

«یادداشت تحقیقاتی»

ارزیابی سازه‌های آزادراه تهران - قم با استفاده از دستگاه افت و خیزسنج ضربه‌ای (FWD)

امیر کاوسی^{۱*}، شهروز زمانی مرتضوی^۲

۱- دانشیار گروه راه و ترابری بخش مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه تربیت مدرس

۲- کارشناس ارشد مهندسی عمران، دفتر راه و ترابری، سازمان مدیریت و برنامه ریزی کشور

*تهران، صندوق پستی ۱۴۳ - ۱۴۱۱۵

kavusia@modares.ac.ir

(دریافت مقاله: مرداد ۱۳۸۱، پذیرش مقاله: تیر ۱۳۸۳)

چکیده - تعیین ضرایب ارتجاعی لایه‌های مختلف روسازی‌های راه و فرودگاه، ابزار مناسبی برای تعیین توان باربری آنها است. در این تحقیق با استفاده از دستگاه افت و خیزسنج ضربه‌ای بر روی مقاطع متعددی از مسیر سواره رو غربی آزادراه تهران - قم، آزمایش افت و خیز ضربه‌ای انجام شد. آزمایشها بر روی مقاطعی با وضع موجود و مقطعی از آزاده‌راه - که با روش بازیافت سرد تقویت شده بودند - انجام شد. افت و خیزهای جسم راه - که ناشی از سقوط وزنه دستگاه FWD بر روی سطح راه است - توسط کامپیوتر دستگاه ثبت می‌شد. سپس با اخذ اطلاعات مربوط به مصالح راه و انجام محاسبات معکوس، ضریب ارتجاعی لایه‌های مختلف روسازی تعیین شد. با داشتن این پارامتر و استفاده از روشهای طرح روسازی، می‌توان عمر باقی مانده و ضخامت روکش مورد نیاز را تعیین کرد. محاسبات فوق به دو روش یکی با به‌کارگیری روش محاسبه معکوس و دیگری با استفاده از نرم‌افزار کامپیوتری KENLAYER انجام و طرح روکش بر اساس روش آشتو و با اطلاعات حاصل از این دو روش انجام شد. بررسی نتایج محاسبات با دو روش فوق نشان داد که توافق قابل قبولی بین آنها وجود ندارد و ضخامتهای حاصل از هر یک از روشها تفاوت قابل توجهی با هم دارند. مقایسه نتایج حاصل با کارهای قبلی محققان حاکی از آن است که روش دوم نتایج نزدیکتری به واقعیت دارد و شاید بتوان آن را با اطمینان بیشتری به کار برد.

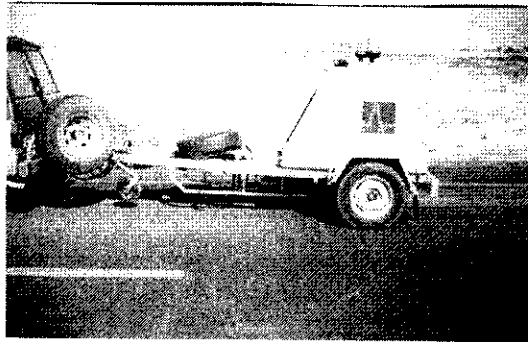
کلید واژگان: دستگاه FWD، ارزیابی سازه‌های روسازی، محاسبه معکوس، ضخامت روکش، عمر روسازی.

۱ - مقدمه

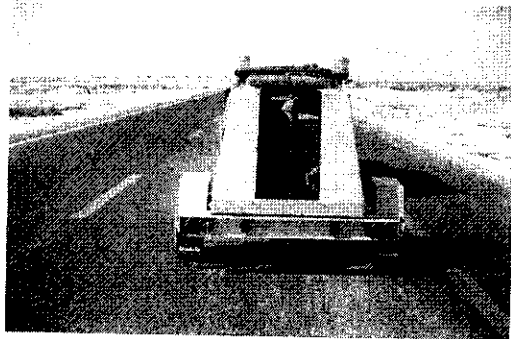
سوندی ادامه یافت تا امروز که استفاده از این روش کاملاً گسترش یافته و به عنوان یک روش آزمایش استاندارد مطرح است [۱].
طرز کار دستگاههای FWD به این صورت است که

دستگاه سنجش فرو رفتگی ناشی از ضربه (FWD) در سال ۱۹۶۳ توسط Bretonniere فرانسوی ساخته و بعد از آن روند تکامل دستگاه توسط مهندسان دانمارکی و

برق خود را از اتومبیل کشنده FWD می‌گیرد، تامین می‌شود. بنابراین اتومبیل کشنده در مکانیزم عملکرد دستگاه نقشی نداشته و صرفاً از آن برای جابه‌جایی و تامین انرژی مورد نیاز دستگاه FWD استفاده می‌شود.



شکل ۱ دستگاه Phoenix FWD و اتومبیل کشنده



شکل ۲ سیستم بارگذاری دستگاه FWD

سیستم بارگذاری دستگاه مورد استفاده، متشکل از هشت جفت وزنه قابل تغییر، هر یک با جرم ۳۰ کیلوگرم و یک وزنه ثابت (استوانه هادی) با جرم ۶۰ کیلوگرم است. سیستم قرائت میزان فرو رفتگیهای ناشی از اعمال ضربه، شامل ۶ ژئوفون است که بر روی تیری در امتداد محل آزمایش نصب شده و در هنگام آزمایش بر روی سطح روسازی قرار می‌گیرند. فواصل آنها از یکدیگر و از محل بارگذاری برحسب شرایط کار و ضخامت لایه‌ها توسط شرکت سازنده توصیه می‌شود. در این تحقیق با توجه به ضخامت لایه‌های مختلف آزاد راه تهران - قم که شامل حدود ۲۰۰ تا ۲۵۰ میلیمتر آسفالت و لایه‌های غیر

وزنه‌ای با سنگینی مشخص از ارتفاعی مشخص به سطح روسازی سقوط کرده و بر اثر ضربه، لایه‌های مختلف روسازی دچار فرو رفتگی و برآمدگی می‌شوند. تعدادی ژئوفون که بر روی تیری فلزی نصب شده و بلافاصله قبل از اعمال ضربه بر روی سطح راه قرار داده می‌شوند، مقادیر فرو رفتگی و برآمدگی را در فواصل متفاوتی از مرکز اعمال ضربه ثبت می‌کنند. این اطلاعات به کامپیوتری که در خودرو حمل دستگاه نصب است منتقل شده و در آنجا ضبط می‌شوند. با وارد کردن اطلاعاتی مانند جنس مصالح و ضخامت لایه‌های روسازی، ضرایب ارتجاعی لایه‌های مختلف تعیین می‌شود.

با این روش می‌توان پس از انجام محاسبات معکوس، عمر باقی مانده راه را به صورت تعداد محور استاندارد که روسازی هنوز ظرفیت پذیرش آن را دارد تعیین کرد و به علاوه طرح تقویت روسازی را به صورت ضخامت روکش مورد نیاز برای ترافیک موردنظر در عمر طرح به دست آورد.

در این تحقیق نتایج حاصل از به کارگیری دستگاه Phoenix FWD در مسیر سواره روی غربی آزاد راه تهران - قم در دو مقطع قبل و پس از تثبیت روسازی تجزیه و تحلیل شده است.

۲ - دستگاه Phoenix FWD

دستگاه FWD مورد استفاده (Phoenix-Model MLY) 10000 است که در شکل‌های ۱ و ۲ نشان داده شده و توسط یک وسیله نقلیه به محل مورد آزمایش - که در این تحقیق خط کناری سواره روی غربی آزاد راه تهران - قم بود - منتقل شد. در این روش برای هر آزمایش لازم است دستگاه کاملاً متوقف شده و ضربه به روسازی وارد شود. اعمال ضربه، با بالا بردن وزنه‌ای تا ارتفاع معین و سپس رها کردن آن تا برخورد به سطح روسازی انجام می‌شود. انرژی لازم برای این کار توسط یک باتری ۱۲ ولتی که

شده ۵۹ مورد و در قسمت بدون بازیافت ۷۴ مورد و دمای متوسط روسازی در عمق ۵۰ میلیمتر، ۳۶ درجه سانتیگراد بود. قبل از انجام آزمایشها کالیبراسیون دستگاه مجدداً توسط شرکت سازنده انجام و این تحقیق با فرض کالیبره بودن دستگاه انجام شده است.

نتایج مربوط به فرو رفتگی و برآمدگیهای ثبت شده در شکل ۳ آورده شده است. با توجه به این شکل ملاحظه می‌شود که عموماً مقادیر حاصل در قسمتهای بازیافت شده آزادراه تغییرات به مراتب بیشتری نسبت به قسمتهای بازیافت نشده دارند. دلیل این امر می‌تواند جوان بودن لایه های آسفالتی و قابلیت انعطاف پذیری زیاد آنها باشد. لازم است ذکر شود که میانگین دمای ثبت شده در هر دو قسمت، به ترتیب ۳۵/۷ و ۳۷/۶ درجه سانتیگراد بود که البته قدری اختلاف بین آنها را نمی‌توان به عنوان پارامتر مؤثری در به وجود آمدن تغییرات زیاد در مقادیر فرو رفتگی و برآمدگی های ثبت شده برای این روسازی (شکل ۳) به حساب آورد.

در مقایسه رفتار لایه های بازیافت شده و بازیافت نشده، قابل توجه است که با افزایش دمای روسازی و فاصله گرفتن از دمای متداول محیط (که استاندارد آشتو پایه ۲۰ درجه سانتیگراد را ملاک قرار داده) در صورتی که ضخامت آسفالت کم باشد، میزان تغییرات در نیمرخ طولی محور (افت و خیزها) بیشتر می‌شود. این برخلاف شرایط آسفالت‌های ضخیم (نظیر روسازی تقویت شده با کف قیر و سیمان) است که در آنها این تغییرات به مراتب کمترند. در این خصوص با رجوع به شکل ۳ همچنین ملاحظه می‌شود که مقادیر برداشت شده توسط ژئوفونهای اول و سوم - که مربوط به اندازه‌گیری فرورفتگی و برآمدگیها در لایه‌های اول و دوم است - تغییرات به مراتب بیشتری در مقایسه با مقادیر مربوط به ژئوفونهای ۵ و ۶ دارند که مربوط به لایه‌های زیرین هستند و کمتر تحت تاثیر ضربه های وارده از FWD قرار می‌گیرند.

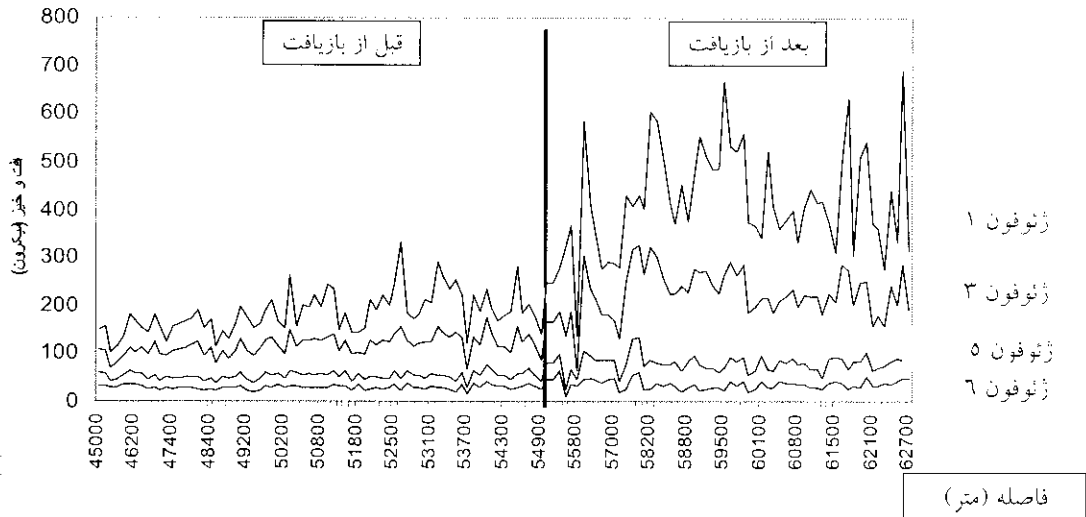
آسفالتی - که هر یک در ضخامت‌های بین ۱۵۰ تا ۲۰۰ میلیمتر اجرا شده‌اند - ژئوفونها بر حسب توصیه شرکت سازنده دستگاه (پس از انجام کالیبراسیون) به ترتیب در فواصل صفر (مرکز صفحه بارگذاری)، ۲۱۰، ۳۳۰، ۵۱۰، ۸۱۰ و ۱۲۷۰ میلی‌متر از صفحه بارگذاری نصب شد. فواصل نقاط مربوط به انجام آزمایش در طول محور مسیر از یکدیگر ۱۰۰ متر و محل آزمایشها در خط کندرو آزادراه بود. برای انجام هر آزمایش، ژئوفونها بر روی زمین قرار گرفته و پس از تنظیم دستگاه، ضربه وارد می‌شود. با اعمال ضربه مقادیر حداکثر فرورفتگیها، مقدار بار وارده و دمای روسازی در کامپیوتر دستگاه به صورت خودکار ثبت می‌شوند.

۳- آزمایش‌ها

آزمایشها در آزاد راه در دو مقطع جداگانه انجام شد. یکی در قسمتی که زیر سازی آن با روش بازیافت سرد بهسازی شده بود و دیگری در قسمتی که روسازی قبلی در سالهای گذشته فقط روکش شده بود. لازم است ذکر شود که عملیات اجرایی در قسمت بازیافت شده، شامل برداشت ۱۰ سانتی‌متر از رویه قدیمی و حذف آن از روسازی و تثبیت حدود ۲۵ سانتی‌متر از ضخامت روسازی تثبیت شده با کف قیر و سیمان بود. پس از آن یک لایه آسفالتی به ضخامت ۶ سانتی‌متر روی آن اجرا شده بود.

مغزه‌گیری از آزادراه در قطعه‌ای که بازیافت نشده بود (وضع موجود) نشان داد که روسازی شامل سه لایه آسفالت و دولایه از مصالح دانه‌ای به ضخامت متوسط ۳۸ سانتی‌متر است. مصالح دانه‌ای از جنس مصالح زیر اساس بوده و آزادراه فاقد قشر اساس سنگدانه‌ای است. از این مقدار ضخامت حدود ۲۰ سانتی‌متر آسفالت و بقیه مصالح زیر اساس است.

تعداد آزمایش‌های انجام گرفته در قسمت بازیافت



شکل ۳ مقادیر افت و خیز در ژئوفونهای ۱، ۳، ۵، ۶

تعیین ضرایب ارتجاعی لایه‌های مختلف روسازی‌های آسفالتی ارائه کرده است [۸] - می‌توان به توان باربری روسازی دست یافت:

الف) ضریب ارتجاعی بستر راه

$$E_{sg} = C \left(\frac{0.24 \times P}{r \times d_r} \right) \quad (1)$$

در این رابطه:

E_{sg} : ضریب ارتجاعی بستر (psi)

P : بار وارده در آزمایش (پوند)

r : فاصله ژئوفون مورد نظر از مرکز صفحه بارگذاری (اینچ)

d_r : فرو رفتگی یا برآمدگی در فاصله r از مرکز صفحه بارگذاری (اینچ)

C : ضریب تصحیح که مؤسسه آشتو آن را برای روسازی‌های آسفالتی برابر ۰/۳۳ و برای روسازی‌های بتنی برابر ۰/۲۵ در نظر گرفته است.

ب) ضریب ارتجاعی بتن آسفالتی

$$E_{ac} = 15000 - 7900 \times \log(t) \quad (2)$$

در این رابطه پارامترها به صورت زیر تعریف شده است:

E_{ac} : ضریب ارتجاعی آسفالت (psi)

۴ - ضریب ارتجاعی

یکی از روش‌های مستقیم برای تعیین مقاومت لایه‌های روسازی تعیین ضرایب ارتجاعی لایه‌ها از طریق داده‌های حاصل از آزمایش غیرمخرب FWD است [۲، ۳].

در تحلیل بررسی داده‌ها و نتایج حاصل از کاربرد دستگاه FWD در آزاد راه تهران - قم با انجام مغزه‌گیری برای تعیین ضخامت لایه‌های مختلف و اطلاعات مربوط به بارگذاری روسازی، هدف اصلی تعیین ضرایب ارتجاعی لایه‌های مختلف بود.

این امر با فرض رفتار ارتجاعی برای لایه‌ها است که مطابق نظر برخی از محققان در شرایط دمای کم محیط و سرعت بارگذاری زیاد در مورد روسازی‌های آسفالتی، پدیده‌ای قابل قبول است [۴ - ۶]. اما اگر مقدار بار وارده در مقایسه با میزان بارپذیری لایه‌های روسازی کم باشد، در این حالت نیز می‌توان تغییر شکل ایجاد شده پس از هر مرتبه بارگذاری را با تقریب زیاد بازگشت‌پذیر دانست و لذا در نظر گرفتن رفتار ارتجاعی در این شرایط نیز فرضی معقول خواهد بود [۷].

با فرض فوق و با استفاده از روابط تجربی زیر - که مؤسسه آشتو در شرایط استفاده از دستگاه FWD برای

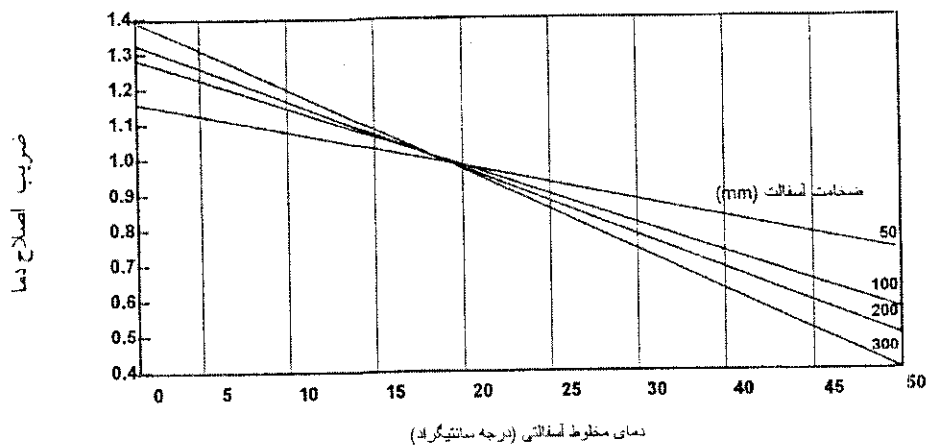
۱: دما (درجه سانتی‌گراد)

همانطور که ملاحظه می‌شود پارامتر دما نقش عمده‌ای در مقدار ضریب ارتجاعی لایه‌های آسفالتی دارد که باید در محاسبات به نحو مقتضی منظور شود. تأثیر این پارامتر به شرح زیر است.

۴-۱- تأثیر دما

مهمترین عامل تأثیرگذار در تعیین ضریب ارتجاعی آسفالت دما است [۹، ۱۰]. البته درصد قیر، فضای خالی مخلوط و فرکانس بارگذاری نیز تأثیر قابل توجهی دارند، اما نقش دما مهمتر است. تصحیح داده‌ها برحسب دما به دو شکل کلی انجام می‌شود. یکی با روش مؤسسه آشتو که در آن مقادیر فرو رفتگی‌ها و برآمدگی‌ها در اولین ژئوفون، مستقیماً قبل از محاسبه معکوس ضریب ارتجاعی لایه‌ها تعیین می‌شوند و توسط روابط و نمودارهای

پیشنهادی، نسبت به یک دمای مرجع تصحیح می‌شوند. روش دیگر، تصحیح ضریب ارتجاعی آسفالت محاسبه معکوس شده است [۱۱].
نرم‌افزار RoSy شرکت سازنده FWD مورد استفاده در پروژه (شرکت Phoenix) با استفاده از رابطه‌ای چندجمله‌ای از درجه پنج "رابطه ۳" را تعیین و با ضرب آن در مقدار ضریب ارتجاعی آسفالت، آن را برای دمای مرجع ۲۵ درجه سانتی‌گراد تصحیح می‌کند. اما در روش آشتو با استفاده از شکل ۴ مقدار فرو رفتگی و برآمدگی‌ها قبل از انجام محاسبه معکوس نسبت به دمای استاندارد ۲۰ درجه سانتی‌گراد تصحیح می‌شود [۸]. ضریب تصحیح علاوه بر دما با ضخامت آسفالت نیز مرتبط است که این در شکل ۴ نیز در نظر گرفته شده است.



شکل ۴ ضریب تصحیح درجه حرارت مؤسسه آشتو برای روسازی با اساس دانه‌ای یا قیری [۸]

روسازی و ضخامت لایه ها و با استفاده از روابط پیشنهادی آشتو به عنوان ضرایب ارتجاعی اولیه روسازی را تحلیل کرده و مقادیر فرو رفتگی و برآمدگی را در محل ژئوفونهای دستگاه FWD در روسازی شبیه سازی شده، توسط نرم افزار محاسبه می کنند. این افت و خیزها با افت و خیزهای واقعی مقایسه شده و به روش سعی و خطا - با تغییر مقادیر ضرایب ارتجاعی اولیه - به ضرایب ارتجاعی واقعی نزدیک می شوند. وقتی اختلاف بین افت و خیزهای محاسباتی و افت و خیزهای واقعی از حد مجاز کمتر شد، مقادیر ضریب ارتجاعی در این حالت، به عنوان ضرایب ارتجاعی محاسبه معکوس شده معرفی می شود.

البته قابل ذکر است که ضریب ارتجاعی رویه های نازک آسفالتی را نمی توان از روشهای محاسبه معکوس به دست آورد. زیرا با کمی تغییر در مقدار افت و خیز، تغییر زیادی در ضریب ارتجاعی محاسبه معکوس شده به دست می آید. بنابه توصیه شارپ، مقدار ضریب ارتجاعی رویه نازک آسفالتی مقدار 150 ksi و ثابت در نظر گرفته شده است (شکل 9 به صورت خط مستقیم برطبق توصیه شارپ).

5 - نتایج

نتایج اطلاعات دستگاه FWD که از دو طریق «اخذ مستقیم با استفاده از نرم افزار RoSy» و «محاسبه شده با معادلات (1) تا (3) و در قالب نرم افزار KENLAYER» حاصل شده در اشکال 5 تا 12 آورده شده است.

شکل 5 مربوط به محاسبه ضریب ارتجاعی برای قشر رویه (E_1) در مقطعی از آزاده راه است که در آن صرفاً چند سال بعد از ساخت، روکش اجرا شده است.

با توجه به این شکل ملاحظه می شود که اولاً مقادیر به دست آمده با این روش، اغلب در محدوده زیاد و بیش از دو برابر مقادیر مربوط به محاسبه با روش آشتو

$$\begin{cases} E_{\text{standard}} = f(t) \times E_1 \\ f(t) = 2.965 \times 10^{-7} \times t^5 - 2.243 \times 10^{-5} \times t^4 - \\ 5.9664 \times 10^{-4} \times t^3 - 6.7109 \times 10^{-3} \times t^2 + \\ 4.7746 \times 10^{-2} \times t + 0.499373 \end{cases} \quad (3)$$

در این رابطه t دمای آزمایش (درجه سانتی گراد) و E_1 ضریب ارتجاعی در دمای t (برحسب psi) است.

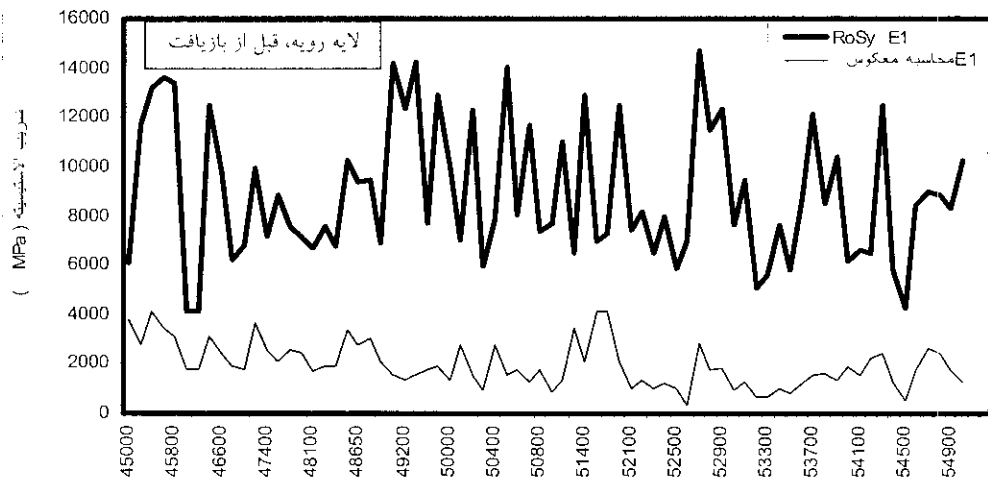
4-2- محاسبات معکوس

منظور از محاسبات معکوس¹ در این تحقیق، تعیین ضریب ارتجاعی لایه ها، محاسبه عمر باقی مانده روسازی و تعیین ضخامت روکش مورد نیاز برای تقویت روسازی است. این کار به دو روش مجزا انجام شده است. یکی با استفاده از داده های حاصل از دستگاه FWD که در آن محاسبات مستقیماً از طریق به کارگیری نرم افزار RoSy شرکت سازنده دستگاه انجام می شود. روش دیگر اخذ اطلاعات مورد نیاز از روسازی و استفاده از روابط فوق آشتو برای تعیین ضریب ارتجاعی لایه ها است. در حالت اول نرم افزار RoSy مستقیماً عمر باقی مانده و ضخامت روکش را به دست می دهد. اما در حالت دوم - که از روابط آشتو [8] برای تعیین عمر باقی مانده روسازی و ضخامت روکش مورد نیاز استفاده شد - نرم افزار KENLAYER (که در طراحی و محاسبه معکوس ضرایب ارتجاعی لایه های روسازی ها کاربرد دارد) استفاده شد. نرم افزار KENLAYER دو کاربرد عمده دارد: یکی طراحی روسازی به روش تحلیل تنش - کرنش و دیگری محاسبه معکوس ضرایب ارتجاعی لایه های مختلف روسازی طراحی شده برای بارهای وارد شده. در این تحقیق فقط برای محاسبه معکوس لایه های مختلف روسازی از این نرم افزار استفاده شده است. روش کار به این صورت است که با معلوم بودن بارهای وارده به

1. Back Calculation

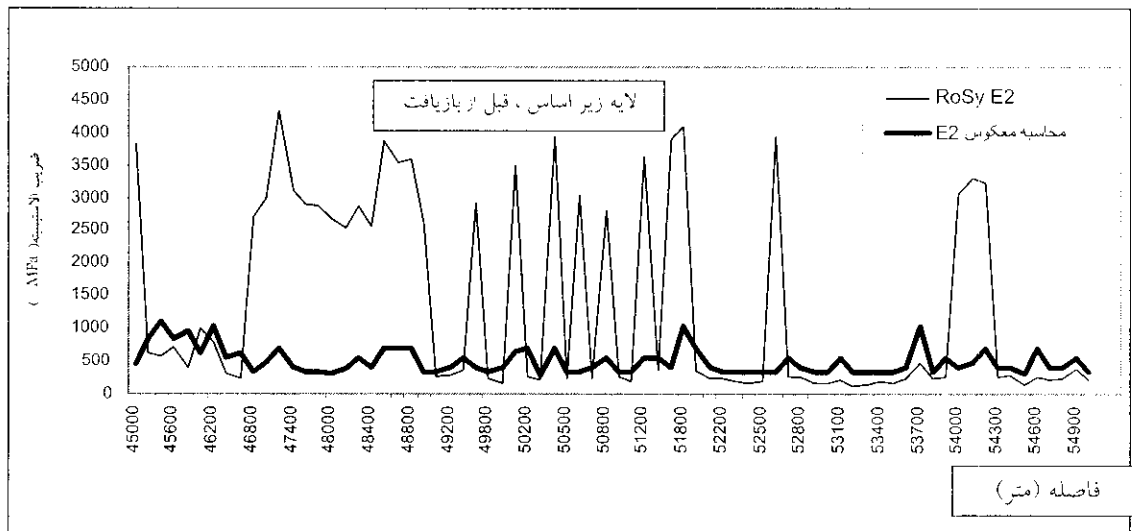
صادق است. البته شدت تغییرات ضرایب ارتجاعی و مقدار اختلاف مربوط به محاسبات RoSy و معادلات آشتو در هر یک از حالات متفاوت است.

صورت مستقیم از دستگاه FWD (توسط نرم‌افزار RoSy) معمولاً زیاد بوده و با روش محاسبه معکوس مطابقت ندارند. این امر - همانطور که در شکل‌های ۵ تا ۱۲ دیده می‌شود در اغلب شرایط و برای همه لایه‌های روسازی



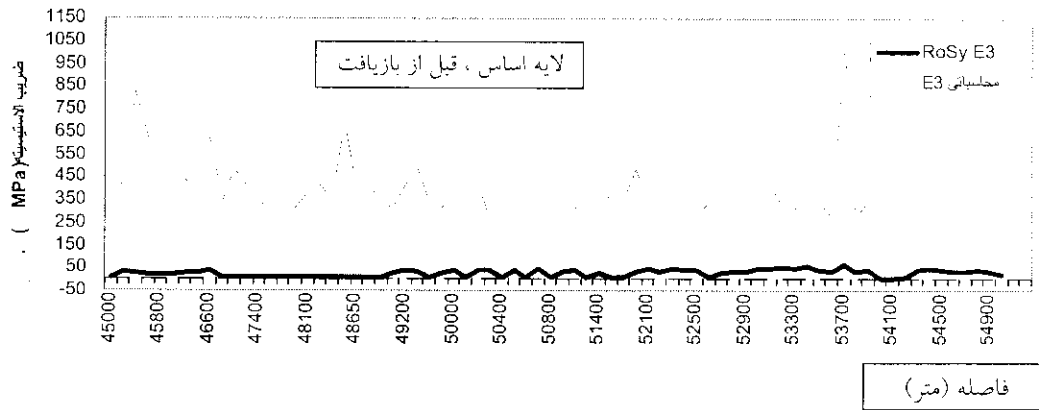
فاصله (متر)

شکل ۵ مقایسه ضرایب ارتجاعی محاسبه معکوس و نتایج RoSy برای قشر رویه، قبل از بازیافت (بارویه ضخیم)

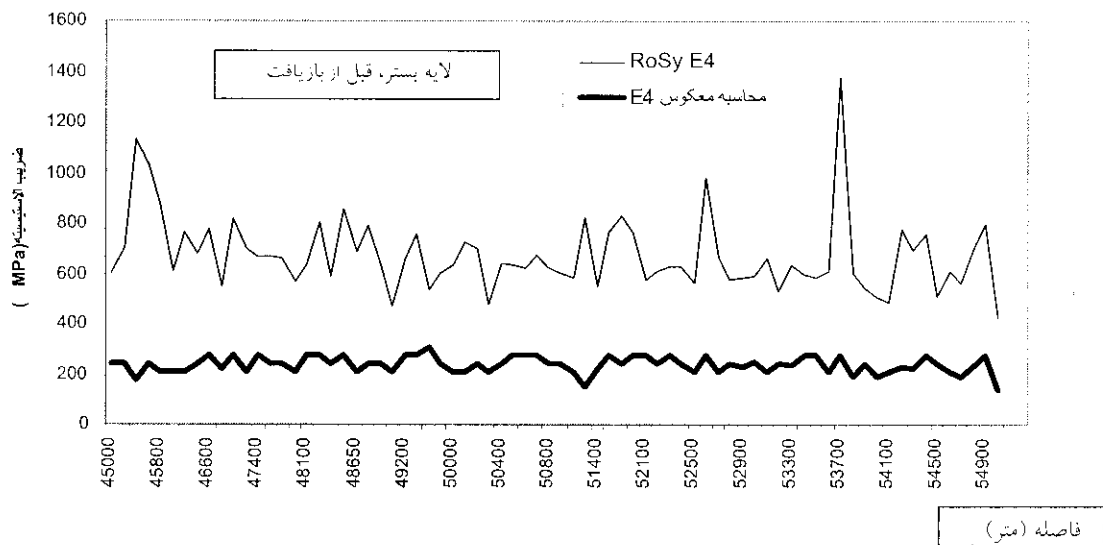


فاصله (متر)

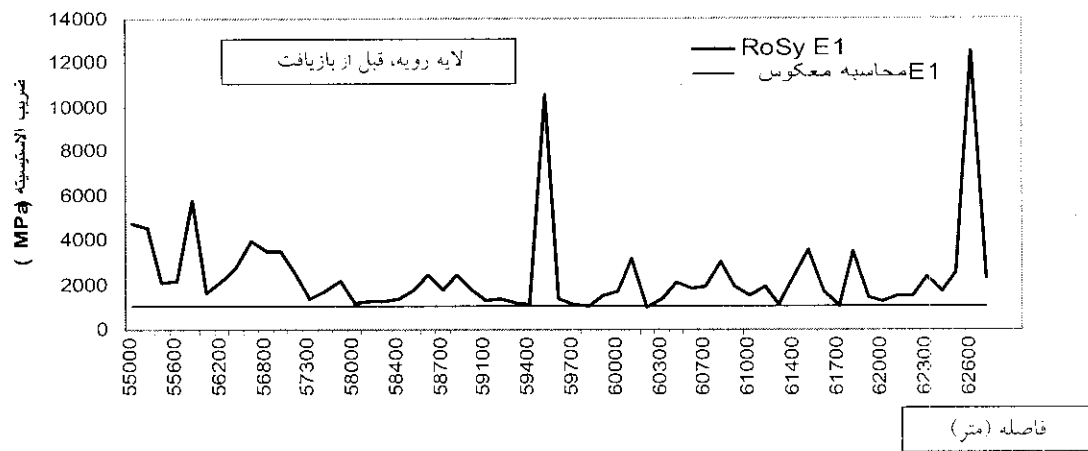
شکل ۶ مقایسه ضرایب ارتجاعی حاصل از محاسبه معکوس و نتایج RoSy برای قشر اساس، قبل از بازیافت (با رویه)



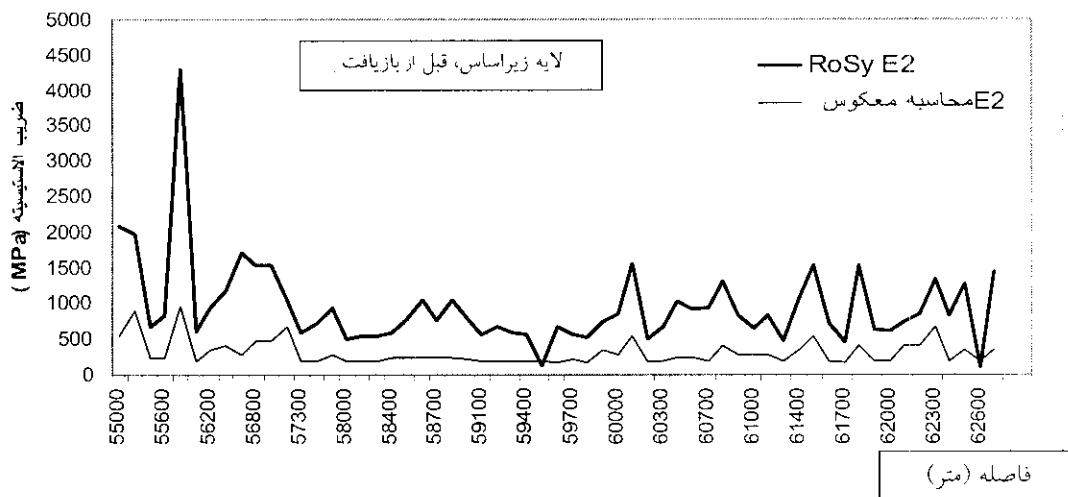
شکل ۷ ضرایب ارتجاعی حاصل از محاسبه معکوس و نتایج RoSy برای قشر زیراساس، قبل از بازیافت (با رویه ضخیم)



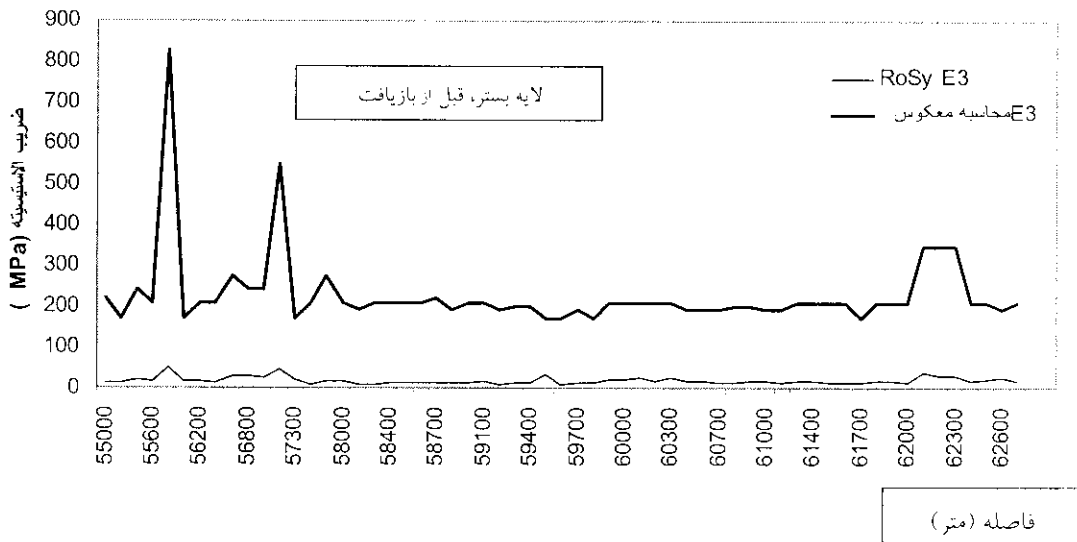
شکل ۸ ضرایب ارتجاعی حاصل از محاسبه معکوس و نتایج RoSy برای قشر بستر، قبل از بازیافت (با رویه ضخیم)



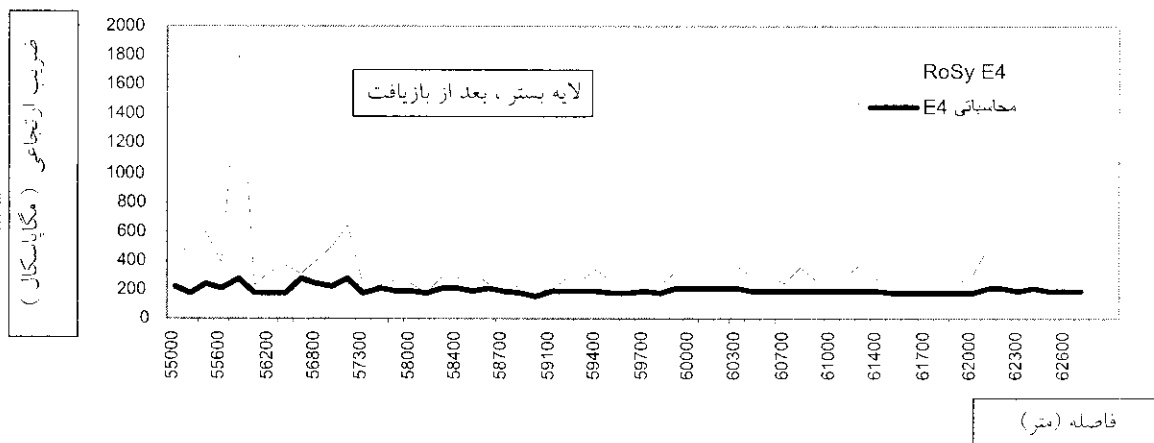
شکل ۹ ضرایب ارتجاعی حاصل از محاسبه معکوس و نتایج RoSy برای قشر رویه، بعد از بازیافت (با رویه نازک)



شکل ۱۰ ضرایب ارتجاعی حاصل از محاسبه معکوس و نتایج RoSy برای قشر اساس، بعد از بازیافت (با رویه نازک)



شکل ۱۱ ضرایب ارتجاعی حاصل از محاسبه معکوس و نتایج RoSy برای قشر زیر اساس، بعد از بازیافت (با رویه نازک)



شکل ۱۲ ضرایب ارتجاعی حاصل از محاسبه معکوس و نتایج RoSy برای قشر بستر، بعد از بازیافت (با رویه نازک)

۶- بحث

از مقایسه نتایج حاصل که در شکل‌های ۵ تا ۱۲ ارائه شده کاملاً واضح است که همخوانی مناسبی در هیچ یک از شرایط بین نتایج حاصل از دو روش فوق وجود ندارد. البته اگر منحنی تغییرات لایه‌های بالا تا پایین مقایسه شوند مشخص می‌شود که مقدار اختلاف و نوسانات ضرایب ارتجاعی لایه‌های زیراساس و بستر آماده شده راه E_1 و E_2 محاسبه شده با دو روش، کمتر از لایه‌های فوقانی (E_3 و E_4) است.

اختلاف بین نتایج FWD و آزمایش‌های آزمایشگاهی قبلاً توسط سایر محققان نیز گزارش شده [۱۲، ۱۳]، اما مقدار اختلاف بین لایه‌ها کمتر مورد توجه قرار گرفته است. اگر روند تغییرات ضرایب ارتجاعی برحسب نوع روسازی (روسازی قدیمی روکش شده در مقایسه با روسازی بازیافت شده) بررسی شود (مقایسه شکل‌های ۵ تا ۸ با شکل‌های ۹ تا ۱۲)، نتیجه می‌شود که روند تغییرات در حالت دوم یعنی در روسازی‌های بازیافت شده، کمتر بوده و مقادیر حاصل، پایداری و همخوانی بهتری دارند. علت این پدیده شاید به هم پیوستگی لایه‌ها با یکدیگر و انسجام روسازی‌های بازیافت شده باشد، در حالی که در روسازی‌های معمولی ممکن است عدم پیوستگی لایه‌ها به یکدیگر، به تغییرات زیاد بین مقاومت لایه‌های مختلف و در نتیجه حصول مقادیر متفاوت ضرایب ارتجاعی لایه‌ها منجر شود.

۷- نتیجه‌گیری

نتایج حاصل از بکارگیری یک دستگاه FWD در آزادراه تهران - قم را می‌توان به شرح زیر خلاصه نمود:

۱- تجربه آزمایش دستگاه FWD در دو مقطع یکی روکش شده و دیگری بازیافت شده (با کف قیر و سیمان) از آزادراه نشان داد که لایه‌های بازیافت شده همانند

لایه‌های دانه‌ای تثبیت شده عمل کرده و ضریب ارتجاعی آنها با دستگاه FWD قابل اندازه‌گیری است.

۲- از آنجا که تأثیر دما بر نتایج ضرایب ارتجاعی زیاد است لازم است قبل از هرگونه تجزیه و تحلیل، نتایج حاصل با توجه به دما تصحیح شوند. انجام محاسبه معکوس برحسب دمای ۲۰ درجه سانتیگراد که پیشنهاد موسسه آشتو است می‌تواند روش مناسبی باشد.

۳- محاسبات هم مستقیماً از طریق نرم‌افزار دستگاه و هم با استفاده از روابط پیشنهادی موسسه آشتو و به روش محاسبه معکوس انجام شد. مقایسه داده‌های حاصل با کار قبلی محققان، بیانگر آن بود که روش محاسبه معکوس استفاده از روابط پیشنهادی موسسه آشتو، همخوانی بهتری با کارهای قبلی داشته و نرم‌افزار دستگاه در همه موارد ارقام زیادتری به دست می‌دهد.

۴- مقایسه نتایج آزمایش‌ها در قسمت بازیافت شده با قسمت روکش شده، نشان داد که اصولاً لایه‌های بازیافت شده ضرایب ارتجاعی بیشتری دارند. علت این امر شاید استفاده از قدری سیمان در تثبیت لایه‌های بازیافت شده، انسجام و ضخامت بیشتر آنها باشد.

۸- منابع

- [1] ASTM D4695; Standard Test Method for Deflections with a Falling Weight Type Impuls Load Device; American Society For Testing and Materials; USA; 1999.
- [2] Ullidtz, P.; Stubstad, R.; "Structural Evaluation of Highway and Airfield PCC Pavements Using the Falling Weight Deflectometer"; Proceeding, 3rd International Conference on Concrete Pavement Design and Rehabilitation; Purdue University, USA; April 1985.
- [3] Touma, B.E.; Corvetti, J.A.; Shahin, M.Y.; "The Effect of Various Load Distributions on the Back Calculated

- and Pavement Evaluation”; Proceedings, Non Destructive Testing of Pavements and Back Calculation of Layer Moduli; 2nd Vol.; Philadelphia, USA; 1994.
- [10] Stock, A.; Yu, J.; “Use of Surface Deflection for Pavement Design and Evaluation”; Transportation Research Record No. 954, Transportation Research Board, Washington DC; USA; 1983.
- [11] Uzan, J.; “Dynamic Linear Back Calculation of Pavement Material Parameters”; Journal of Transportation Engineering; March/April 1992; pp 109-126.
- [12] Livneh, M.; “A Portable FWD for Determining In-Situ Asphalt Layers Moduli”; Mechanical Tests for Bituminous Materials, Edited by Di Benedetto H. and Francken L., Published by A.A. Balkema, Brookfield; Rotterdam; Netherlands; 1997.
- [13] George, K.P.; “In-Situ and Laboratory Characterization of Nonlinear Pavement Layer Moduli, Nondestructive Testing of Pavements and Back Calculation of Moduli”; Second Volume; Philadelphia, USA; 1994.
- Moduli Values in Flexible Pavements”; Transportation Research Board, Washington D.C.; USA; January 1990.
- [4] Moore, W.; Hall, J.; Hanson, P.; “An Introduction Into Non Destructive Structural Evaluation of Pavements”; Circular No. 189, Transportation Research Board; Washington D.C.; USA; January 1978.
- [5] Hoffman, M.S.; Thompson, M.R.; “Mechanistic Interpretation of Non Destructive Pavement Testing Deflections”; University of Illinois at Urbana Champaign; Report No. UILU-ENG-81-2010; USA; 1981.
- [6] Kavussi, A.; Atabaki, M.A.; “Strengthening a Heavily Trafficked Road Using Foam Bitumen Technique”; Proceedings, 10th REAAA Conference; 4-9 September; Tokyo, Japan, 2000.
- [7] Huang, Y.H.; “Pavement Analysis and Design”; University of Kentucky, Prentice Hall Inc.; USA; 1993.
- [8] AASHTO Design Guide of Pavement Structures; American Association of State Highways and Transportation Officials; USA; 1993.
- [9] Stubstad, R.N.; “Effect of Material Stress Sensitivity on Back Calculated Moduli