌های رایج محاسبه معکوس، که بار و تغییر شکل بیشینه ثبت شده در حسگرها را برای پیش‌بینی مدول بکار می‌گیرند، فرض



شکل ۱. تاریخچه زمانی بار و تغییر شکل [۳]

دستگاه FWD متناقض است [۲]. از آنجا که بار وارد بر روسازی توسط FWD، یک بار ضربه‌ای است، دارای طبیعتی دینامیک است. بنابراین نوع بارگذاری سازه، نه استاتیک، که چنانچه از نتایج به دست آمده از بارگذاری FWD برمی‌آید از نوع تاریخچه زمانی است. به این ترتیب که میزان بار از مقدار صفر، در یک مدت زمان ۲۰ الی ۶۵ میلی ثانیه (بسته به نوع دستگاه)، طی یک منحنی شبه نیم سینوسی ابتدا به مقدار پیک و سپس دوباره به صفر می‌رسد (شکل ۱). در صورتی که بار وارده استاتیک باشد، همزمان با رخ دادن پیک بار، پیک تغییر شکل نیز رخ خواهد داد. اما نتایج FWD چنین مطلبی را تأیید نمی‌کند. چنان که در شکل ۱ مشخص است، نقاط دورتر از مرکز بار، دیرتر به مقادیر حداکثر خود می‌رسند. این تأخیر زمانی به "اختلاف فاز تغییر شکل" مشهور است و به دلیل سرعت انتشار موج شوکی به وجود می‌آید. سرعت انتشار موج در سازه روسازی، بسته به فرکانس موج شوکی متفاوت خواهد بود [۳]. چنان که در الگوریتم‌های رایج محاسبه معکوس که مبنایی استاتیک دارند رایج است، مدول لایه‌ها با استفاده از بار حداکثر و تغییر شکل حداکثر مربوط به آن محاسبه می‌شود. این درحالی است که تنها استفاده از مقادیر پیک در سری زمانی، عملاً حجم بالایی از اطلاعات مفید را کنار خواهد گذاشت.

خطای مطلق و یا خطای حداقل مربع‌های بین مقادیر تغییر شکل ثبت و محاسبه شده تئوریک به دست می‌آید. در حقیقت دستگاه FWD، یک بار پالسی به روسازی وارد و موج‌های سطحی و بدنه‌ای در آن ایجاد می‌کند. این موج‌ها با سرعت‌های محدودی در روسازی حرکت می‌کنند و در زمان‌های مختلف توسط حسگرها ثبت می‌گردند. بنابراین علاوه بر بار و تغییر شکل ماکسیمم، اطلاعات بسیار دیگری نیز از داده‌های FWD قابل استخراج است و با در نظر گرفتن تاریخچه‌های زمانی بار و تغییر شکل ثبت شده، مشخصات دیگری از مصالح از راه محاسبه معکوس تعیین می‌شوند [۱].

۲. روش محاسبه معکوس، رویکردهای

استاتیکی و دینامیکی

تحلیل کلاسیک سیستم روسازی - بستر، برپایه فرضیات بار استاتیک، فرمولاسیون الاستیک خطی چند لایه‌ای و نامحدود بودن ابعاد روسازی در صفحه افقی با یک بستر نیم بی نهایت استوار است. فرض پاسخ الاستیک خطی در مدل تا هنگامی که روسازی دارای ناپیوستگی (مثلاً در محل درز در روسازیهای صلب و در محل ترک‌ها در انواع روسازی) یا رفتار غیرخطی نباشد، صحیح است. به علاوه فرض استاتیک بودن بار با واقعیت

۳. تعریف تابع هدف

هدف نهایی روند محاسبه معکوس، تعیین مجموعه‌ای از مدول‌هاست که اختلاف بین تغییرشکل‌های محاسبه و اندازه‌گیری شده را به حداقل برسانند [۴]. برای حصول اطمینان از وجود جواب بایستی تعداد حسگرهایی که در آنها تغییرشکل اندازه‌گیری می‌شود، بیش از تعداد مجهولات (مدول الاستیسیته در حالت الاستیک خطی و پارامترهای مصالح در حالت غیرخطی) باشد. به عبارت دیگر مناسب‌تر آن است که تعداد معادلات بیش از تعداد مجهولات باشد [۵].

تابع هدف کمینه‌سازی به صورت نسبی بیان می‌شود [۵]:

$$\sum_{i=1}^S \left(1 - \frac{W_i^c}{W_i^m}\right)^2 = \sum_{i=1}^S \left(\frac{W_i^m - W_i^c}{W_i^m}\right)^2 = \varepsilon^2 \quad (1)$$

که در آن W_i^c ، تغییر شکل محاسبه شده توسط نرم افزار و W_i^m تغییر شکل برداشت شده توسط FWD و S تعداد لایه‌ها است.

۴. نرم افزارهای مورد استفاده

۱-۴ نرم افزارهای استاتیکی

ELMOD5.0 ۱-۱-۴

نرم افزار ۱ ELMOD توسط Dynatest تهیه شده است و روش تکراری iterative^۱ را برای تحلیل معکوس بکار می‌گیرد. تئوری ادمارک- بوسینسک مبنای تحلیل مستقیم است [۲]. حداکثر تعداد لایه‌های دارای مدول مجهول، ۴ است. در ELMOD تصحیح دمایی صورت می‌پذیرد، همچنین عمق بستر محاسبه و در تحلیل وارد می‌شود. بازه اولیه برای مدول الاستیسیته (شامل حد بالا و پایین مدول هر لایه) توسط نرم افزار تعیین می‌شود. در همه حال ضریب پواسون برابر با ۰/۳۵ در نظر گرفته می‌شود. این فرض صحیح نیست، اما تأثیر چشمگیری بر تنش‌ها و کرنش‌ها نخواهد داشت [۶].

فرض اصلی آن است که لایه‌های روسازی، همگن، همسان و دارای رفتار الاستیک خطی هستند. بجز بستر که رفتار غیرخطی آن به شکل زیر تعریف می‌شود [۶] (این غیرخطی بودن برای خاکهای ریزدانه در نظر گرفته می‌شود):

$$E=C \left[\frac{\sigma_1}{P_a} \right]^n \quad (2)$$

E = مدول سطحی

$$\sigma_1 = \text{تنش اصلی}$$

$$P = a \text{ تنش مرجع که برابرست با } 0.1 \text{Mpa}$$

$$n = \text{ثابتی کوچک تر یا مساوی صفر}$$

۱-۴-۲ MODULUS 6.0

برنامه MODULUS، توسط TTI^۲ تهیه شده است و روش تشکیل پایگاه داده‌ها Data Base^۳ را برای محاسبه معکوس بکار می‌گیرد. در این برنامه تحلیل روسازی‌ها براساس تئوری الاستوستاتیک چند لایه‌ای انجام می‌گیرد، همچنین حل مستقیم توسط سابروتین WESLEA انجام می‌شود. حداکثر تعداد لایه‌های دارای مدول مجهول برابر با ۵ است. برنامه عمق بستر را تعیین و آن را در محاسبات وارد می‌کند. در MODULUS تصحیح دمایی صورت نمی‌گیرد. حد بالا و پایین مدول الاستیسیته هر لایه، با مشخص بودن نوع مصالح توسط نرم افزار پیشنهاد می‌شود. این بازه توسط کاربر قابل تغییر است [۷].

۱-۴-۳ EVERCALC5.0

این برنامه توسط J. Mahoney^۴ به سفارش WSDOT^۵ تهیه شده است. این نرم افزار یک برنامه الاستیک لایه‌ای (WESLEA) را برای تحلیل مستقیم و یک الگوریتم اصلاح شده گوس - نیوتن را برای بهینه سازی بکار می‌گیرد. برنامه تا ۱۰ حسگر، ۵ لایه و ۸ کوبه را می‌شناسد. تعیین مدول اولیه و بازه مدول برای آغاز محاسبات ضروری است. همچنین برنامه قابلیت تصحیح دمایی را دارد [۲].

۱-۴-۲ نرم افزار دینامیکی DBSID^۶

۱-۲-۴ System Identification Method

این روش توسط مهندسان الکترونیک برای تعیین مشخصات یک فیلتر با استفاده از سیگنال‌های ورودی و خروجی و یک مدل فرضی برای فیلتر ابداع شد. مشخصات مدل به طور سیستماتیک و برنامه ریزی شده، با استفاده از یک تکنیک جست و جو آنقدر تغییر می‌کند تا خروجی حاصل به اندازه کافی به خروجی واقعی فیلتر نزدیک شود. این روند دقیقاً مشابه روندی است که در محاسبه معکوس مدول لایه‌های روسازی بکار می‌رود. روش‌های مشابهی را می‌توان برای تحلیل طیف موج سطحی بکار برد [۱].

سه برنامه نخست تابع انتقال و برنامه آخر تاریخچه تغییر شکل را برای یک حسگر و روسازی معین پیش‌بینی می‌کند. تحلیل دینامیک ارایه شده در DBSID، بر اساس مدل محاسباتی بکار رفته در FWD-DYN است.

بر اساس تحقیقات (UZAN(1994)، روش تطابق دامنه زمانی برای محاسبه معکوس دینامیک انتخاب شد. FWD-DYN تبدیل فوریه را برای پیش‌بینی پاسخ روسازی در مقابل بار ضربه‌ای بکار می‌گیرد. در این روش بار FWD با استفاده از FFT، ابتدا به اجزای فرکانسی تجزیه می‌شود. سپس تابع انتقال که پاسخ سیستم روسازی را به بار واحد استاتیک تعریف می‌کند، برآورد می‌شود. در نهایت تابع انتقال در تبدیل بار ضرب می‌شود تا تبدیل فوریه تغییر شکل‌ها به دست آید. FWD-DYN یک تبدیل معکوس FFT بر روی این تبدیل فوریه انجام می‌دهد تا تاریخچه تغییر شکل برای هر حسگر معلوم شود [۹].

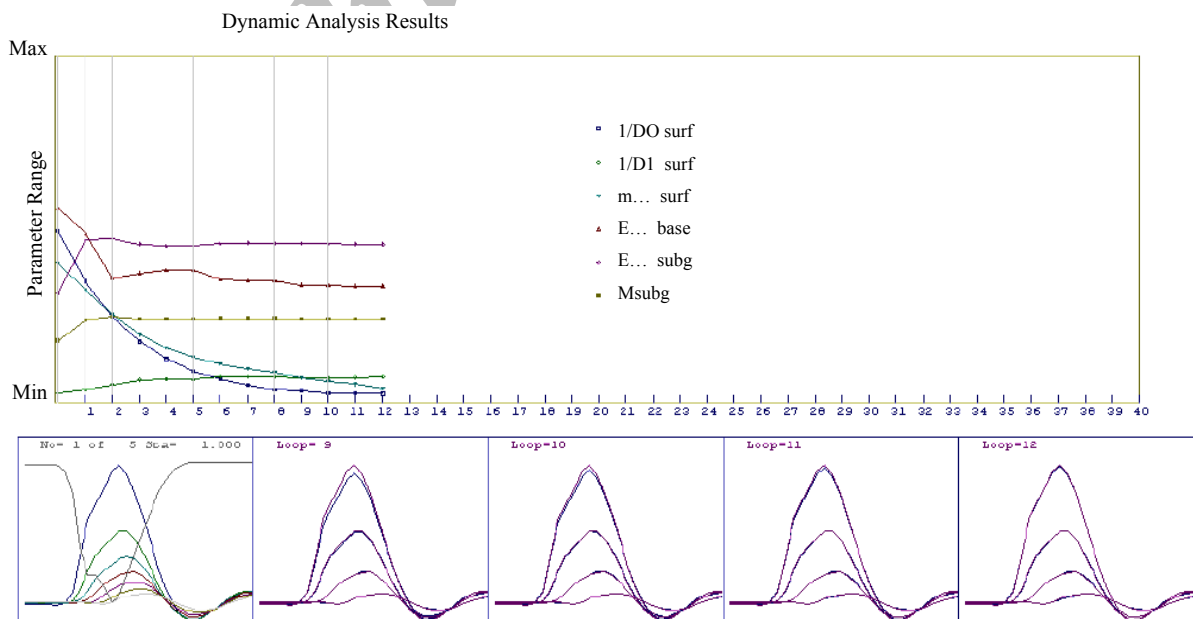
برای پیش‌بینی مشخصات لایه‌ها با استفاده از تاریخچه‌های بار و تغییر شکل، تهیه‌کنندگان برنامه DBSID، یک سابروتین System Identification به برنامه FWD-DYN اضافه کرده‌اند. در این فرآیند، لایه AC ویسکو الاستیک مدل می‌شود، به شکلی که از رابطه ۳ پیروی می‌کند. لایه‌های دیگر الاستیک میرا مدل می‌شوند. در DBSID تلاش بر آن است که تطابق بین تاریخچه زمانی محاسبه و برداشت شده توسط FWD به میزان قابل قبول برسد (شکل ۲).

یک بار ضربه‌ای به روسازی وارد می‌شود. حرکت سطحی به شکل سیگنال‌هایی که توسط دو حسگر به فاصله X از یکدیگر دریافت می‌شوند، حس می‌گردد. روسازی موجود بین این دو حسگر در واقع یک فیلتر است که مشخصات آن بایستی تعیین شود. مجهول‌ها در هر لایه عبارتند از: مدول الاستیسیته، درصد میرایی، ضخامت و وزن مخصوص [۱].

۴-۲-۲ کلیات

تبدیل فوریه به عنوان یک تبدیل انتگرالی در تحلیل سیگنالی بکار می‌رود. این تبدیل عموماً تابعی از زمان را به سری‌های هارمونیک تبدیل می‌کند [۸]. در برنامه‌های محاسبه معکوس دینامیکی، تبدیل سریع فوریه (FFT) برای تبدیل تاریخچه‌های زمانی بار و تغییر شکل از دامنه زمانی به دامنه فرکانسی بکار می‌رود. FFT تاریخچه زمانی بر FFT بار تقسیم شده، تابع انتقال سیستم حاصل می‌گردد. شدت تغییر شکل در هر واحد نیرو، فرکانس به فرکانس تعیین می‌شود [۹].

برای تحلیل تاریخچه‌های زمانی، نرم افزارهایی موجود است که به کمک آنها می‌توان تابع انتقال یا تاریخچه تغییر شکل FWD را برای هر حسگر پیش‌بینی کرد، از جمله: PUNCH (Kausel & Peek 1982)، UTFWIBM (Roesst 1987)، FWD-DYN, SCALPOT (Magnuson & Lytton 1992) (Foinquoset al 1993) [۹].



شکل ۲. تاریخچه‌های زمانی تغییر شکلی اندازه‌گیری و محاسبه شده در مراحل ۹ تا ۱۲ محاسبه معکوس در ایستگاه ۱

۴-۲-۳- سازه روسازی

۴-۲-۳-۱ مدل جسم ویسکوالاستیک

بتن آسفالتی (AC) مجموعه‌ای از یک ماتریس متشکل از دانه‌های جامد و جسم چسباننده (قیر) است. اتصال این دو بخش منجر به بروز رفتار ویسکوالاستیک مخلوط آسفالتی می‌شود. در برنامه DBSID مدل سه پارامتری زیر برای تعریف رفتار ویسکوالاستیک بکار می‌رود [۱۰]:

$$D(t) = D_0 + D_1 t^m \quad (3)$$

$D(t)$ = تابع Creep compliance که به شکل $D(t) = \varepsilon(t) / \sigma_0$ تعریف می‌شود.

$\varepsilon(t)$ = کل کرنش محوری اندازه‌گیری شده در زمان t

σ_0 = تنش ثابت اعمالی در آزمایش Creep compliance

D_0 = نماینده پاسخ الاستیک مربوط به ماتریس جامد. (در زمان

$t = 0, D(0) = D_0$ خواهد بود. به عبارت دیگر $D_0 = 1/E_0$

نماینده پاسخ الاستیک در زمان بسیار کوتاه بارگذاری است.)

D_1 = ثابت Creep compliance، نماینده پاسخ غیر خطی ویسکوز.

m = توان t برای وابستگی زمانی غیرخطی در این مدل. پارامتر m

شیب قسمت خطی منحنی Creep compliance بر حسب زمان

بر روی صفحه لگاریتمی است. m پارامتر مهمی در تعیین عملکرد

ترک‌های حرارتی در مخلوط‌های آسفالتی محسوب می‌شود.

۴-۲-۳-۲ مدل جسم الاستیک میرا

در لایه‌هایی که با فرض رفتار الاستیک میرا مدل می‌شوند، تنها دو پارامتر برای تعریف پاسخ مصالح مورد نیاز است: مدول الاستیسیته (E) و ضریب میرایی (ζ). آنالیز حساسیت نشان می‌دهد مقدار ضریب میرایی تأثیر قابل توجهی بر تاریخچه‌های زمانی تغییرشکلی اندازه‌گیری شده ندارد [۱۰]. بنابراین این مقدار توسط کاربر وارد می‌شود و تنها مقدار مدول الاستیسیته محاسبه معکوس می‌شود.

چنانچه لایه اول ویسکوالاستیک مدل شود، مقادیر D_0, D_1 و m محاسبه معکوس می‌شوند. در دو لایه دیگر نیز مدول‌های الاستیسیته از طریق محاسبه معکوس به دست می‌آیند. بنابراین چنانچه عمق بستر نیز به جمع مجهولات اضافه شود، حداکثر ۶ مجهول وجود دارد که وارد تحلیل معکوس می‌شوند [۱۰].

۵. جمع‌آوری اطلاعات

داده‌های مورد استفاده در تحلیل، از اندازه‌گیری‌های FWD که در محورهای آزادراهی و باند فرودگاهی ذیل انجام شده بوده‌اند، استخراج شده است:

محور ایوانکی - گرمسار، کیلومتر ۰۰/۰۰ تا ۲۶/۵۵

محور گرمسار - سمنان، کیلومتر ۰۰/۰۰ تا ۱۰۴/۱۰

محور زنجان - تبریز، کیلومتر ۰۰/۰۰ تا ۲۳۶/۰۰

فرودگاه رفسنجان، سه بخش مجزای Runway, Epron و Taxiway

لازم به ذکر است در مورد آخر، آزمایش از نوع HWD بوده است.

۶. مبانی مقایسه‌ای برای ارزیابی نتایج

لایه‌های بستر، به دلیل طبیعت فیزیکی و ساخت، پیچیده‌ترین لایه‌ها در سازه روسازی محسوب می‌شوند. خاک‌های رسوبی دست نخورده طبیعی، اغلب افزایش در مقدار مدول الاستیسیته با عمق را نشان می‌دهند. (چون استحکام مواد زمین‌شناسی زیاد است)، بنابراین چنان‌که چنین نمونه خاکی به دو لایه تقسیم شود، لایه بالایی مدول کمتری نسبت به لایه پایینی خواهد داشت. همان‌طور که گفته شد، فرآیند محاسبه معکوس بر این فرض استوار است که تغییر شکل سطحی در یک فاصله مشخص، تابعی از مدول الاستیک در یک عمق مشخص است. تغییرشکلهای اندازه‌گیری شده در حسگرهای دور از مرکز، بسیار کوچکنند و امکان محاسبه دقیق آنها بسیار کم است. بارهای بزرگ‌تر می‌توانند تغییر شکلهای بزرگ‌تری تولید کنند، اما باعث ایجاد تنش‌هایی در خاک می‌شوند که رفتار خطی بستر را تغییر می‌دهد (رابطه بین تنش و کرنش غیر خطی خواهد شد). بنابراین مجدداً، دقت مدول الاستیک خطی برای لایه‌های عمیق‌تر کاهش می‌یابد. تنها مدول برجهندگی^۶ روی لایه بستر (در فصل مشترک بستر اساس) است که می‌توان آن را با آزمایش FWD دقیق پیش‌بینی کرد [۲]. برای ارزیابی نتایج به دست آمده از نرم افزارهای مختلف، لازم است یک مبانی مقایسه‌ای فراهم باشد. همان‌طور که ذکر شد، محاسبه معکوس در مورد خاک بستر نتایج قابل اطمینان‌تری ارائه می‌کند. بنابراین در این تحقیق به شناسایی خصوصیات خاک بستر اکتفا شده است. در مرحله بعد نتایج آزمایش‌های مکانیک خاک انجام شده بر روی مقاطع انتخابی گردآوری شد.

۷. ورودی‌های ضروری نرم‌افزارها برای آغاز

تحلیل

۱-۷ ضخامت لایه‌ها

کلیه تحلیل‌ها بر مبنای یک سازه روسازی سه لایه‌ای انجام شده

است. به عبارت دیگر روسازی‌ها شامل رویه آسفالتی (مصالح چسبنده)، اساس و زیراساس سنگ شکسته (مصالح غیرچسبنده) و بستر است. ضخامت هر لایه در مقاطع مختلفی که آزمایش برای آنها انجام شده و همچنین تعداد ایستگاههای بارگذاری توسط دستگاه FWD، در جداول ۱، تا ۴ نشان داده شده است.

جدول ۱. ضخامت لایه‌ها و تعداد ایستگاههای بارگذاری در مقاطع مختلف محور گرمسار- سمنان

شماره مقطع	از کیلومتر	تا کیلومتر	تعداد ایستگاههای بارگذاری	ضخامت آسفالت (mm)	ضخامت اساس (mm)
1	0.00	1.95	14	190	600
2	2.10	4.20	15	192	600
3	4.35	6.45	15	185	600
4	6.60	9.30	19	186	600
5	9.45	11.85	18	235	600
6	12.00	13.65	12	169	450
7	13.80	16.20	17	240	450
8	16.35	19.95	25	207	450
9	20.10	38.70	30	118	450
10	38.85	40.95	18	130	450
11	41.10	43.50	17	171	450
12	43.65	46.20	25	140	450
13	46.35	48.75	21	196	450
14	48.90	51.30	17	150	450
15	51.45	54.15	16	179	450
16	54.30	56.55	16	210	450
17	56.70	59.25	20	211	450
18	59.40	61.35	17	215	450
19	61.50	64.50	17	204	450
20	64.65	67.20	19	205	450
21	67.35	70.35	16	214	450
22	70.50	72.90	19	210	450
23	73.05	74.45	14	311	450
24	74.55	77.70	20	179	450
25	77.85	80.55	18	130	450
26	80.70	83.10	22	180	450
27	83.25	87.45	17	208	450
28	87.60	91.50	11	129	450
29	91.65	94.05	22	180	450
30	94.20	96.60	19	51	450
31	96.75	99.15	17	120	450
32	99.30	104.10	30	125	450

بررسی محاسبه معکوس ضرایب ارتجاعی لایه‌های روسازی به روش‌های استاتیکی و دینامیکی...

جدول ۲. ضخامت لایه‌ها و تعداد ایستگاههای بارگذاری در مقاطع مختلف محور ایوانکی - گرمسار

شماره مقطع	از کیلومتر	تا کیلومتر	تعداد ایستگاههای بارگذاری	ضخامت آسفالت (mm)	ضخامت اساس (mm)
1	0.00	1.20	9	190	450
2	1.35	3.30	14	256	450
3	3.45	5.70	16	290	450
4	5.85	8.70	20	218	450
5	8.85	11.25	17	160	450
6	11.40	14.25	21	194	450
7	14.40	17.55	22	220	450
8	17.70	19.95	17	242	450
9	20.10	22.65	18	270	450
10	22.80	26.55	26	211	450

جدول ۳. ضخامت لایه‌ها و تعداد ایستگاههای بارگذاری در مقاطع مختلف محور زنجان - تبریز، تندر، کندرو و وسط

شماره مقطع	از کیلومتر	تا کیلومتر	تعداد ایستگاههای بارگذاری	ضخامت آسفالت (mm)	ضخامت اساس (mm)
1	205.00	210.20	53	192	455
2	210.20	214.30	40	192	455
3	214.30	217.10	28	190	457
4	217.10	222.10	49	188	467
5	222.10	230.40	84	192	480
6	230.40	232.70	21	192	470
7	232.70	236.00	34	208	461

شماره مقطع	از کیلومتر	تا کیلومتر	تعداد ایستگاههای بارگذاری	ضخامت آسفالت (mm)	ضخامت اساس (mm)
1	205.00	210.00	51	192	455
2	210.00	213.00	31	193	455

شماره مقطع	از کیلومتر	تا کیلومتر	تعداد ایستگاههای بارگذاری	ضخامت آسفالت (mm)	ضخامت اساس (mm)
1	205.00	212.65	79	192	455
2	212.65	216.85	43	190	456
3	216.85	222.35	55	180	468
4	222.35	222.85	5	197	480
5	222.85	235.99	133	196	469

گرفته شده است. این ضخامت آسفالت بر روی ۳۵۰ میلیمتر (۱۳/۷۸ اینچ) اساس سنگ شکسته قرار گرفته است. تعداد ایستگاههای بارگذاری در جدول ۴ نشان داده شده است. در جدول ۴ و همچنین جداول بخش نتیجه‌گیری، A، R و T علائم اختصاری Apron، Taxiway و Runway هستند.

در فرودگاه رفسنجان، از آنجا که در حین برداشت اطلاعات FWD، امکان نمونه‌گیری در کلیه مقاطع وجود نداشته است، ضخامت آسفالت با توجه به نتایج آزمایشگاه فنی و مکانیک خاک استان کرمان، به طور متوسط و برای هریک از بخش‌های Apron، Taxiway و Runway، برابر با ۲۴۹ میلیمتر (۹/۸۰ اینچ)، ۲۵۱ میلیمتر (۹/۹۰ اینچ) و ۲۶۰ میلیمتر (۱۰/۲۴ اینچ) در نظر

جدول ۴. تعداد ایستگاههای بارگذاری در مقاطع مختلف فرودگاه رفسنجان

تعداد ایستگاههای بارگذاری	تا کیلومتر	از کیلومتر	نام مقطع	تعداد ایستگاههای بارگذاری	تا کیلومتر	از کیلومتر	نام مقطع
32	3.050	0.000	R7R	11	0.145	0.000	A1
32	3.050	0.000	R10L	13	0.119	0.000	A2
32	3.050	0.000	R10R	13	0.119	0.000	A3
32	3.050	0.000	R15L	11	0.139	0.000	A4
32	3.050	0.000	R15R	13	0.123	0.000	A5
32	0.240	0.000	R20L	13	0.123	0.000	A6
32	0.240	0.000	R20R	11	0.142	0.000	A7
13	0.240	0.000	T1.5L	13	0.118	0.000	A8
13	0.240	0.000	T1.5R	11	0.142	0.000	A9
13	0.240	0.000	T3L	13	0.118	0.000	A10
13	0.240	0.000	T3R	62	3.050	0.000	R1.5L
13	0.240	0.000	T5L	62	3.050	0.000	R1.5R
13	0.240	0.000	T5R	62	3.050	0.000	R3L
13	0.240	0.000	T10L	62	3.050	0.000	R3R
13	0.240	0.000	T10R	62	3.050	0.000	R5L
13	0.240	0.000	TCL	62	3.050	0.000	R5R
				32	3.050	0.000	R7L

به این ترتیب بازه‌های مورد قبول برای مدول بستر در هریک از موارد به صورت زیر انتخاب شده است:

- نتایج آزمایش‌های مکانیک خاک برای محورهای گرمسار-سمنان و ایوانکی-گرمسار حاکی از آن است که مقدار CBR بستر بین ۱۰ تا ۴۷ تغییر می‌کند. بنابراین طبق جدول ۶ و نمودار ۳ محدوده مجاز ضریب برجهندگی خاک بستر بین ۷۰۰ تا ۱۴۰۰ کیلوگرم بر سانتیمترمربع (۱۰ تا ۲۰ksi) در نظر گرفته شده است. - CBR خاک بستر در محور زنجان-تبریز از ۱۰ تا ۳۵ متغیر است. بازه پیشنهادی بر اساس جدول ۶ و نمودار ۳ بین ۷۰۰ تا ۱۰۵۰ کیلوگرم بر سانتیمترمربع (۱۰ تا ۱۵ksi) است.

- CBRهای به دست آمده برای فرودگاه رفسنجان، تماماً بالاتر از ۵۰ هستند. بنابراین کاربرد جدول ۶ چندان قابل اطمینان نیست. از سوی دیگر نتایج آزمایشها صراحتاً خاک بستر را از نوع "ماسه با دانه بندی خوب همراه با شن و لای" می‌داند. از آنجا که بازه مدول برجهندگی برای این نوع خاک به طور مشخص در جدول ۵ آمده است، همین محدوده یعنی ۲۵ تا ۳۰ksi (حدوداً ۱۷۰ تا ۲۰۰ کیلوگرم بر سانتیمترمربع) برای خاک بستر انتخاب شده است.

۲-۷ بازه ضرایب ارتجاعی (شامل حد بالا و پایین) و

ضرایب پواسون

حدود انتخابی اولیه برای مدول آسفالت و اساس برای کلیه نرم‌افزارها از جدول ۵ برگرفته شده است. از آنجایی که اغلب روش‌های محاسبه معکوس، کار خود را از بستر آغاز می‌کنند، تعیین حدود مناسب برای ضریب برجهندگی خاک بستر از اهمیت بسیاری برخوردار است. در اینجا سعی شده است با استفاده از نتایج آزمایش‌های مکانیک خاک موجود برای هریک از موارد مطالعاتی، شامل CBR و جنس خاک، بازه مناسب برای ضریب برجهندگی انتخاب شود. (لازم به ذکر است آزمایش CBR، در کلیه موارد از نوع T193 - AASHTO بوده است).

به این منظور دو روش مورد استفاده قرار گرفته است:

۱- گزارش SHRP-90-P-001B، جدول ۵ را برای حدود اولیه پیشنهاد می‌کند

۲- بر اساس بند ۱۱-۴-۱ آیین نامه روسازی راههای ایران (نشریه شماره ۲۳۴)، جدول ۶ و نمودار ۳ برای محاسبه ضریب برجهندگی خاک بستر بکار می‌رود.

جدول ۵. محدوده‌های مجاز ضرایب ارتجاعی [۲]

نوع مصالح	بازه ضریب ارتجاعی (ksi)	بازه ضریب ارتجاعی (Mpa)	ضریب پواسون
PCC (Portland Cement Concrete)	۱۰۰۰ - ۱۰۰۰۰	۶۸۹۰ - ۶۸۹۰۰	۰/۱۵
بتن آسفالتی	۲۰۰ - ۲۵۰۰	۱۳۷۸ - ۱۷۲۲۵	۰/۲۵ - ۰/۳۵
اساس سنی یا سنگ شکسته تثبیت نشده، با زهکشی خوب	۱۰ - ۱۶۰	۶۹ - ۱۱۰۲	۰/۳۵ - ۰/۴۰
اساس سنی یا سنگ شکسته تثبیت نشده، با زهکشی بد	۱۰ - ۱۰۰	۶۹ - ۶۸۹	۰/۴۰ - ۰/۴۲
اساس تثبیت شده با آسفالت	۱۰ - ۹۰	۶۹ - ۶۲۰	۰/۳۵
اساس ماسه ای	۵ - ۸۰	۳۴ - ۵۵۲	۰/۳۵
زیراساس ماسه ای	۵ - ۸۰	۳۴۴۵ - ۱۷۲۲۵	۰/۳۵
اساس و زیراساس تثبیت شده با سیمان	۵۰۰ - ۲۵۰۰	۳۴ - ۱۳۷۸	۰/۲۵ - ۰/۳۵
اساس و زیراساس تثبیت شده با آهک	۵ - ۲۰۰	۲۰ - ۲۸	۰/۲۵ - ۰/۳۵
بستر رسی	۳ - ۴	۲۰ - ۲۸	۰/۴۲ - ۰/۴۵
بستر ماسه ای با دانه بندی خوب	۲۵ - ۳۰	۱۷۲ - ۲۰۷	۰/۴۲ - ۰/۴۵
خاک تثبیت شده با آهک یا لایه Bedrock	۱۰۰ - ۱۰۰۰	۶۸۹ - ۶۸۹۰	۰/۲۰
خاک تثبیت شده با آهک	۱۰۰ - ۴۰۰	۶۸۹ - ۲۷۵۶	۰/۲۵

جدول ۶. رابطه CBR و ضریب برجهنگی برای CBR های کمتر از ۲۵ [۱۱]

ضریب برجهنگی خاک بستر (kg/cm ²)	درصد سی بی آر طرح خاک بستر روسازی	ردیف
(سی بی آر) ۱۰۵	۵ ≤ سی بی آر	۱
(۵ - سی بی آر) ۵۲۵ + ۳۵	۵ ≤ سی بی آر ≤ ۱۰	۲
(۱۰ - سی بی آر) ۷۰۰ + ۲۱	۱۰ ≤ سی بی آر ≤ ۱۵	۳
(۱۵ - سی بی آر) ۸۰۵ + ۱۴	۱۵ ≤ سی بی آر ≤ ۲۵	۴
به شکل ۱۱-۲ مراجعه شود.	۲۵ ≤ سی بی آر	۵

محورهای گرمسار- سمنان و ایوانکی- گرمسار :

مقدار g از آزمایش‌های موجود مشخص نیست. بنابراین طبق جدول ۷ از متوسط مقادیر پیشنهادی برای شن و لای، تقریباً برابر با ۱/۹۲ گرم بر سانتیمتر مکعب (۱۲۰ پوند بر فوت مکعب) استفاده شده است.

محور زنجان- تبریز:

وزن مخصوص متوسط بستر طبق آزمایش، ۱/۶۵ گرم بر سانتیمتر مکعب (تقریباً ۱۰۰ پوند بر فوت مکعب) در نظر گرفته شده است. برای لایه اساس، طبق مطالب ذکر شده در بند قبل مقدار ۱/۹۲ گرم بر سانتیمتر مکعب (۱۲۰ پوند بر فوت مکعب) انتخاب شده است.

نرم افزار ELMOD ضریب پواسون را برای همه لایه‌ها برابر با ۰/۳۵ در نظر می‌گیرد. برای سایر نرم افزارها، مقادیر ضریب پواسون طبق جدول ۵ تعیین می‌شوند. برای سایر نرم افزارها، ضرایب پواسون ۰/۳۵، ۰/۳۵ و ۰/۴۰ به ترتیب برای لایه‌های آسفالتی، اساس و بستر در نظر گرفته شده است.

۳-۷ وزن مخصوص (g)

وزن مخصوص متوسط آسفالت برای کلیه حالات برابر با ۲/۳۵ گرم بر سانتیمتر مکعب (حدوداً ۱۴۰ پوند بر فوت مکعب) فرض شده است. مقادیر وزن مخصوص اساس و بستر برای هریک از موارد به صورت زیر است:

فرودگاه رفسنجان:

طبق نتایج آزمایش‌های مکانیک خاک، مقدار وزن مخصوص اساس و بستر برابر با ۲/۲۰ گرم بر سانتیمتر مکعب (تقریباً ۱۴۰ پوند بر فوت مکعب) منظور شده است.

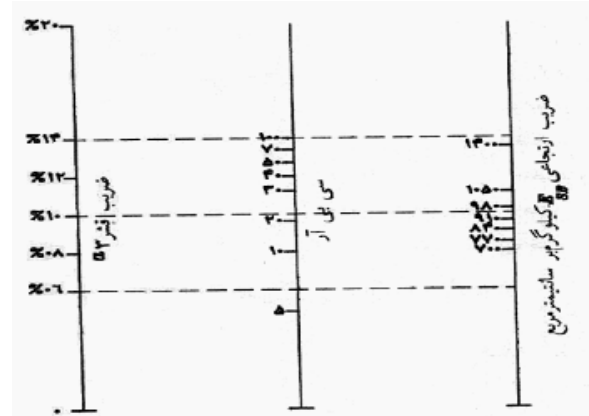
$$RMS(\%) = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^S \left(\frac{w_i^m - w_i^c}{w_i^m} \right)^2} \quad (100) \quad (7)$$

w_i^c تغییر شکل محاسبه شده توسط نرم افزار و w_i^m تغییر شکل برداشت شده توسط FWD در حسگر i ، S تعداد لایه‌ها و n تعداد حسگرها است.

مقادیر RMS کمتر از ۵ درصد مورد قبول قرار گرفته‌اند. از آنجا که تغییر شکل ثبت شده در حسگر مرکزی وابستگی بیشتری به مدول لایه سطحی دارد، در نرم افزار دینامیکی DBSID علاوه بر خطای مذکور، اختلاف بین مقادیر تغییر شکل حداکثر اندازه‌گیری و محاسبه شده در حسگر مرکزی که به اختصار "خطای پیک" خوانده می‌شود نیز در پذیرش یا رد مدول آسفالت حاصل مورد توجه قرار گرفته‌اند.

بنابراین حتی اگر مقدار RMS در حد قابل قبول بوده است، چنانچه خطای پیک قابل ملاحظه بوده باشد، مدول اندازه‌گیری شده در ایستگاه مذکور حذف و در میانگین‌گیری نهایی وارد نشده است. شکل‌های ۴ و ۵، تاریخچه‌های زمانی تغییر شکل اندازه‌گیری و محاسبه شده در دو ایستگاه متوالی را نشان می‌دهد. برای هر دو ایستگاه مقدار RMS کمتر از ۵ درصد است اما در شکل ۵ خطای پیک قابل ملاحظه است. بنابراین ایستگاه مربوط به این شکل کنار گذاشته شده است.

لازم به ذکر است در نمودارهای ۴ تا ۷ منظور از عبارت‌های "tested @ # i" و "calculated @ # i" به ترتیب تغییر شکل اندازه‌گیری شده توسط دستگاه FWD و تغییر شکل محاسبه شده توسط برنامه در حسگر i ام است.



شکل ۳. رابطه CBR و ضریب برجهندگی برای CBRهای بیش از ۲۵ [۱۱]

۷-۴ ضریب میرایی

این مقدار طبق پیش فرض نرم افزار، برای لایه‌های الاستیک میرا، یعنی اساس و بستر برابر با ۴ درصد در نظر گرفته شده است. لازم به ذکر است وزن مخصوص و ضریب میرایی فقط در نرم افزار DBSID وارد می‌شوند.

۸. تحلیل خروجی نرم افزارها

پس از آنکه اجرای هر برنامه به پایان رسید، مقادیر خطای RMS مورد بررسی قرار گرفتند [۱۲]:

جدول ۷. مقادیر پیشنهادی برای m و ضریب میرایی برای لایه‌های اساس و بستر [۱]

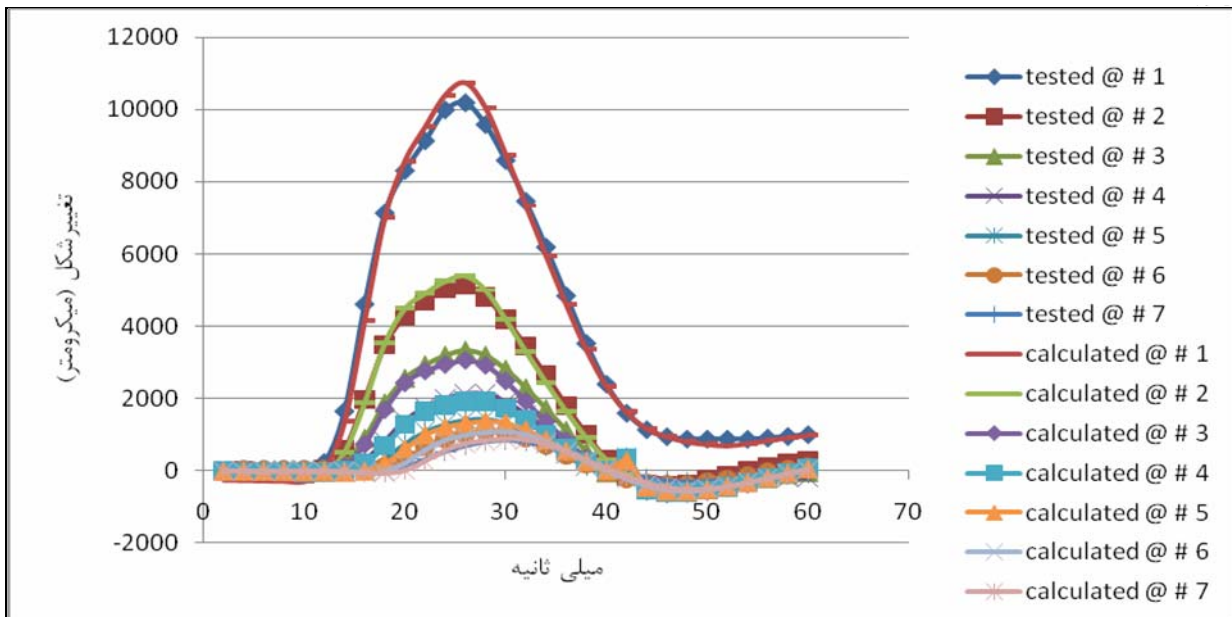
نوع مصالح	ضریب میرایی (%)	وزن مخصوص (lb/ft ³)	وزن مخصوص (gr/cm ³)	درصد طوبت	نسبت حجمی سنگدانه ها θ_s	نسبت حجمی آب θ_w
شن	1.6	130	2.08	0.05	0.75	0.10
لای	4.7	110	1.76	0.12	0.59	0.19
رس با حد خمیری پایین	6.3	115	1.84	0.18	0.59	0.28
رس با حد خمیری بالا	7.5	130	2.08	0.20	0.60	0.35

بالایی برخوردار نبوده‌اند.

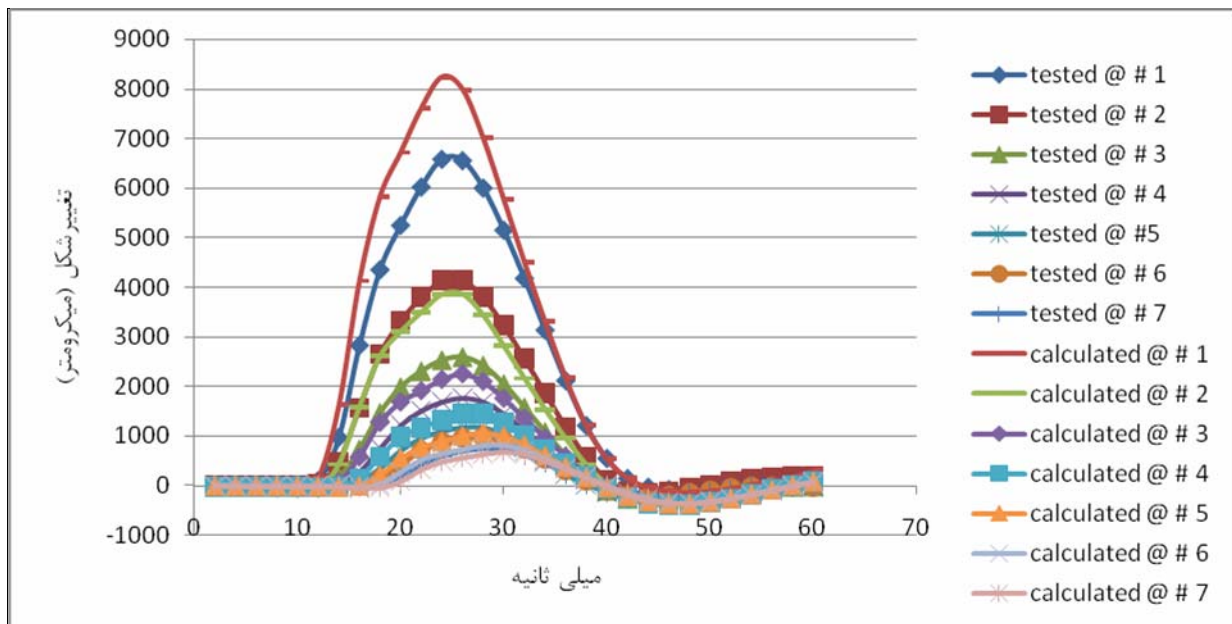
۲- روسازی چه در سطح و چه در لایه‌های زیرین دارای خرابی بوده است. این خرابی‌ها در زمان انجام آزمایش اندازه‌گیری‌ها را در سنسورها تحت تاثیر قرار داده است. بنا به دلایل ذکر شده، نتایج حاصل از محور زنجان- تبریز و همچنین مقاطع ۴، ۵، ۷، ۱۲، ۱۹، ۲۰ تا ۲۲، ۲۴ تا ۲۸ و ۳۲ از محور گرمسار- سمنان در نتیجه گیری نهایی وارد نشده‌اند.

در اغلب مقاطع از محور زنجان- تبریز، هر دو مقدار خطا بسیار بالاست، همچنین نمودار تاریخچه زمانی، شکل بسیار نامنظمی دارد. به علاوه برای برخی مقاطع برنامه‌های استاتیکی و دینامیکی در حین اجرا با مشکل مواجه شدند. (مثلا برنامه DBSID به دلیل اینکه در یک ایستگاه مقدار m منفی شده بود متوقف شد.) علت این اتفاق مورد تحقیق قرار نگرفته است، اما می‌توان آن را ناشی از عوامل زیر دانست:

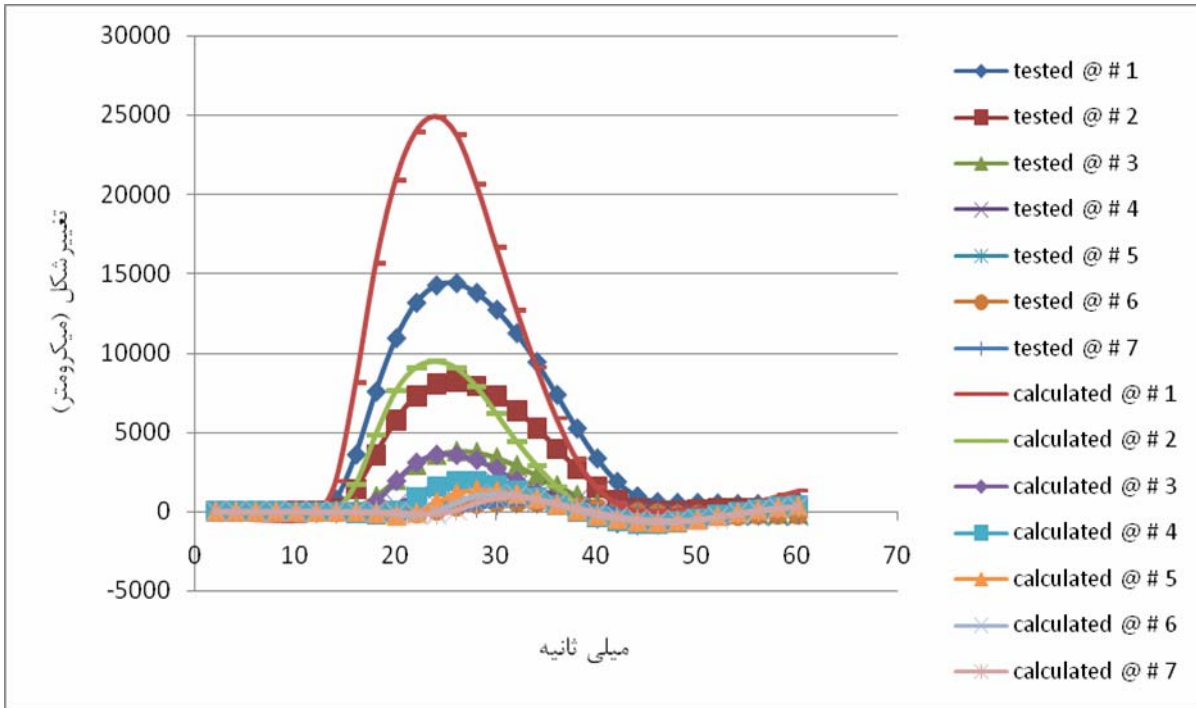
۱- مشکلات مربوط به دستگاه: برداشت‌های FWD از دقت



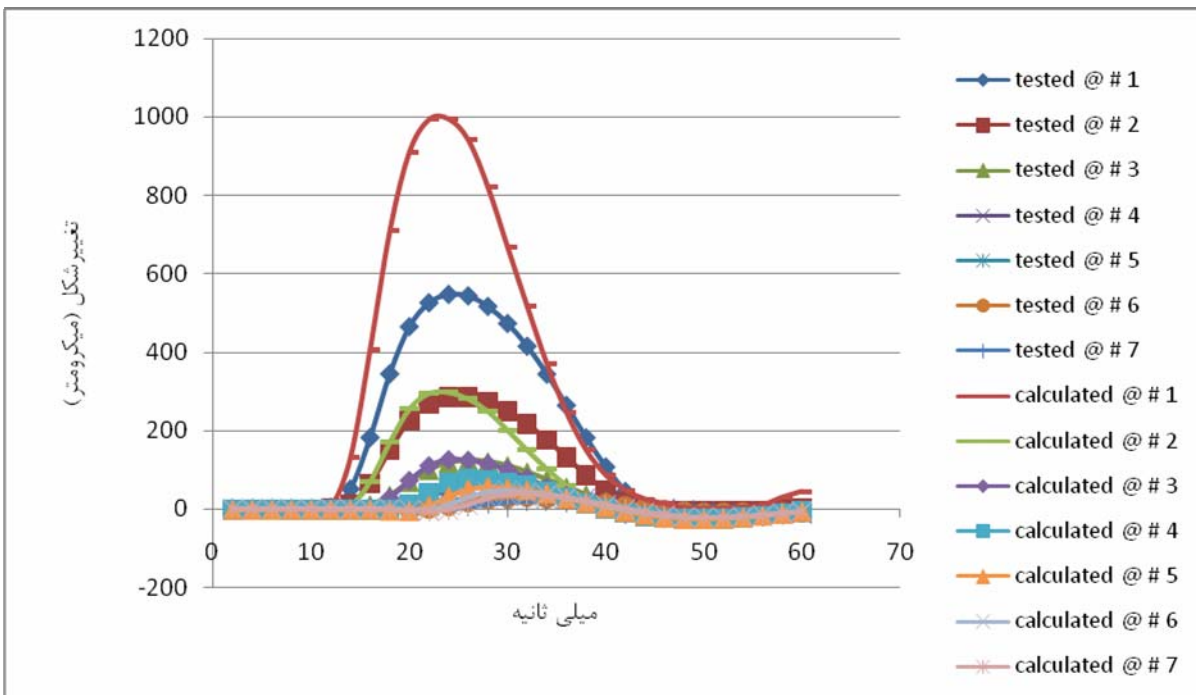
شکل ۴. تاریخچه‌های زمانی تغییرشکلی اندازه‌گیری و محاسبه شده- $RMSE$ پایین است و خطای پیک قابل ملاحظه نیست.



شکل ۵. تاریخچه‌های زمانی تغییرشکلی اندازه‌گیری و محاسبه شده- $RMSE$ پایین و خطای پیک قابل ملاحظه است.



شکل ۶. تاریخچه‌های زمانی تغییرشکلی اندازه گیری و محاسبه شده- RMSE بالا و خطای پیک قابل ملاحظه است.



شکل ۷. تاریخچه‌های زمانی تغییرشکلی اندازه گیری و محاسبه شده- RMSE بالا و خطای پیک قابل ملاحظه است.

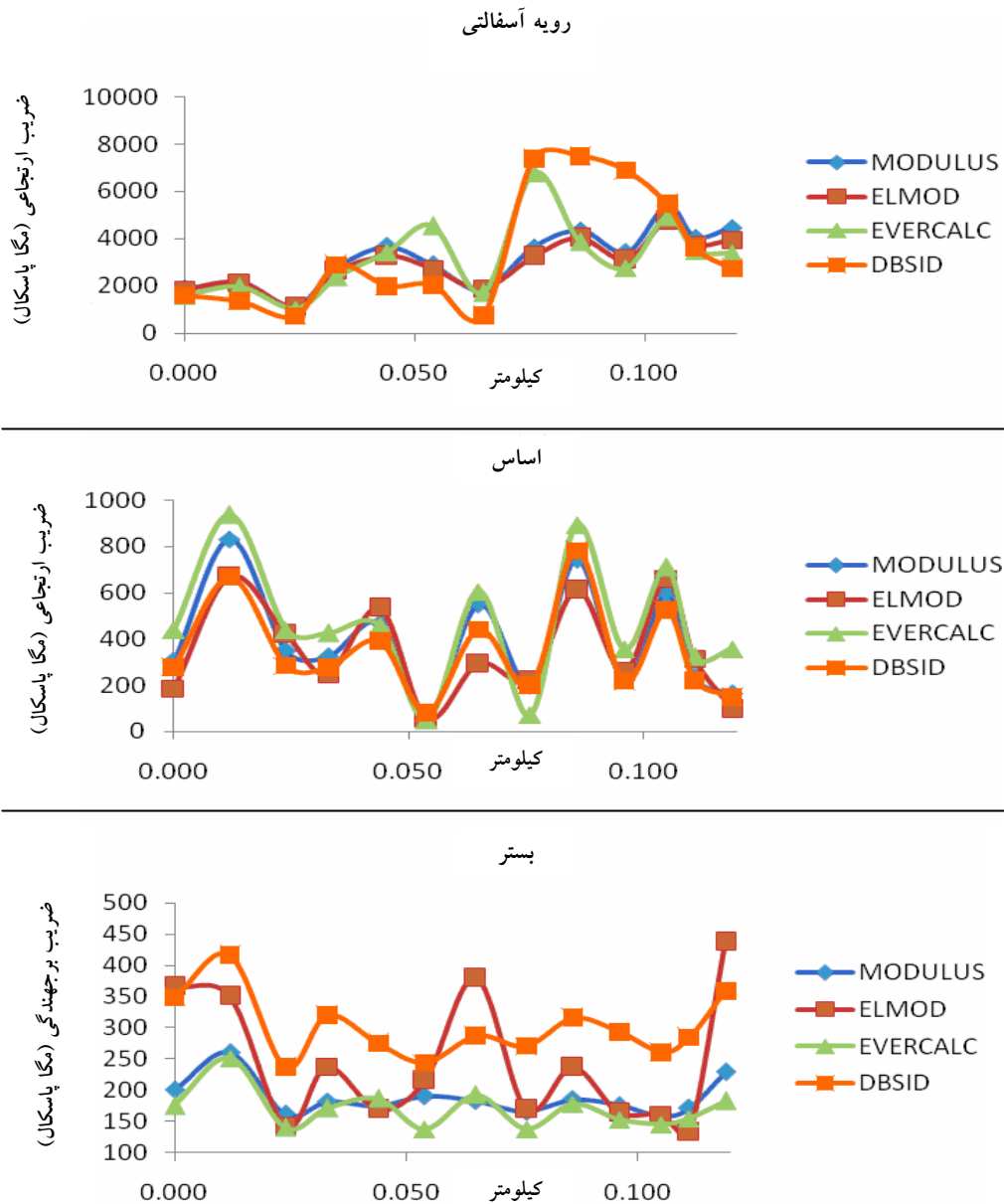
۹. دسته‌بندی نتایج

که از نوع f25 بوده است، برای تحلیل توسط MODULUS نخست به فرمت قابل قبول تبدیل شده است. لازم به ذکر است، ایستگاههای بارگذاری متوالی دارای مقطع روسازی یکسان، تحت عنوان یک فایل تغییرشکلی تحلیل می‌شوند. به طور مثال چنان که

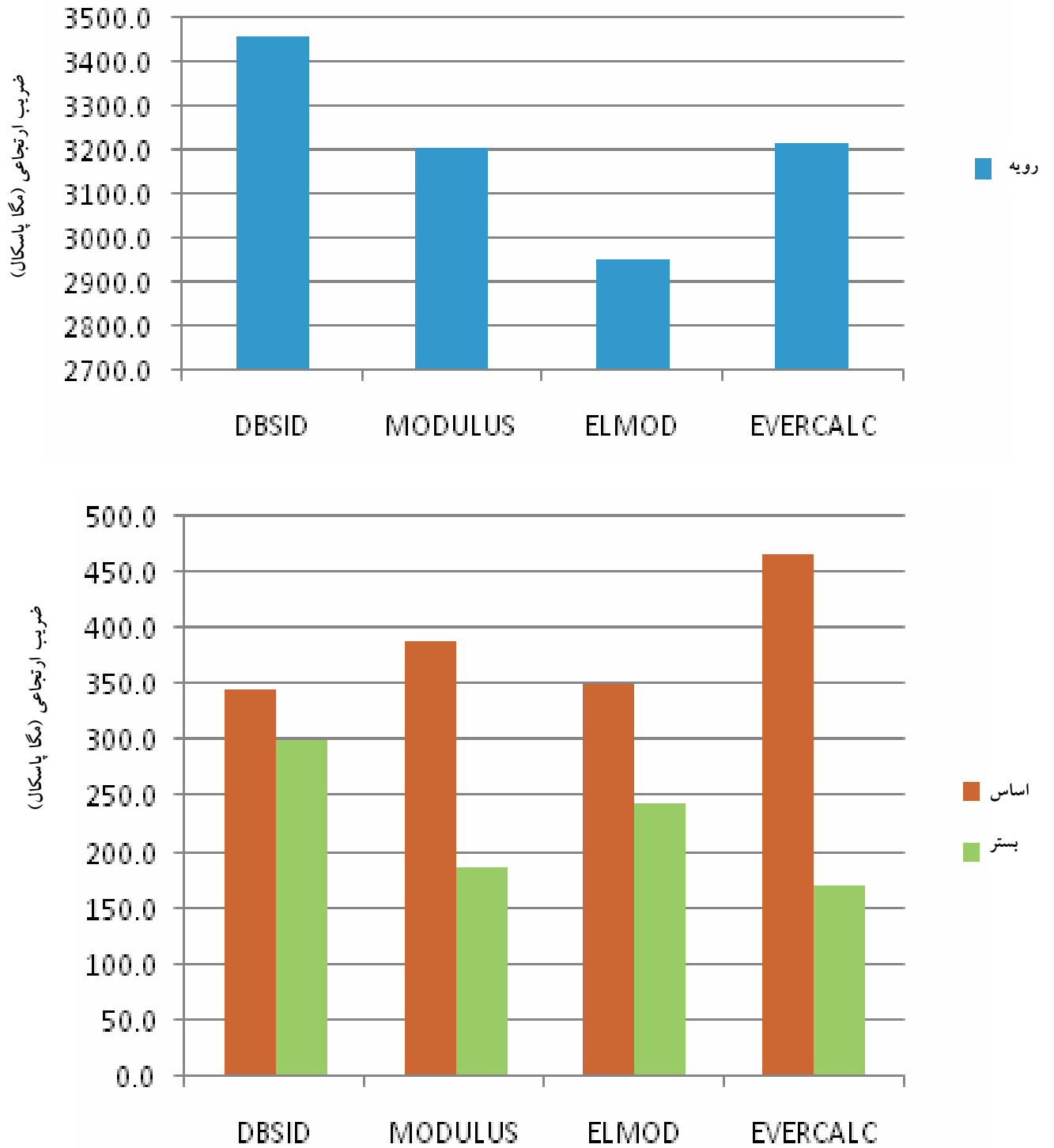
فایل‌های تغییرشکلی ورودی برای نرم افزارهای ELMOD و EVERCALC، دارای پسوند f25 هستند، اما MODULUS فایل‌های دارای پسوند fwd را می‌پذیرد. بنابراین فایل داده‌ای حاضر

بخش دوم شامل نمودارهایی مشابه شکل ۹ است که مدول‌های میانگین (میانگین مدول‌های ایستگاه‌های متوالی در هر مقطع) را که پس از تحلیل به عنوان مدول پیشنهادی مقطع مورد آنالیز شناخته می‌شود، مقایسه می‌کند. جداول ۸ تا ۱۳ حاوی این مقادیر عددی است، که در نتیجه‌گیری نهایی این مقاله به کار آمده‌اند.

کیلومتر a تا b دارای مقطع ۱ و کیلومتر b تا c دارای مقطع ۲ باشد، کیلومتر a تا b یک بار و کیلومتر b تا c بار دیگر مورد تحلیل قرار گرفته و نتایج بطور جداگانه دسته بندی شده‌اند. نتایج حاصل در دو بخش طبقه‌بندی شده‌اند. بخش اول، نمودارهایی مشابه شکل ۸ است که مدول‌های حاصل را برای یک مقطع و در ایستگاه‌های بارگذاری متوالی نشان می‌دهد.



شکل ۸. ضرایب ارتجاعی بدست آمده از نرم افزارهای مختلف مربوط به مقطع Apron1 از فرودگاه رفسنجان



شکل ۹. مقایسه مقادیر متوسط ضریب ارتجاعی مربوط به مقطع Apron1 از فرودگاه رفسنجان

۱۰. خلاصه و نتیجه‌گیری

تغییر شکل‌های برداشت شده توسط دستگاه FWD در ایستگاههای مختلف بارگذاری، برای کیلومترهایی از محورهای آزادراهی گرمسار- سمنان، ایوانکی- گرمسار، زنجان- تبریز و همچنین فرودگاه رفسنجان، توسط سه نرم افزار ELMOD5.0، MODULUS6.0 و EVERCALC5.0 و DBSID مقایسه شده‌اند: محاسبه معکوس قرار گرفتند. نتایج در دو بخش مقایسه شده‌اند:

۱-۱۰ مقایسه نتایج حاصل از نرم افزارهای استاتیکی

۱- در هر سه نرم افزار ELMOD5.0، MODULUS6.0 و EVERCALC5.0 که تحلیل الاستواستاتیک انجام می‌دهند، روند تغییر و همچنین مقادیر متوسط به دست آمده ضریب ارتجاعی آسفالت، مشابهت خوبی دارد (جدول ۸).

۲- ELMOD5.0 در برخی موارد ضریب برجهندگی بستر را دست بالا (بالتر از حد بالای بازه تعیین شده) تخمین می‌زند. بنابراین تحلیل غیرخطی بستر، الزاماً پاسخ‌های صحیحی به دست نمی‌دهد.

۳- MODULUS6.0 و EVERCALC5.0 در بسیاری موارد نتایج مشابهی برای هر سه لایه ارائه می‌دهند. اما از آنجا که همگرایی مدول در EVERCALC5.0 یکی از شرایط پایان برنامه است، نتایج بایستی مورد بازبینی قرار گیرد و تا هنگامی که همگرایی مناسب بین تغییرشکل‌ها نیز حاصل شود، برنامه با تغییر ورودی‌ها مجدداً اجرا شود.

۴- ضریب برجهندگی محاسبه شده توسط MODULUS6.0، در بازه مجاز (که توسط نتایج آزمایش‌های مکانیک خاک تعیین می‌گردد) قرار دارد. همچنین خطای پراکندگی (CV) که از تقسیم واریانس داده‌ها بر میانگین به دست می‌آید، پایین‌تر از مقدار آن برای سایر نرم افزارها و دیگر لایه‌ها و در حدود ۱۰ تا ۱۹ درصد می‌باشد (جدول ۹).

۵- با توجه به اینکه روند محاسبه معکوس، روندی است که از بستر آغاز می‌شود، تخمین صحیح مدول بستر بسیار مهم است. در MODULUS6.0 با تغییر عمق بستر می‌توان مقدار مدول بستر را در بازه مورد نظر قرار داد. با توجه به نکات ذکر شده، برنامه MODULUS6.0 به عنوان نرم افزار برتر انتخاب شده و مبنای مقایسه با نرم افزار دینامیکی قرار گرفته است.

۱۰-۲ مقایسه نتایج تحلیل استاتیکی MODULUS6.0 و

تحلیل دینامیکی DBSID

۱- مدول بستر پیشنهادی برنامه DBSID، حدوداً ۲ برابر مدول بستر حاصل از نرم افزار MODULUS6.0 تخمین زده می‌شود (جدول ۱۰). عمق‌های بستر به دست آمده از تحلیل دینامیک نیز حدوداً ۲/۳ برابر عمق‌های حاصل از تحلیل استاتیک انجام شده توسط برنامه MODULUS6.0 هستند (جدول ۱۱).

۲- مدول اساس برآورد شده توسط نرم افزار MODULUS6.0، تقریباً ۱/۳ برابر مدول اساس پیشنهادی برنامه DBSID است. بنابراین مدول اساس MODULUS6.0 با ضریب ۰/۷۷ قابل تبدیل به مدول اساس DBSID خواهد بود (جدول ۱۲).

۳- مدول آسفالت محاسبه شده توسط برنامه DBSID، اغلب برابر یا بیش از مدول آسفالت MODULUS6.0 برآورد می‌شود. (حداکثر تا ۲۰ درصد). بنابراین نتایج مدلسازی ویسکوالاستیک و الاستیک خطی لایه آسفالتی در دو برنامه مذکور، مشابهت زیادی دارند (جدول ۱۳).

۴- به طور کلی، تحلیل دینامیک تحلیل زمان بری است. در برنامه DBSID نیز تحلیل هر ایستگاه با رایانه‌های شخصی در حدود ۱۰ دقیقه به طول می‌انجامد. با در نظر گرفتن کلیه نکات ذکر شده، نرم افزار MODULUS6.0، در مطالعات موردی انجام شده، به عنوان نرم افزار مناسب‌تر برای تحلیل معکوس پیشنهاد می‌شود.

جدول ۸. مقایسه مقادیر مدول الاستیسیته لایه آسفالتی حاصل از نرم افزارهای استاتیکی (برحسب مگاپاسکال)

فرودگاه رفسنجان

گرمسار - سمنان

نام مقطع	MODULUS	ELMOD	EVERCALC
A1	2765.4	2937.9	2903.9
A2	2639.3	2613.4	2323.1
A3	3202.5	2953.1	3215.8
A4	3429.9	3168.7	3054.0
A5	3182.8	3147.4	2942.2
A6	2995.2	2911.7	3023.4
A7	2478.8	2421.1	2301.9
A8	2747.0	2977.2	2442.7
A9	3101.2	3089.5	3022.6
A10	3163.6	3108.8	2947.7
R1.5L	2800.3	3416.0	2955.1
R1.5R	3012.4	3806.7	3003.0
R3L	3644.1	3688.2	3439.7
R3R	4541.1	4471.6	4198.9
R5L	2321.2	2876.5	2243.5
R5R	3254.3	3546.3	3176.3
R7L	3002.4	3476.5	3015.3
R7R	3564.3	3967.4	3487.9
R10L	3298.5	3795.9	3145.2
R10R	3324.3	3765.4	3249.6
R15L	2998.6	2786.3	26548.9
R15R	3134.2	3006.7	3010.4
R20L	3764.9	3584.3	3654.3
R20R	3232.9	3187.5	3277.7
T1.5L	3611.2	3587.6	3218.8
T1.5R	4459.8	4208.2	3930.9
T3L	3854.4	3632.4	3311.3
T3R	3213.9	3190.8	2990.4
T5L	3232.9	4710.3	3154.0
T5R	4579.8	4309.0	4156.3
T10L	3712.2	3575.9	3187.7
T10R	3710.3	3566.3	3388.8
TCL	3395.6	3179.0	2899.0

شماره مقطع	MODULUS	ELMOD	EVERCALC
1	8316.8	7606.5	7707.7
2	8466.8	6683.7	7525.3
3	9900.8	7325.1	12254.2
4	9389.0	6679.0	8695.2
5	5265.3	4331.0	4537.1
6	3232.9	3744.7	4543.9
7	2439.7	2034.0	1865.1
8	2539.7	2313.4	2877.9
9	11239.6	5922.7	6665.7
10	4985.4	4904.6	5770.2
11	6979.5	3112.2	1428.8
12	2697.4	2985.0	2140.2
13	3330.6	4844.3	3559.0
14	6765.4	5090.5	7301.4
15	8383.3	5219.4	5413.3
16	3268.4	3707.6	2938.4
17	4385.2	2711.6	3308.8
18	3035.7	2312.6	1932.7
19	16931.5	9717.0	13766.2
20	11737.8	9071.0	9189.2
21	9350.4	7728.0	8055.9
22	10074.6	9977.0	8242.9
23	10773.6	10456.4	8321.4
24	10947.5	8715.0	8070.9
25	12325.5	16172.0	8074.4
26	8273.5	8243.0	8075.2
27	8037.9	6936.0	6568.2
28	4467.5	4955.0	3817.5
29	5831.8	3940.4	4723.7
30	14194.6	7549.6	9889.2
31	5271.9	4352.4	3954.6

ایوانکی - گرمسار

شماره مقطع	MODULUS	ELMOD	EVERCALC	شماره مقطع	MODULUS	ELMOD	EVERCALC
1	3809.2	4542.0	3280.0	8	2876.4	2999.5	2923.2
2	2705.4	4232.1	3423.1	9	2712.3	2935.6	2634.3
3	2657.9	3660.0	3616.4	10	3215.2	3101.6	3145.2
4	3003.2	3423.7	2987.4				
5	3987.8	4001.1	3876.4				
6	3456.9	3678.5	3973.5				
7	2934.1	3018.3	3004.8				

جدول ۹- مقایسه مقادیر خطای پراکندگی (CV) مدول بستر حاصل از نرم افزارهای استاتیکی

فرودگاه رفسنجان							
نام مقطع	MODULUS	ELMOD	EVERCALC	نام مقطع	MODULUS	ELMOD	EVERCALC
A1	0.16	2.76	0.26	R7R	0.20	0.23	0.28
A2	0.17	0.36	0.24	R10L	0.15	0.21	0.27
A3	0.15	0.43	0.18	R10R	0.27	0.32	0.21
A4	0.20	0.43	0.29	R15L	0.20	0.33	0.18
A5	0.17	0.44	0.31	R15R	0.08	0.39	0.32
A6	0.20	0.52	0.36	R20L	0.18	0.30	0.27
A7	0.13	0.55	0.15	R20R	0.15	0.43	0.16
A8	0.12	0.50	0.31	T1.5L	0.17	0.61	0.27
A9	0.15	0.49	0.16	T1.5R	0.16	0.66	0.34
A10	0.19	0.50	0.35	T3L	0.12	0.40	0.28
R1.5L	0.18	0.35	0.26	T3R	0.32	0.53	0.34
R1.5R	0.15	0.24	0.32	T5L	0.20	0.32	0.19
R3L	0.15	0.35	0.21	T5R	0.30	0.45	0.25
R3R	0.19	0.38	0.29	T10L	0.14	0.38	0.20
R5L	0.13	0.39	0.18	T10R	0.21	0.53	0.27
R5R	0.19	0.42	0.31	TCL	0.14	0.56	0.32
R7L	0.16	0.42	0.38				
گرمسار - سمنان				ایوانکی - گرمسار			
شماره مقطع	MODULUS	ELMOD	EVERCALC	شماره مقطع	MODULUS	ELMOD	EVERCALC
1	0.19	0.14	0.37	1	0.19	0.25	0.34
2	0.11	0.75	0.22	2	0.15	0.54	0.27
3	0.07	0.26	0.26	3	0.18	0.13	0.12
6	0.19	0.37	0.25	4	0.07	0.34	0.16
8	0.16	0.33	0.36	5	0.18	0.17	0.18
9	0.22	0.53	0.37	6	0.05	0.02	0.32
10	0.18	0.48	0.23	7	0.09	0.34	0.18
11	0.18	0.88	0.40	8	0.11	0.21	0.16
13	0.19	0.42	0.39	9	0.17	0.19	0.19
14	0.18	0.56	0.34	10	0.16	0.08	0.38
15	0.15	0.12	0.18				
16	0.20	0.52	0.38				
17	0.19	0.87	0.40	Average	0.17	0.43	0.21
18	0.16	0.21	0.19				
23	0.19	0.01	0.00				
29	0.19	0.42	0.31				
30	0.19	0.23	0.21				
31	0.15	0.10	1.09				

جدول ۱۰. مقایسه مقادیر مدول بستر حاصل از نرم افزار استاتیکی منتخب و نرم افزار دینامیکی (بر حسب مگاپاسکال)

فرودگاه رفسنجان							
نام مقطع	DBSID	MODULUS	DBSID/MODULUS	نام مقطع	DBSID	MODULUS	DBSID/MODULUS
A1	338.2	186.7	1.81	R7R	361.3	179.5	2.01
A2	326.7	173.6	1.88	R10L	371.5	172.9	2.15
A3	301.1	187.4	1.61	R10R	420.3	191.8	2.19
A4	338.0	204.1	1.66	R15L	354.2	185.4	1.91
A5	343.9	176.5	1.95	R15R	398.2	197.6	2.02
A6	288.1	178.9	1.61	R20L	414.3	175.4	2.36
A7	295.5	180.4	1.64	R20R	380.4	184.0	2.07
A8	322.5	139.7	2.31	T1.5L	319.7	190.4	1.68
A9	363.0	198.5	1.83	T1.5R	332.2	187.3	1.77
A10	356.6	179.7	1.98	T3L	358.0	162.8	2.20
R1.5L	220.6	189.7	1.16	T3R	311.4	176.5	1.76
R1.5R	261.4	181.4	1.44	T5L	379.6	183.9	2.06
R3L	250.8	170.3	1.47	T5R	421.0	192.6	2.19
R3R	310.8	201.3	1.54	T10L	354.6	166.7	2.13
R5L	369.1	205.4	1.80	T10R	417.0	199.9	2.09
R5R	293.2	187.6	1.56	TCL	362.6	171.5	2.11
R7L	394.0	190.4	2.07				
گرمسار - سمنان				ایوانکی - گرمسار			
شماره مقطع	DBSID	MODULUS	DBSID/MODULUS	شماره مقطع	DBSID	MODULUS	DBSID/MODULUS
1	397.7	139.2	2.86	1	284.4	139.2	2.04
2	317.9	137.3	2.32	2	276.3	124.2	2.22
3	269.8	125.5	2.15	3	266.0	146.3	1.82
6	145.1	145.8	1.00	4	245.3	120.1	2.04
8	269.7	115.2	2.34	5	276.3	139.4	1.98
9	304.6	129.9	2.34	6	87.2	143.1	0.61
10	330.8	142.5	2.32	7	300.1	140.2	2.14
11	393.5	147.8	2.66	8	289.3	129.1	2.24
13	315.2	134.7	2.34	9	255.5	115.2	2.22
14	301.4	129.3	2.33	10	249.9	124.2	2.01
15	316.9	136.6	2.32				
16	242.2	113.9	2.13				
17	304.1	145.9	2.08	Total Average			2
18	327.9	141.4	2.32				
23	404.8	172.6	2.35				
29	343.0	154.1	2.23				
30	330.7	153.4	2.16				
31	420.2	134.2	3.13				

بررسی محاسبه معکوس ضرایب ارتجاعی لایه‌های روسازی به روش‌های استاتیکی و دینامیکی...

جدول ۱۱. مقایسه مقادیر عمق بستر حاصل از نرم افزار استاتیکی منتخب و نرم افزار دینامیکی (بر حسب سانتیمتر)

فرودگاه رفسنجان							
نام مقطع	DBSID	MODULUS	DBSID/ MODULUS	نام مقطع	DBSID	MODULUS	DBSID/ MODULUS
A1	536.4	266.2	2.0	R7R	524.3	275.3	1.9
A2	519.0	278.9	1.9	R10L	533.7	304.3	1.8
A3	501.8	275.6	1.8	R10R	502.8	279.9	1.8
A4	562.7	295.9	1.9	R15L	575.5	306.1	1.9
A5	579.4	241.6	2.4	R15R	486.4	274.1	1.8
A6	530.0	244.1	2.2	R20L	478.3	298.5	1.6
A7	540.7	263.7	2.1	R20R	495.0	249.9	2.0
A8	560.5	247.7	2.3	T1.5L	606.0	255.8	2.4
A9	598.1	249.7	2.4	T1.5R	563.0	270.5	2.1
A10	562.2	262.9	2.1	T3L	520.6	232.9	2.2
R1.5L	552.3	249.2	2.2	T3R	610.2	257.0	2.4
R1.5R	563.1	240.8	2.3	T5L	549.5	244.6	2.2
R3L	550.6	239.5	2.3	T5R	585.5	262.6	2.2
R3R	575.6	233.2	2.5	T10L	566.4	257.3	2.2
R5L	553.8	261.1	2.1	T10R	586.9	261.9	2.2
R5R	550.9	250.4	2.2	TCL	540.5	241.0	2.2
R7L	507.7	269.1	1.9				
گرمسار - سمنان				ایوانکی - گرمسار			
شماره مقطع	DBSID	MODULUS	DBSID/ MODULUS	شماره مقطع	DBSID	MODULUS	DBSID/ MODULUS
1	377.2	137.4	2.7	1	393.8	161.0	2.4
2	397.5	141.8	2.8	2	503.4	227.3	2.2
3	343.0	138.9	2.5	3	537.4	230.3	2.3
6	458.6	168.7	2.7	4	454.5	178.0	2.6
8	404.6	150.6	2.7	5	474.0	172.7	2.7
9	434.4	151.5	2.9	6	508.1	187.8	2.7
10	422.4	163.7	2.6	7	533.3	219.7	2.4
11	398.6	139.6	2.9	8	510.1	202.7	2.5
13	372.9	147.5	2.5	9	503.9	211.3	2.4
14	408.2	161.9	2.5	10	512.8	249.4	2.1
15	441.0	152.9	2.9				
16	438.6	158.5	2.8				
17	447.8	183.5	2.4				
18	442.3	156.2	2.8				
23	400.3	143.0	2.8				
29	472.2	169.3	2.8				
30	476.7	172.7	2.8				
31	455.3	160.6	2.8				
Total Average						2.3	

جدول ۱۲. مقایسه مقادیر مدول الاستیسیته لایه اساس حاصل از نرم افزار استاتیکی منتخب و نرم افزار دینامیکی (بر حسب مگاپاسکال)

فرودگاه رفسنجان							
نام مقطع	DBSID	MODULUS	MODULUS /DBSID	نام مقطع	DBSID	MODULUS	MODULUS/ DBSID
A1	415.2	591.2	1.4	R7R	322.5	444.0	1.4
A2	290.9	390.9	1.3	R10L	266.0	410.9	1.5
A3	347.1	388.8	1.1	R10R	280.5	429.5	1.5
A4	386.2	469.7	1.2	R15L	276.5	412.4	1.5
A5	320.4	502.9	1.6	R15R	324.3	453.2	1.4
A6	258.1	392.2	1.5	R20L	313.2	423.3	1.4
A7	293.5	454.2	1.5	R20R	354.9	535.8	1.5
A8	331.5	501.5	1.5	T1.5L	295.0	464.5	1.6
A9	426.0	649.5	1.5	T1.5R	391.0	407.5	1.0
A10	444.8	697.5	1.6	T3L	0.0	330.0	1.2
R1.5L	132.3	184.0	1.4	T3R	339.2	532.6	1.1
R1.5R	124.6	130.8	1.0	T5L	206.8	323.1	1.0
R3L	113.8	132.4	1.2	T5R	288.5	449.8	1.1
R3R	167.5	162.6	1.0	T10L	207.6	315.9	1.1
R5L	164.5	149.5	1.1	T10R	382.2	588.5	1.2
R5R	114.5	174.3	1.5	TCL	228.0	356.5	1.3
R7L	280.5	432.2	1.5				
گرمسار - سمنان				ایوانکی - گرمسار			
شماره مقطع	DBSID	MODULUS	MODULUS/ DBSID	شماره مقطع	DBSID	MODULUS	MODULUS/ DBSID
1	128.2	180.1	1.4	1	34.6	41.5	1.2
2	201.7	281.5	1.4	2	35.5	44.7	1.3
3	145.1	198.5	1.4	3	37.5	44.3	1.2
6	222.5	267.0	1.2	4	43.2	63.4	1.5
8	214.2	320.0	1.5	5	32.4	45.0	1.4
9	95.7	136.2	1.4	6	40.2	42.3	1.1
10	316.9	460.4	1.5	7	42.2	54.3	1.3
11	108.7	131.9	1.2	8	35.4	42.2	1.2
13	573.2	521.1	1.1	9	39.6	44.7	1.1
14	394.6	606.6	1.0	10	42.1	46.5	1.1
15	394.6	119.5	1.2				
16	394.6	120.1	1.1				
17	102.3	135.0	1.3	Total Average			1.3
18	83.8	119.2	1.4				
23	102.3	138.2	1.4				
29	260.2	399.8	1.5				
30	83.5	122.0	1.5				
31	90.8	123.7	1.4				

بررسی محاسبه معکوس ضرایب ارتجاعی لایه‌های روسازی به روش‌های استاتیکی و دینامیکی...

جدول ۱۳. مقایسه مقادیر مدول الاستیسیته لایه آسفالتی حاصل از نرم افزار استاتیکی منتخب و نرم افزار دینامیکی (بر حسب مگاپاسکال)

فرودگاه رفسنجان

نام مقطع	DBSID	MODULUS	(DBSID-MODULUS)/DBSIDx100
A1	2344.3	2765.4	-18.0
A2	2430.5	2639.3	-8.6
A3	3453.4	3202.5	7.3
A4	3314.6	3429.9	-3.5
A5	3247.1	3182.8	2.0
A6	3729.7	2995.2	19.7
A7	2673.7	2478.8	7.3
A8	2322.1	2747.0	-18.3
A9	3899.9	3101.2	20.5
A10	3005.8	3163.6	-5.2
R1.5L	2888.2	2800.3	3.0
R1.5R	3058.7	3012.4	1.5
R3L	3142.4	3644.1	-16.0
R3R	3991.4	4541.1	-13.8
R5L	2595.4	2321.2	10.6
R5R	3423.1	3254.3	4.9
R7L	3241.4	3002.4	7.4
R7R	3674.4	3564.3	3.0
R10L	3654.3	3298.5	9.7
R10R	3345.2	3324.3	0.6
R15L	3002.4	2998.6	0.1
R15R	3198.5	3134.2	2.0
R20L	3876.5	3764.9	2.9
R20R	3343.2	3232.9	3.3
T1.5L	3612.8	3611.2	0.0
T1.5R	4181.2	4459.8	-6.7
T3L	3384.8	3854.4	-13.9
T3R	2766.5	3213.9	-16.2
T5L	2763.8	3232.9	-17.0
T5R	4455.7	4579.8	-2.8
T10L	3652.2	3712.2	-1.6
T10R	3599.4	3710.3	-3.1
TCL	3373.9	3395.6	-0.6

گرمسار - سمنان

شماره مقطع	DBSID	MODULUS	(DBSID-MODULUS)/DBSIDx100
1	8853.1	8316.8	6.1
2	9901.6	8466.8	14.5
3	9966.5	9900.8	0.7
6	4076.2	3232.9	20.7
8	3059.9	2539.7	17.0
9	11411.1	11239.6	1.5
10	5743.5	4985.4	13.2
11	8610.8	6979.5	18.9
13	4172.1	3330.6	20.2
14	8741.8	6765.4	22.6
15	8295.7	8383.3	-1.1
16	3397.8	3268.4	3.8
17	4059.2	4385.2	-8.0
18	2607.2	3035.7	-16.4
23	11369.5	10773.6	1.1
29	6729.2	5831.8	13.3
30	13864.7	14194.6	-2.4
31	5015.1	5271.9	-5.1

ایوانکی - گرمسار

شماره مقطع	DBSID	MODULUS	(DBSID-MODULUS)/DBSIDX100
1	3454.2	3809.2	-10.3
2	2876.4	2705.4	5.9
3	2687.6	2657.9	1.1
4	3123.2	3003.2	3.8
5	4003.7	3987.8	0.4
6	3765.4	3456.9	8.2
7	3111.3	2934.1	5.7
8	2987.4	2876.4	3.7
9	2723.2	2712.3	0.4
10	3323.2	3215.2	3.2

۱۱. پانویس‌ها

- 5- Dynamic Back - calculation by System Identification
- 6- Resilient Modulus
- 7- Root Mean Square

- 1- Iterative
- 2- Texas Transportation Institute
- 3- Database
- 4- Washington State Department of Transportation

6- Elmod 5 Quick Start Manual, (2006), Dynatest.

7- Tawfiq, K. (2003) "Utilizing the falling weight deflectometer in evaluating soil support values of pavement layers", Research Report BC-352, Florida Department of Transportation (FDOT), Florida, United States of America.

8- Westover, T.M. and Guzina, B. (2006) "Engineering framework for the self-consistent analysis of FWD Data", Washington, November 2006, TRB Annual Meeting.

9- Fernando, E. and Liu, W.,(2002) "Dynamic analysis of FWD data for pavement evaluation", Proceedings, Sixth International Conference on the Bearing Capacity of Roads and Airfields, June 2002, Vol. 1, Lisbon, Portugal, pp. 159 – 167.

10- User's manual for: pavement dynamic back-calculation procedure with systems identification method, (1993), Texas A&M University, College Station, Texas.

۱۱- "آئین نامه روسازی راههای ایران" (نشریه ۲۳۴)، ۱۳۸۱، سازمان مدیریت و برنامه ریزی کشور.

12- Everseries User's Guide, Pavement Analysis Computer Software and Case Studies, (2005), Department of Transportation, Washington State.

1- Lytton, R.L. (1989) "Backcalculation of pavement layers properties", Nondestructive Testing of Pavements and Backcalculation of Moduli, ASTM STP1026, A.J. Bush III and G.Y. Baladi, Eds., Philadelphia, pp. 7-35.

2- William, G.W. (1999) "Backcalculation of pavement layers moduli using 3D nonlinear explicit finite element analysis", West Virginia University.

3- Matsui, K and Hachia, Y. (2006) "Influence of seed layer moduli on FEM based modulus backcalculation results, Washington, November 2006, TRB Annual Meeting.

4- Chua, K.M. (1989) "Evaluation of Moduli Backcalculation Programs for Low-Volume Roads", Nondestructive Testing of Pavements and Backcalculation of Moduli, ASTM STP1026, A. J. Bush III and G.Y. Baladi, Eds., Philadelphia, and pp: 398-405.

5- Uzan, J., Lytton, R. and Germann, F.P.(1989) "General procedure for backcalculating layer moduli", Nondestructive Testing of Pavements and Backcalculation of Moduli, ASTM STP1026, A.J. Bush III and G.Y. Baladi, Eds., Philadelphia, pp: 217-227.

Archive