یادداشت پژوهشی

بررسی میدانی عملیات بهسازی به روش بازیافت‌سرد درجا با قیرامولسیون (مراحل مطالعات، اجرا و عملکرد)

امیرمدرس (مسئول مکاتبات)، استادیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، بابل، ایران
مجید رحیم‌زاده، دانش آموخته کارشناسی ارشد، دانشکده فنی، دانشگاه تهران، مهندسین مشاور پایداری سازه و راه، تهران، ایران
محسن ضرابی،دانش آموخته کارشناسی ارشد، دانشکده مدیریت، دانشگاه کرمان، و شرکت ساختمانی و راهسازی ۱۱۵
E-mail: a.modarres@nit.ac.ir

دریافت:۹۱/۱۲/۱۳ پذیرش:۹۲/۰۶/۰۴

چکیده

بازیافت سرد درجا، یکی از روش‌های نوین بهسازی روسازی‌های آسفالتی به شمار می‌رود. اگرچه مطالعات و تحقیقات آزمایشگاهی و میدانی گسترده‌ای در این زمینه انجام شده‌است، اما به دلیل تأثیر عوامل مختلف و متغیرهای زیاد، همچنان نیاز به افزایش اطلاعات و تجربیات در این زمینه وجود دارد. در این تحقیق با مطالعه موردی مراحل مختلف عملیات بهسازی در محور سمنان- دامغان شامل مطالعات میدانی، جزئیاتی از عملیات اجرایی و بررسی عملکرد پیشنهاداتی جهت انتخاب یک پروژه مناسب برای بهسازی به روش بازیافت سرد درجا ارایه شده‌است. در مرحله مطالعات، علاوه بر بررسی‌های محلی و جمع‌آوری اطلاعات مربوط به وضعیت خرابی‌های موجود، آزمایشهای مخرب و غیرمخرب نیز در مسیر انجام شده و طراحی با استفاده از روش‌های مستقیم و غیرمستقیم صورت پذیرفت. با توجه به نتایج به دست آمده از مطالعات، مسیر به قطعات طرح مختلفی تقسیم شده و با استفاده از دو روش روکش سنتی و بازیافت سرد، مورد بهسازی قرار گرفت. پس از اتمام عملیات بهسازی، عملکرد روسازی اجرا شده به مدت ۵ سال بعد از اجرا بررسی شد. از مجموع ۱۶۵ کیلومتر از مسیر که ۱۰٤ کیلومتر آن به روش بازیافت‌سرد و مابقی به روش سنتی مورد بهسازی قرار گرفت، در حدود ۱۵٤ کیلومتر هیچ‌گونه خرابی مهم و سازه‌ای مشاهده نشد. در ۱۱ کیلومتر از مسیر که به روش بازیافت‌سرد بهسازی شد، خرابی‌هایی از حدود ۶ ماه پس از اتمام عملیات مشاهده شد. با انجام بررسی‌های دقیق میدانی، مهم‌ترین علل وقوع خرابی‌ها، عدم تراکم و باربری کافی مصالح بستر، عدم وجود لایه‌های اساس و زیراساس با کیفیت مطلوب و پایین‌تر بودن مشخصات مقاومتی لایه بازیافتی نسبت به مقادیر در نظر گرفته شده در طراحی شناخته شد. در نهایت با توجه به ارزیابی‌های میدانی، معیارهایی کمی به عنوان حداقل مشخصات مورد نیاز در یک پروژه برای بهسازی به روش بازیافت سرد ارایه گردید.

واژه های کلیدی: بهسازی، بازیافت‌سرد، قیرامولسیون، سیمان، بررسی عملکرد، آزمایش‌های مخرب و غیرمخرب

۱. مقدمه

امروزه استفاده از فنآوری بازیافت سرد درجا با قیرامولسیون، به دلیل سرعت اجرای مناسب، کاهش بهره‌برداری از معادن طبیعی، کاهش آلودگی محیط‌زیست، کاهش مصرف انرژی، امکان اصلاح خرابی‌های عمقی روسازی و پیشرفت ماشین‌آلات و تجهیزات اجرایی، گسترش قابل توجهی یافته‌است. علاوه بر خصوصیات مفید ذکر شده، پیشرفت‌های اخیر در خصوص تولید قیرامولسیون و آزمایش‌های کنترل کیفیت آن، به همراه افزایش تجربیات اجرایی در این زمینه، باعث گسترش بیش از پیش استفاده از این روش در بهسازی روسازی‌های آسفالتی شده‌است.

طبیعتاً این روش نیز مانند بسیاری از روش‌های بهسازی سنتی و نوین در کنار مزایای متعدد دارای معایب و معضلاتی است. یکی از این معضلات، لزوم جمع‌آوری داده‌ها و اطلاعات اولیه نسبتاً گسترده جهت شناخت دقیق پروژه و کنترل دقیق عملیات اجرایی است. متغیربودن وضعیت موجود لایه‌های مختلف روسازی و زیرسازی مانند تغییر ضخامت لایه‌های آسفالتی، تغییر نوع و مقدار قیر در آنها، وجود مناطق لکه‌گیری شده و تغییر در نوع و مشخصات لایه‌های اساس، زیراساس و بستر، به همراه پیچیدگی نسبی کار با دستگاه‌ها و ماشین‌آلات مربوط به بازیافت‌سرد باعث افزایش سختی در کنترل عملیات اجرایی شده و می‌تواند احتمال موفقیت پروژه را کاهش دهد.

۲. مرور مراجع

اگرچه استفاده از تجهیزات پیشرفته بازیافت سرد تنها در حدود ۲۰ سال اخیر در دنیا گسترش یافته و عمر پروژه‌های بازیافتی در ایران به حدود ۱۰ سال می‌رسد، اما استفاده از این روش در مناطق مختلف دنیا دارای سابقه‌ای حدود ۵۰ سال است [ARRA 2001]. در کنار تحقیقات گسترده آزمایشگاهی که در این زمینه انجام شده‌است، گزارشات بسیاری از مطالعات میدانی انجام شده در این زمینه منتشر شده است. علی‌رغم اینکه این مطالعات منتهی به یک دستورالعمل جامع یا آیین‌نامه استاندارد نشده، اما دستورالعمل‌هایی به‌صورت راهنمایی و توصیه‌های فنی و اجرایی به عنوان نتایج این تحقیقات ارایه شده است.

در سال ۲۰۰۷ گزارشی از مطالعات آزمایشگاهی و میدانی انجام شده در زمینه عملکرد بلندمدت راه‌های بازیافتی در ایالات مختلف آمریکا ارایه شد. براساس نتایج به دست آمده از این تحقیق انتخاب روش، تجهیزات اجرا و شرایط میدانی نقش بسزایی در موفقیت یک پروژه خواهند داشت. به هر حال نتایج این بررسی‌ها نشان داد که میزان صرفه‌جویی اقتصادی در این پروژه‌ها در صورتی‌که مراحل انتخاب پروژه و روش بازیافت به درستی انجام شود، به بیش از ۶۰ درصد نیز می‌رسد. علاوه بر صرفه‌جویی در هزینه‌های اجرایی و مصالح مورد نیاز، کاهش مدت زمان اجرا و وقفه کمتر در جریان ترافیک نسبت به روش‌های متداول بهسازی نیز باعث صرفه‌جویی قابل توجهی در هزینه‌های مستقیم و غیرمستقیم پروژه خواهد شد. نتایج این تحقیق اثبات کرد که لایه بازیافت‌شده می‌تواند به عنوان یک لایه جاذب تنش که دارای سختی کمتر و فضای خالی بیشتری نسبت به لایه آسفالتی متداول است عمل نماید[Iowa Highway Research Board, 2007].

در طراحی روسازی این نکته باید مورد توجه قرار گیرد که لایه بازیافتی حتی در صورت باربری کافی نمی‌تواند به عنوان سطح نهایی یا لایه رویه مورد بهره‌برداری قرار گیرد. بنابراین همواره لازم است حداقل یک لایه روکش از آسفالت گرم بر روی آن اجرا شود. مهم‌ترین دلایل قابل ذکر عدم مقاومت سایشی کافی این لایه در برابر ضربات مستقیم چرخ وسایل‌نقلیه بخصوص در ابتدای دوره ساخت و عمل‌آوری و وجود فضای خالی بالا در این لایه است. فضای خالی بالا باعث نفوذپذیری بیش از حد شده که این مساله می‌تواند دوام لایه بازیافت‌شده را تحت تأثیر قرار دهد. از دیگر دلایل این مساله می‌توان به ناهمواری سطح تمام شده لایه بازیافتی

اشاره کرد که معمولا در لایه آسفالت گرم مشاهده نمی‌شود. [Miro et al. 2004, Suleiman, 2002, Moreira & Simoes, 2004]

فضای خالی بالا در لایه بازیافتی (معمولا بین ۹ تا ۱۵ درصد) به وجود رطوبت در آن نسبت داده می‌شود که باعث جذب بخشی از تنشهای تراکمی شده و دستیابی به فضای خالی کمتر را مشکل می‌کند. زمانی که از سیمان یا سایر افزودنی‌های پوزولانی در آن استفاده می‌شود، سختی بالای ناشی از گیرش اولیه یکی دیگر از عوامل تراکم‌ناپذیری و وجود فضای خالی بالا در این لایه است. مورد اخیر می‌تواند در افزایش ناهمواری لایه به دست آمده نیز تاثیرگذار باشد [Salomon & Newcomb, 2000, Rita et al, 2001, Issa et al. 2001, Miller et al. 2006, Oruc et al. 2006].

یکی از پارامترهای مهم در انتخاب پروژه، شرایط آب و هوایی منطقه است. معمولاً حداقل دمای مناسب برای اجرای عملیات بازیافت‌سرد با قیرامولسیون یا کف قیر به ۱۰ درجه سانتیگراد محدود می‌شود. اشکال اجرایی در بازیافت سرد با کف قیر در دماهای کمتر از این مقدار معمولاً شامل عدم پوشش مناسب و کافی قیر روی سنگدانه‌ها است. در مورد بازیافت با قیرامولسیون، طولانی شدن زمان عمل‌آوری مهم‌ترین معضل ذکر شده در مراجع است. تکمیل عمل‌آوری در این شرایط گاهی تا چندین ماه پس از اتمام اجرا به تأخیر می‌افتد. در شرایط آب و هوایی مرطوب استفاده از قیرامولسیون می‌تواند نتایج موفقیت آمیزی را به دنبال داشته باشد. اصولاً در این شرایط، استفاده از کف قیر یا روش‌های متداول اجرای آسفالت گرم یا نیمه‌گرم مناسب نخواهد بود. بنابراین نوع روش انتخابی در مناطق مرطوب معمولاً به استفاده از قیرامولسیون محدود می‌شود [Miro et al. 2004, Julian and Zhanping 2010, Hamad et al., 2012].

مهم‌ترین بررسی‌های مورد نیاز در انتخاب یک پروژه به صورت خلاصه شامل ارزیابی شرایط روسازی موجود از جمله نمونه‌گیری و آزمایش آسفالت فرسوده شده، اساس، زیراساس و بستر، بررسی تاریخچه ساخت و نگهداری مسیر و وضعیت ترافیکی در مسیر است [Salomon & Newcomb, 2000, Iowa Highway Research Board, 2007] .

از جهت نوع، شدت و مقدار خرابی‌های موجود، تقریباً تمامی خرابیهای موجود در روسازی‌های آسفالتی قابل اصلاح به روش بازیافت‌سرد هستند. روسازی‌های فرسوده‌ای که دارای ترک‌های متوسط تا شدید خستگی، حرارتی، انعکاسی، تغییرشکل‌های ماندگار ناشی از مخلوط آسفالتی ناپایدار و شن‌زدگی گسترده هستند را می‌توان به‌خوبی با استفاده از روش بازیافت اصلاح کرد[AASHTO AGC-ARTBA Joint Committee, 1998]. در مقابل وجود برخی از خرابی‌ها و معضلات می‌تواند منجر به عدم موفقیت در پروژه شود. برخی از این موارد شامل انواع خاصی از خرابی‌ها بوده و برخی از آنها مربوط به شرایط هندسی و اجزا دیگر مسیر هستند.

برخی از مهم‌ترین این موارد به شرح زیراند[Kandhal & Malick, 1997, Batista, 2004, Epps, 1990, Frosberg et al., 2001, Fiser .and Varaus, 2004]

- شیارافتادگی و نشست‌های شدید به دلیل بالابودن درصد قیر در آسفالت.
- خرابی‌های ناشی از وجود رطوبت بیش از حدیا ناپایداری لایه‌های اساس، زیراساس و بستر در صورتی‌که عمق اصلاح شده شامل این لایه ضعیف نباشد.
- خرابی‌های ناشی از تورم ایجاد شده بعد از یخبندان یا رطوبت اشباع در لایه‌های خاکی زیرین.
- عریان‌شدگی شدید در صورتی‌که منشاء آن نوع مصالح‌سنگی باشد.
- وجود تعداد قابل توجهی از ورودی‌های سیستم فاضلاب و زهکشی در سطح روسازی
- شیب‌های نسبتاً زیاد به خصوص بزرگ تر از ۵ درصد و طول بیش از ۸۰۰ متر که باعث کندی حرکت ماشین‌آلات

سنگین بازیافت می‌گردد. در این موارد حرکت در جهت معکوس نیز به سختی قابل کنترل خواهد بود.

- مناطقی که همواره در سایه بوده و در مقابل تابش مستقیم قرار ندارند. در این شرایط زمان عمل‌آوری می‌تواند طولانی شود.
- حداقل ضخامت لایه بازیافتی باید در حدود ۲ اینچ باشد، در غیر این صورت به دست آوردن یک لایه همگن بسیار سخت خواهد بود. علاوه براین، استفاده از تجهیزات بازیافت درجا برای بازیافت لایه‌ای به ضخامت کمتر از ۲ اینچ اقتصادی نیست.

در این مقاله ضمن بررسی مراحل طراحی و مطالعات (شامل مطالعات میدانی و آزمایشگاهی) و عملیات اجرایی در پروژه بهسازی محور سمنان- دامغان عملکرد روسازی تا ۵ سال بعد از اتمام عملیات بهسازی مورد ارزیابی قرار گرفته‌است.

۳. موقعیت پروژه

محور مورد مطالعه شامل مسیر سمنان- دامغان به طول ۱۰۵ کیلومتر است که یک راه چهارخطه جدا شده است. مناطق مورد مطالعه شامل کیلومتر ۰ تا ٦۰ در جهت سمنان – دامغان (باند جنوبی) و کل مسیر برگشت در جهت دامغان- سمنان (باند شمالی) بوده‌است.

٤. بررسی‌های میدانی

مراحل مطالعات و طراحی در این پروژه شامل بررسی‌های میدانی و جمع‌آوری اطلاعات مربوط به تاریخچه ساخت مسیر، خرابی‌های مشاهده شده در سطح آسفالت و محاسبه شاخص وضعیت روسازی (PCI)، انجام آزمایش‌های مخرب شامل نمونه‌گیری از لایه‌های آسفالتی و لایه‌های زیرین و ارزیابی‌های غیرمخرب با استفاده از تجهیزات FWD و GPR بوده‌است. در واقع در طراحی ضخامت روکش از هر دو روش مستقیم و غیرمستقیم استفاده شد.

٤-۱ بررسی وضعیت روسازی

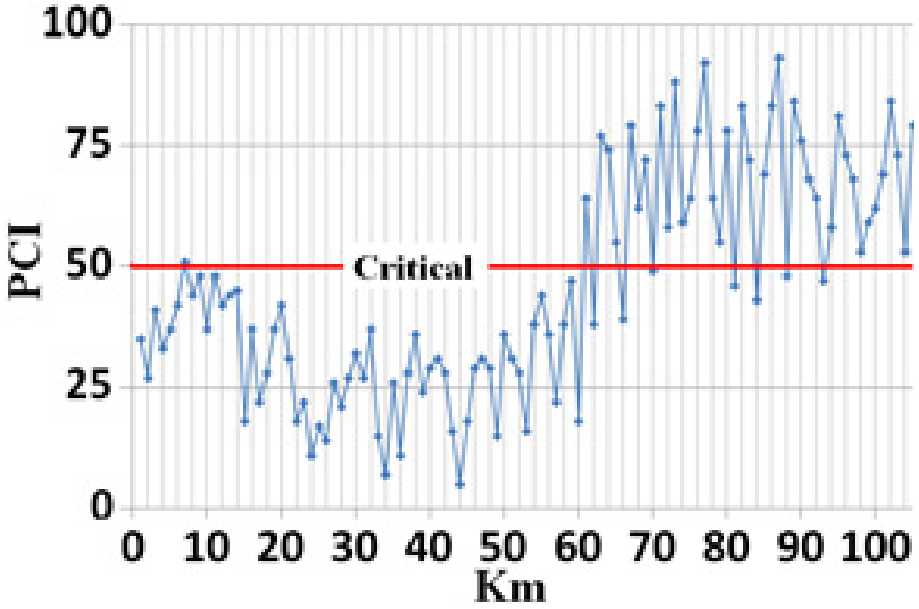
وضعیت روسازی موجود از نظر نوع، شدت و گستردگی انواع خرابی‌ها مورد ارزیابی قرار گرفته و شاخص وضعیت روسازی (PCI) محاسبه شد. شکل ۱، وضعیت سطح روسازی را در قسمتی از مسیر نشان می‌دهد. مهم‌ترین خرابی‌های مشاهده شده شامل ترک‌های خستگی با شدت متوسط تا بالا، به همراه تغییرشکل‌های ماندگار به‌خصوص در مسیر کندرو بوده‌است. با توجه به اطلاعات تاریخچه‌ای مسیر، آخرین عملیات بهسازی حدود ۱۵ سال قبل انجام شد. این عملیات شامل ارتقاء مسیر از راه دوخطه به راه اصلی چهارخطه بوده و پس از آن هیچ‌گونه عملیات بهسازی اساسی در مسیر انجام نشد. مسیر سمنان- دامغان در ابتدا به صورت یک راه دوخطه احداث شده و در عملیات بهسازی ذکر شده مسیر شمالی به آن اضافه و مسیر جنوبی نیز بهسازی شد. همچنین به دلیل شدت بالای خرابی‌ها از کیلومتر ٦۰ تا انتهای این مسیر در حدود ٤ سال قبل بهسازی شد.

شکل ۱. وضعیت روسازی در جهت سمنان به دامغان (باند جنوبی)، کیلومتر ۱۲، سال ۱۳۸٤

در شکل ۲ تغییرات شاخص PCI در باند کندرو و در جهت سمنان- دامغان ارایه شده‌است. با توجه به شکل در این جهت از نظر شدت و مقدار خرابی‌ها می‌توان مسیر را به دو بخش تقسیم کرد. در قسمت اول از کیلومتر ۰ تا ٦۰ مقدار شاخص بسیار پایین بوده و به غیر از یک مورد، از ۵۰ کمتر

است. در قسمت دوم که شامل کیلومتر ٦٠ تا انتهای مسیر در این جهت است، مقدار شاخص اغلب بالاتر از ٥٠ بوده‌است. متوسط شاخص PCI برای این دو قسمت به ترتیب برابر با ٢٩,٥ و ٦٧ است. خرابی‌های موجود در قسمت دوم (کیلومتر ٦١ تا انتها) اغلب شامل خرابی‌هایی چون ترک‌های حرارتی، قیرزدگی و هوازدگی است که غیرسازه‌ای هستند. بنابراین در برنامه بهسازی اساسی، قسمت دوم باند جنوبی مسیر سمنان- دامغان حذف و مطالعات تنها در محدوده کیلومتر ٠ تا ٦٠ ادامه یافت.

وضعیت روسازی در باند شمالی ضعیف‌تر از باند جنوبی بوده و شاخص PCI به غیر از چند مورد در ابتدای این باند، کمتر از ٥٠ بوده‌است. مقدار متوسط شاخص برای باند جنوبی برابر با ٢٦,٦ بوده و کل این مسیر در برنامه بهسازی قرار گرفت.



شکل ٢. تغییرات PCI در جهت سمنان-دامغان (باند جنوبی)، سال ١٣٨٤

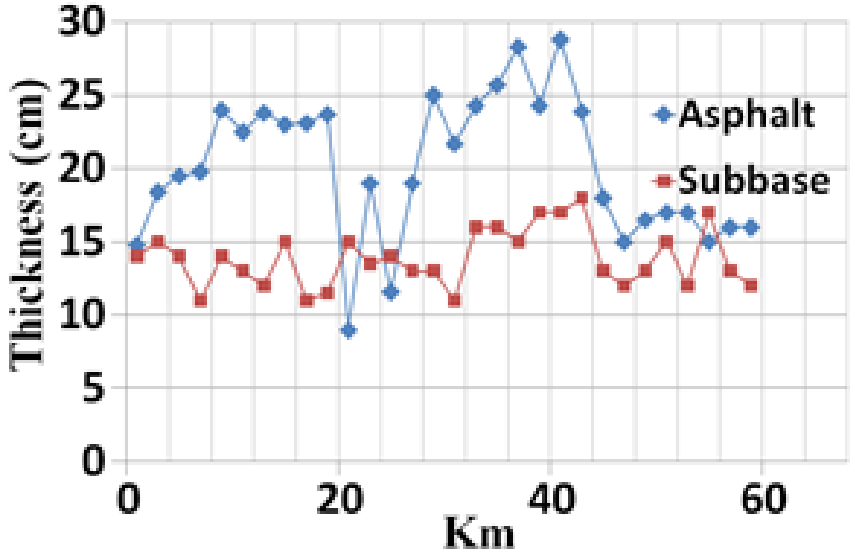
٤-٢ آزمایش‌های مخرب

پس از مغزه‌گیری از لایه‌های آسفالتی و خاکی روسازی و همچنین لایه‌های خاکریزی در فواصل ٢ کیلومتری، آزمایش‌های مختلفی جهت شناخت وضعیت این لایه‌ها انجام شد. همچنین ضخامت لایه‌های موجود نیز تعیین شد. با استفاده از این مغزه‌ها ضخامت و نوع لایه‌های آسفالتی موجود تعیین گردید. همچنین بررسی عمق ترک‌ها و کیفیت چسبندگی لایه‌های آسفالتی از جمله اطلاعات اولیه‌ای است که از این مغزه‌ها به دست آمد. در مرحله بعد با انتقال این مغزه‌ها به آزمایشگاه محلی و جداسازی قیر از سنگدانه مشخصات این مصالح از نظر مقدار قیر، درجه نفوذ آن، دانه‌بندی مصالح سنگی و درصد شکستگی آنالیز شد.

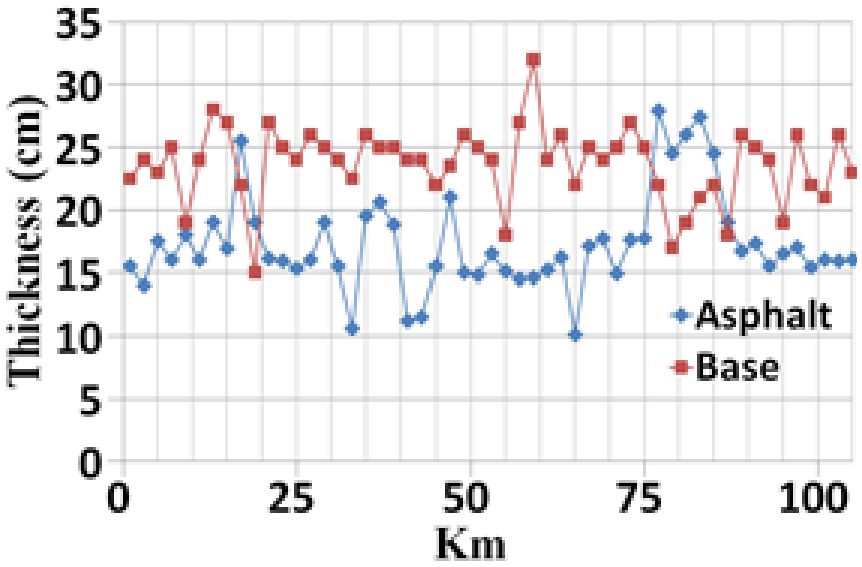
با توجه به بررسی‌های انجام شده، محور در مسیر جنوبی فاقد لایه اساس بوده و در مسیر شمالی نیز در بیشتر مناطق کیفیت این لایه براساس مشخصات آیین نامه روسازی در حد متوسط بوده‌است. در شکل ٣ تغییرات ضخامت لایه‌های روسازی در مسیر دامغان- سمنان (باند جنوبی) شامل لایه‌های آسفالتی و زیراساس مشاهده می‌شود. همچنین

شکل ٤ نشان‌دهنده تغییرات لایه‌های روسازی شامل آسفالت و اساس در مسیر مقابل است. با توجه به شکل ۳ تغییرات ضخامت لایه زیراساس در طول مسیر جنوبی اندک بوده و ضخامت متوسط این لایه برابر با ۱۳/۹ سانتیمتر بوده‌است.

اطلاعات زمان ساخت نشان می‌دهد که در این مسیر اغلب دو لایه آسفالت و یک لایه اساس قیری اجرا شده که ضخامت مجموع آنها بین ۱۵ تا ۲۰ سانتیمتر متغیر بوده‌است. لایه‌های آسفالتی اضافی مربوط به عملیات تعمیر و نگهداری موضعی بوده که در مناطق شدیداً تخریب شده اجرا شده‌اند.



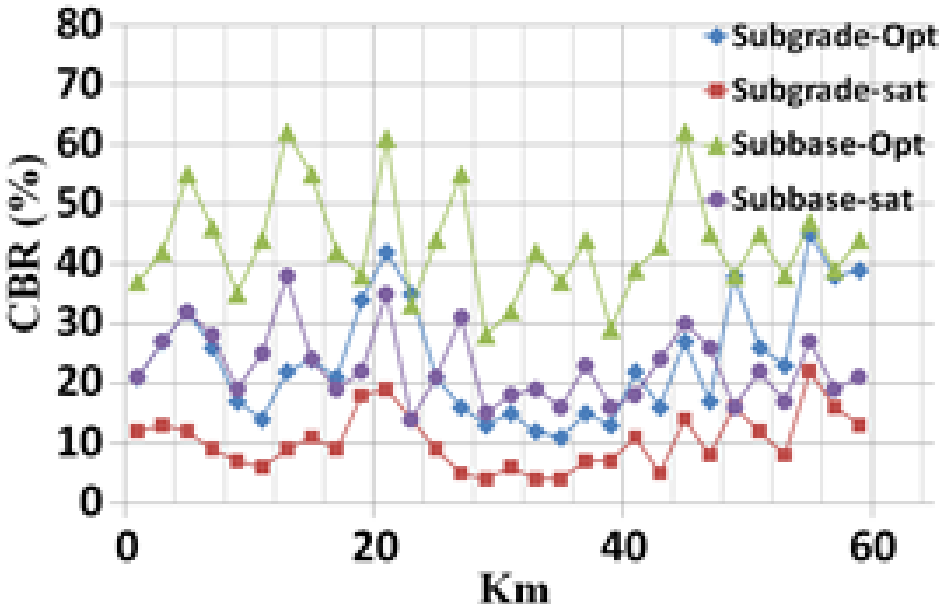
شکل ۳. تغییرات ضخامت لایه‌های روسازی در باند جنوبی، سال ۱۳۸٤



شکل ٤. تغییرات ضخامت لایه‌های روسازی در باند شمالی، سال ۱۳۸٤

با توجه به شکل ٤ ضخامت لایه اساس موجود در باند شمالی تغییرات زیادی نداشته و به طور متوسط برابر با ۲۳,۷ سانتیمتر است. ضخامت لایه‌های آسفالتی نیز اغلب بین ۱۵ تا ۱۷ سانتیمتر بوده و در برخی از مناطق به دلیل عملیات تعمیری افزایش یافته‌است.

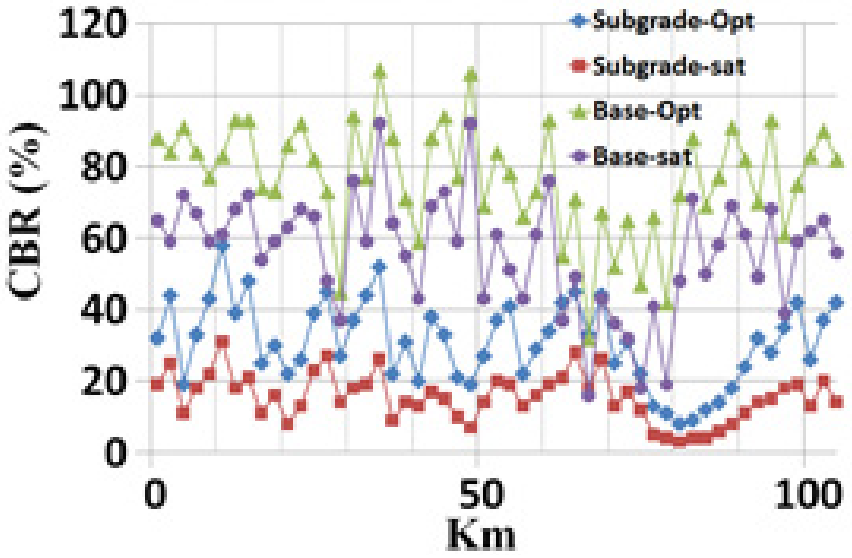
بر روی نمونه‌های برداشت شده از محل آزمایش‌های متعددی انجام شد. در شکل ۵ تغییرات CBR خشک و اشباع برای مصالح لایه‌های زیراساس و بستر در باند جنوبی و در درصد تراکم محلی مشاهده می‌شود. درصد تراکم محلی در نمونه‌های محلی برداشت شده از مصالح بستر بین ۸۹ تا ۹۷ درصد متغیر بوده و مقدار متوسط آن برابر با ۹٤ درصد بوده‌است. همچنین درصد تراکم مصالح زیراساس نیز بین ۹۳ تا ۱۰۰ درصد متغیر بوده و مقدار متوسط آن ۹۸ درصد بود.



شکل ۵. تغییرات نسبت باربری کالیفرنیا در باند جنوبی، سال ۱۳۸٤

با توجه به اینکه محور در منطقه‌ای با شرایط آب و هوایی گرم و خشک قرار گرفته‌است، نتایج مربوط به CBR خشک دارای اهمیت بیشتری است. اگرچه در اطلاعات هواشناسی به دست آمده برای منطقه در سه ماه از سال دمای زیر صفر به ثبت رسیده و تعداد روزهای بارانی نیز طبق گزارش هواشناسی در ۵۰ سال اخیر به طور متوسط برابر با ۲۱ روز بوده‌است. بنابراین احتمال به اشباع رسیدن مصالح بستر وجود داشته و نتایج CBR در حالت اشباع می‌تواند میزان حساسیت مصالح را در برابر رطوبت نیز نشان دهد. مطابق شکل CBR خشک مصالح زیراساس اغلب بزرگتر از ٤۰ درصد است. رده‌بندی مصالح زیراساس در بیشتر نمونه‌ها A-1-b و در تعدادی از نمونه‌ها A-1-a بوده‌است. رده‌بندی مصالح بستر نیز اغلب A-2-4 و A-2-5 و در محدوده کیلومترهای ۸ تا ۱٤ و ۲٤ تا ٤۰ در بعضی از نمونه‌ها A-6 بوده‌است.

در شکل ٦ نتایج CBR لایه‌های اساس و بستر در مسیر شمالی مشاهده می‌شود. مصالح اساس اغلب از نوع A-1 و بعضاً A-2 بوده‌اند. مصالح بستر نیز اغلب در رده A-2 قرار داشته و در محدوده کیلومترهای ۷٤ تا ۸٦ از نوع A-6 و A-7 بوده‌است.

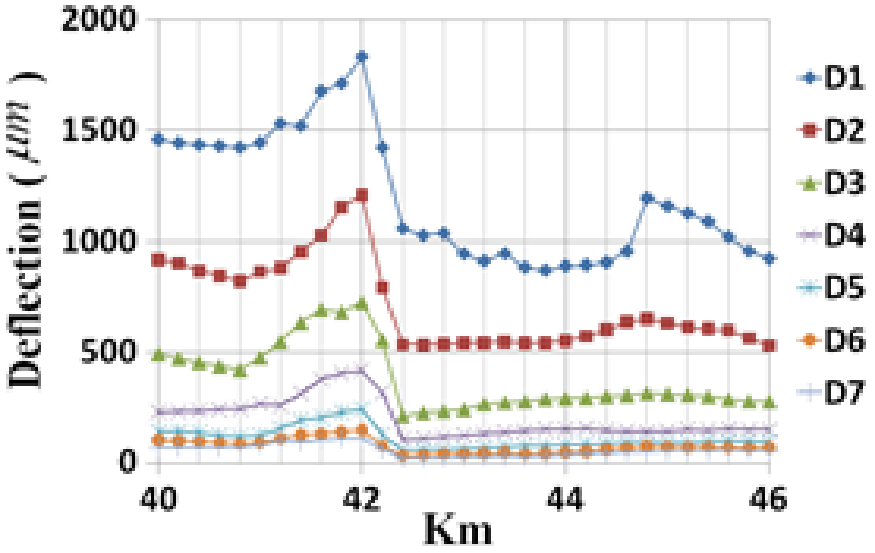


شکل ٦. تغییرات نسبت باربری کالیفرنیا در باند شمالی، سال ١٣٨٤

٤-٣ آزمایش‌های غیرمخرب

بررسی‌های غیرمخرب با استفاده از تجهیزات FWD مدل Dynatest 8002 و GPR مدل Mala انجام شد. فواصل انجام آزمایش‌ها (اعمال ضربه با FWD) ٢٠٠ متر بوده و برای کالیبره کردن نتایج به دست آمده، از دستگاه GPR از نتایج مغزه‌گیری‌ها استفاده شد.

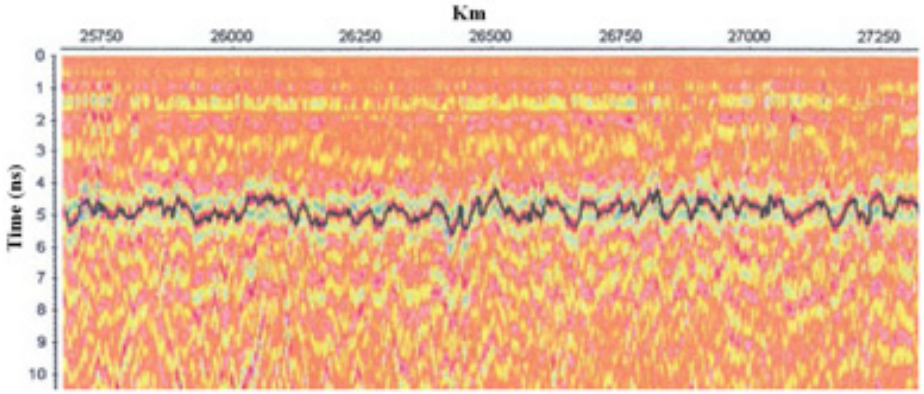
مقدار بار اعمالی در آزمایش FWD برابر با ١٢٠ کیلونیوتن و قطر صفحه اعمال بار برابر با ٣٠٠ میلیمتر بود. بار اعمالی به صورت یک بار نیم‌سینوسی با مدت زمان ٢٥ میلی ثانیه به صفحه وارد می‌شد. در اندازه‌گیری تغییرشکل‌ها، از ٧ ژئوفن استفاده شد که فواصل آنها از هم ٣٠ سانتیمتر بود. اولین ژئوفن در مرکز صفحه بارگذاری قرار داشته و فاصله آخرین ژئوفن از مرکز صفحه ١٨٠ سانتیمتر بود. برای آنالیز نتایج به دست آمده از آزمایش و انجام محاسبات معکوس از نرم‌افزار ELMOD استفاده شد. برای انجام تحلیل‌ها لازم است یک سیستم چند لایه‌ای انتخاب شده و اطلاعات مربوط به ضخامت لایه‌های روسازی و تغییرشکل‌ها در دست باشد. با توجه به بررسی‌های انجام شده در مسیر و نتایج آزمایش‌های مخرب یک سیستم سه لایه‌ای برای انجام این تحلیل انتخاب شد. این سیستم شامل آسفالت، اساس یا زیراساس (با توجه به باند مربوطه) و بستر بوده‌است. ضخامت لایه‌ها با استفاده از نتایج دستگاه GPR تعیین و به عنوان ورودی در نرم‌افزار مورد استفاده قرار گرفت. در شکل ٧ نمونه‌ای از نتایج به دست آمده از دستگاه FWD مشاهده می‌شود. با توجه به آنکه تغییرشکل‌های ثبت شده در دمای محل بوده‌است، جهت اصلاح این تغییرشکل‌ها و تبدیل آن به تغییرشکل در دمای استاندارد (٢٠ درجه سانتیگراد)، دمای انجام آزمایش‌ها نیز به عنوان یکی از ورودی‌ها به نرم‌افزار داده شد.



شکل ۷. نمونه‌ای از نشست‌های به دست آمده در ژئوفن‌های مختلف حدفاصل کیلومتر ٤٠ تا ٤٦، محور سمنان- دامغان، سال ١٣٨٤

در شکل ۸ نیمرخی از خروجی‌های دستگاه GPR مشاهده می‌شود. این خروجی شامل زمان طی شده توسط امواج تا لایه اول روسازی است. به منظور تعیین ضخامت لایه‌های مختلف باید سرعت متوسط حرکت امواج را انتخاب نمود. این کار با استفاده از نمونه‌گیری‌های مخرب در فواصل ۲ کیلومتری انجام شد. بنابراین خروجی‌های دستگاه GPR شامل یک نیم‌رخ پیوسته از ضخامت لایه‌ها بوده در حالی‌که در آزمایش‌های مخرب اطلاعات موجود تنها شامل ضخامت لایه‌ها در فواصل ۲ کیلومتری بود.

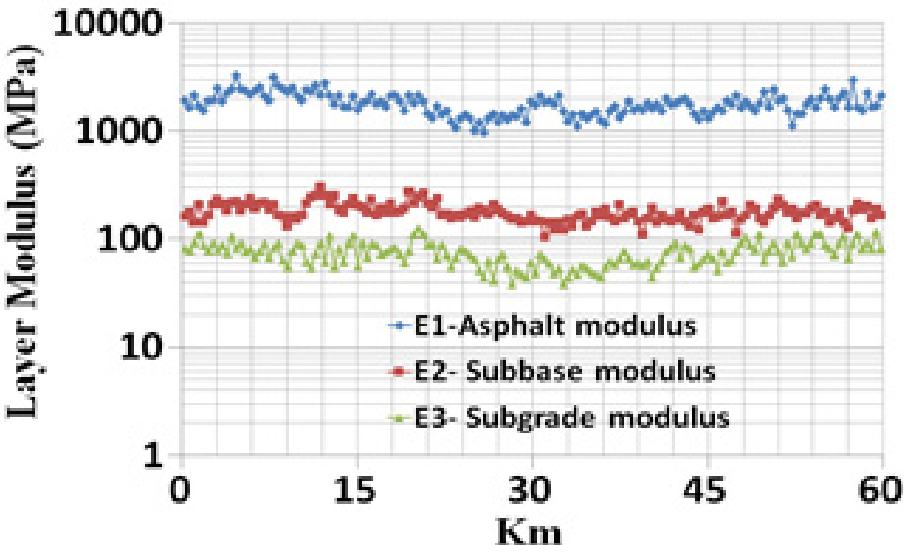
با توجه به اطلاعات مربوط به سیستم روسازی انتخابی شامل تعداد، ضخامت و ضریب پواسن مصالح هر کدام از لایه‌ها، تغییرشکل‌های به دست آمده در محل و دمای انجام آزمایش، محاسبات معکوس توسط نرم‌افزار انجام شده و مدول الاستیسیته لایه‌های مختلف در دمای ۲۰ درجه سانتیگراد به دست آمد.



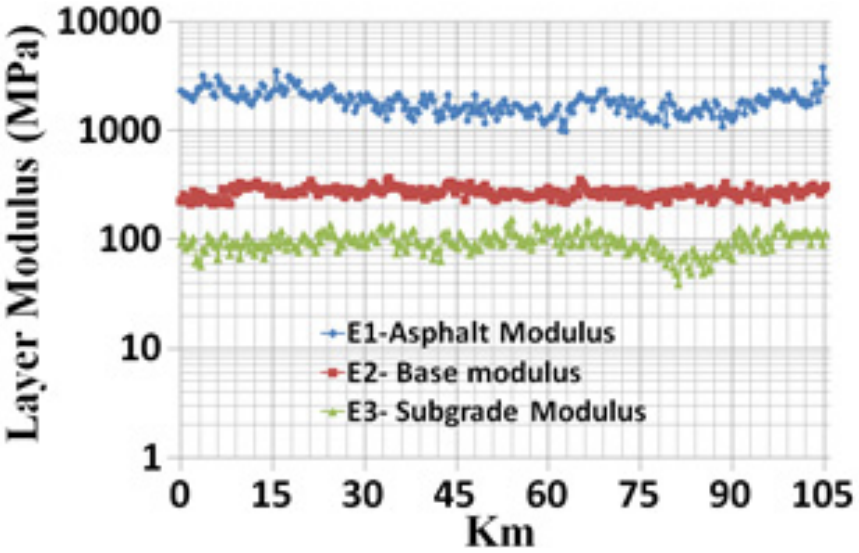
شکل ۸. نیم‌رخی از خروجی دستگاه GPR

نرم‌افزار ELMOD با استفاده از یک روش تقریبی براساس معادلات بوسینسک و اودمارک از روش ضخامت معادل برای برآورد مدول لایه بهره می‌برد [Dynatest International, 1998]. معادلات بوسینسک برای یک لایه همگن ارایه شده و قابل استفاده در یک سیستم چند لایه‌ای نیستند. بنابراین با توجه به آنکه طرح روسازی شامل یک سیستم چند لایه‌ای است، روش اودمارک برای آن مناسب‌تر است. اودمارک یک روش تقریبی جهت تبدیل یک سیستم چند لایه‌ای با مدول لایه‌های مختلف به یک سیستم معادل ارایه کرده است. در این سیستم معادل تک لایه‌ای، ضخامت لایه‌ها تغییر یافته ولی مدول تمام لایه‌ها یکسان خواهد بود. مثلاً برای تعیین مدول لایه اساس این‌گونه فرض می‌شود که تنها همین لایه بر روی بستر نیم‌بینهایت قرار دارد. بنابراین مدول لایه آن براساس معادلات بوسینسک قابل تخمین خواهد بود. به همین ترتیب مدول لایه آسفالت نیز با استفاده از مقدار نشست به دست آمده در مرکز صفحه بارگذاری قابل تخمین است. بعد از این تخمین اولیه مدول لایه بستر برای تطابق تغییرشکل‌های به دست آمده و محاسبه شده در ژئوفن‌های بیرونی تخمین زده می‌شود. در مرحله بعد مقدار تغییرشکل‌های به دست آمده از تئوری اودمارک با تغییرشکل‌های مشاهده شده در ژئوفن‌های داخلی تا مرکز صفحه بارگذاری برای اصلاح مدول لایه‌های آسفالت و اساس مقایسه شده و آنقدر مدول لایه‌ها تغییر می‌یابد تا کمترین مقدار خطا بین مشاهده و محاسبه حاصل شود.

شکل‌های ۹ و ۱۰ نتایج محاسبات معکوس را به ترتیب در مسیرهای جنوبی و شمالی نشان می‌دهند. با توجه به شکل ۹ مدول متوسط لایه‌های آسفالتی در باند جنوبی برابر با ۱۸۱۷ مگاپاسکال است. در مقایسه با آسفالت گرم تازه اجرا شده که مدول الاستیسیته آن در دمای ۲۰ درجه سانتیگراد حدود ۳۰۰۰ تا ۳۲۰۰ مگاپاسکال است، آسفالت موجود ضعیف بوده و بخش قابل توجهی از باربری خود را از دست داده است. در این باند آسفالت در حدفاصل کیلومترهای ۲۱ تا ۳۰ ، ۳۲ تا ۳۷ و ۴۱ تا ۴۷ دارای وضعیت بحرانی بوده و مدول آسفالت در این نواحی اغلب بین ۱۰۰۰ تا ۱۵۰۰ مگاپاسکال است.



شکل ۹. تغییرات مدول لایه‌ها در باند جنوبی براساس نتایج محاسبات معکوس، سال ۱۳۸۴

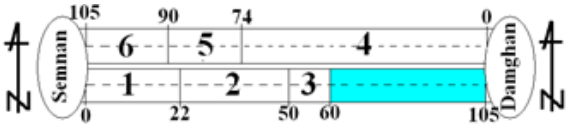


شکل ۱۰. تغییرات مدول لایه‌ها در باند شمالی براساس نتایج محاسبات معکوس، سال ۱۳۸٤

مدول الاستیسیته لایه زیراساس در این مسیر تغییرات کمتری داشته و مقدار متوسط آن برابر با ۱۸۰ مگاپاسکال است. اگرچه حدفاصل کیلومتر ۲۷ تا ۳٦ یک ناحیه نسبتاً ضعیف مشاهده شده که مدول متوسط آن برابر با ۱٤٥ مگاپاسکال است. در این مسیر مدول متوسط بستر برابر با ۷٥ مگاپاسکال به دست آمد. ضعیف‌ترین ناحیه در حدود کیلومتر ۲٦ تا ٤۱ با مدول متوسط ٥٥ مگاپاسکال قرار دارد. مطابق شکل ۱۰ در مسیر مقابل نیز مدول متوسط لایه آسفالتی، اساس و بستر به ترتیب برابر با ۱۸٤۸، ۲۷۰ و ۹٤ مگاپاسکال به دست آمد. اگرچه وضعیت لایه‌ها در این مسیر تا حدی بهتر از مسیر جنوبی است، ولی مطابق شکل یک ناحیه بسیار ضعیف حدفاصل کیلومتر ۷۸ تا ۸۸ مشاهده می‌شود.

٥. قطعات همگن

معمولاً در پروژه‌های بهسازی، یک قطعه همگن تعیین شده و برای هر قطعه با توجه به مشخصات آن یک طرح خاص پیشنهاد می‌شود. تفاوت طرح‌های پیشنهادی در قطعات مختلف می‌تواند جزئی یا کلی باشد. مثلاً ممکن است تفاوت طراحی دو قطعه، تنها در ضخامت روکش آسفالتی باشد. همچنین در برخی از موارد نیز ممکن است روش‌های بهسازی اتخاذ شده در قطعات طرح کاملاً با یکدیگر متفاوت باشد. معمولاً از معیارهایی چون نوع روسازی، تاریخچه ساخت، حجم ترافیک، شرایط خاک بستر، شرایط آب و هوایی و وضعیت خرابی‌های موجود در راه در تعیین قطعات همگن استفاده می‌شود. در این مطالعه با توجه به نتایج به دست آمده از بررسی‌های میدانی و آزمایش‌های انجام شده قطعات طرح همگن مطابق شکل ۱۱ تعیین شد. مطابق شکل هر کدام از باندها به سه قطعه همگن تقسیم شده (مجموعاً ٦ قطعه طرح) و طراحی متفاوتی برای هر کدام از آنها در نظر گرفته شد.



شکل ۱۱. قطعات همگن انتخاب شده جهت بهسازی مسیر

٦. روش‌های بهسازی

پس از بررسی و مقایسه فنی و اقتصادی بین گزینه‌های

مختلف بهسازی در هر قطعه طرح روش ارایه شده در جدول ۱ انتخاب شد. لازم به توضیح است که طرح بهسازی به روش‌های مستقیم (با استفاده از نتایج آزمایش‌های غیرمخرب) و غیرمستقیم (با استفاده از نتایج آزمایش‌های مخرب) انجام شد. در طراحی به روش غیرمستقیم از دستورالعمل آیین‌نامه روسازی (نشریه ۲۳٤) استفاده شد. طراحی برای عمر بهره‌برداری ۱۰ و ۱۵ سال که تعداد محور معادل ۸/۲ تنی در خط طراحی به ترتیب برابر با ۱٤/٤ و ۲٦/۱ میلیون محور بود انجام شد. ضریب اطمینان طراحی برابر با ۹۰ درصد و کاهش نشانه خدمت‌دهی برابر با ۱/۷ در نظر گرفته شد. در طراحی مدول الاستیسیته لایه آسفالتی تازه اجرا شده و لایه بازیافتی براساس نتایج آزمایشگاهی به ترتیب برابر با ۳۲۰۰ و ۲۵۰۰ مگاپاسکال در نظر گرفته شد. همچنین در طراحی به روش مستقیم پس از انجام محاسبات معکوس با استفاده از نرم‌افزار و به دست آوردن مدول لایه‌های موجود از روش آیین‌نامه روسازی در محاسبه عدد ضخامت موثر و ضخامت روکش مورد نیاز استفاده شد.

جدول۱. روش‌های بهسازی پیشنهادی براساس نتایج طراحی به روش‌های مستقیم و غیرمستقیم

قطعه طرح	Km	روش پیشنهادی	ضخامت روکش آسفالتی (cm)			
			طرح ۱۰ ساله	طرح ۱۵ ساله	ضخامت انتخابی	عمر طرح برای ضخامت اجرایی
۱	۰-۲۲	بازیافت سرد به ضخامت ۱۷ سانتیمتر	۱۰	۱۲	۱۲	۱۵ سال
۲	۲۲-۵۰	بازیافت سرد به ضخامت ۱۷ سانتیمتر	۱۲	۱۵	۱۲	۱۰ سال
۳	۵۰-٦۰	تراش ۸ سانتیمتر از آسفالت موجود	۱٦	۱۹	۱۷	۱۱ سال
٤	۰-۳٦	تراش ۸ سانتیمتر از آسفالت موجود	۱۵	۱۸	۱۷	۱۳ سال
	۳٦-۷٤	بازیافت سرد به ضخامت ۱۷ سانتیمتر	۱۰	۱۲	۱۲	۱۵ سال
۵	۷٤-۹۰	بازیافت سرد به ضخامت ۱۷ سانتیمتر	۱۲	۱٦	۱۲	۱۰ سال
٦	۹۰-۱۰۵	تراش ۸ سانتیمتر از آسفالت موجود	۱٤	۱۷	۱۷	۱۵ سال

در جدول ۱، ضخامت‌های محاسباتی برای عمر بهره‌برداری ۱۰ و ۱۵ سال و همچنین ضخامت‌های انتخاب شده در اجرا ارایه شده‌است. پس از ارایه نتایج به دست آمده از محاسبات و براساس پیشنهاد کارفرما مقرر گردید که با توجه به ملاحظات اجرایی و اقتصادی ضخامت روکش اجرایی برای هر کدام از روش‌های بهسازی به صورت یکسان انتخاب گردد. بنابراین با توجه به جدول ۱ ضخامت اجرایی انتخابی در روش‌های بازیافت سرد و روکش سنتی به ترتیب برابر با ۱۲ و ۱۷ سانتیمتر انتخاب شده و عمر طراحی معادل آنها نیز از نمودار تغییرات ترافیک در سال‌های مختلف استخراج و در ستون آخر جدول ۱ ارایه شد.

۷. عملیات بازیافت درجا

با توجه به متغیر بودن ضخامت آسفالت موجود، قبل از شروع عملیات بازیافت بخشی از این لایه‌ها جهت رسیدن به ضخامت موردنظر توسط دستگاه آسفالت تراش، تراشیدهرشده و پس از آن اقدام به بازیافت آسفالت باقیمانده گردید. در مناطقی که ضخامت آسفالت موجود کمتر از ۱۷ سانتیمتر بود، مصالح تراشه‌آسفالتی (RAP) با بخشی از لایه خاکی زیرین مخلوط شده و سپس پخش و متراکم گردید. مقدار سیمان به طور ثابت برابر با ۲ درصد بوده و به منظور کاهش زمان شکست قیرامولسیون و زمان عمل‌آوری، لایه بازیافتی به آن افزوده شد. نوع قیرامولسیونی مورد استفاده

نیز کاتیونی دیرشکن (CSS-1h) بود که جهت استفاده در عملیات بازیافت مناسب بوده و زمان کافی جهت اختلاط با مصالح RAP را فراهم می‌کرد. درصد قیرامولسیون تابع عواملی مانند مقدار قیر موجود در مصالح RAP، درجه نفوذ یا سختی قیرموجود، دانه‌بندی مصالح و نسبت استفاده از لایه خاکی زیرین است[ARRA 2001, Kai et al. 2009] . مقدار قیرامولسیون با توجه به طرح اختلاط آزمایشگاهی به روش مارشال اصلاح شده بر مبنای دستیابی به حداکثر وزن‌مخصوص و استقامت مارشال و فضای خالی ۹ تا ١٤ درصد بین ۳/۵ تا ٤/۵ درصد در مناطق مختلف متفاوت بود. نمونه‌ای از نتایج به دست آمده از طرح اختلاط در جدول ۲ ارایه شده‌است.

برای اجرای عملیات از یک دستگاه بازیافت تک‌بخشی مطابق شکل ۱۲ استفاده شد. در اولین مرحله با توجه به نمودار تغییرات ضخامت لایه آسفالتی، بخشی از لایه آسفالتی توسط دستگاه آسفالت‌تراش برداشته شده و آسفالت باقیمانده به صورت درجا، خرد و در صورت نیاز با بخشی از مصالح لایه زیرین مخلوط شد. سپس با استفاده از گریدر و غلتک ویبره مخلوط آماده شده پخش، تسطیح و به طور نسبی متراکم شده و آماده بازیافت گردید. شکل ۱۳، سطح آماده شده مسیر قبل از شروع عملیات بازیافت را نشان می‌دهد.

جدول ۲. نمونه‌ای از نتایج به دست آمده از طرح اختلاط

رطوبت (٪)	قیرامولسیون (٪)	وزن مخصوص بالک	وزن مخصوص حداکثر	فضای خالی (٪)	استقامت مارشال (kg)
۳,۰	۲,۵	۲,۱۱۱	۲,٤٦٤	١٤,۳۳	۳۱۱
۳,۰	۳,۰	۲,۱۳۷	۲,٤٤۲	۱۲,٤۹	٤۲۱
۳,۰	۳,۵	۲,۱٦۲	۲,٤۲٤	۱۰,۸۱	٤٦۱
۳,۰	٤,۰	۲,۱۵٦	۲,٤۰۱	۱۰,۲۰	۵۰۵
۳,۰	٤,۵	۲,۱۵۸	۲,۳۹۷	۹,۹۷	۵۱۳

شکل ۱۲. دستگاه تک‌بخشی بازیافت سرد درجا

شکل ۱۳. سطح آماده شده برای اجرای عملیات بازیافت

قیر امولسیون توسط تانکری که در جلوی دستگاه بازیافت قرار داشت به محفظه اختلاط دستگاه تزریق می‌شد. نازل‌های خروجی قیر در فاصله ۲۵ سانتیمتری از هم داشته و با توجه به الگوی قرارگیری امکان تزریق قیرامولسیون در عرض‌های کمتر از ۱/۷۵ متر را نیز فراهم می‌کردند.

افزودنی‌های پودری در سیستم بازیافت تک‌بخشی بعد از تسطیح سطح و قبل از حرکت دستگاه بازیافت بر روی لایه موردنظر پخش می‌شوند. شکل ١٤ نحوه اعمال سیمان را بر روی سطح تسطیح شده نشان می‌دهد.

شکل ١٤. اضافه نمودن سیمان قبل از بازیافت لایه

دستگاه پخش سیمان دارای یک سیستم کنترلی است که تمامی فرمان‌ها از طریق آن به سیستم‌های مکانیکی دستگاه انتقال داده می‌شود. عرض دستگاه حدود ۲/۵ متر و دارای سه دریچه مجزاست که توسط گیربکس‌ها باز و بسته می‌شوند. بعد از مشخص شدن مقدار سیمان، میزان آن برحسب کیلوگرم بر مترمربع به دستگاه داده شده و این سیستم هماهنگی بین گیربکس دریچه‌ها وگیربکس ماشین را برقرار می‌کند. بنابراین با تغییرات سرعت حرکت ماشین میزان پخش سیمان نیز تغییر یافته و در نهایت مقدار سیمان در واحد سطح ثابت نگه داشته می‌شود.

پس از این مرحله عملیات تزریق قیرامولسیون و اختلاط با استفاده از دستگاه بازیافت‌سرد آغاز شد. نرخ تزریق امولسیون از نازل‌ها با توجه به سرعت حرکت دستگاه تعیین شد. در این پروژه براساس تجربیات به دست آمده از قطعه آزمایشی سرعت حرکت دستگاه ۷ کیلومتر بر ساعت انتخاب شد. برای دو خط مجاور هم، یک همپوشانی ۳۰ سانتیمتری در نظر گرفته شد. در مناطق همپوشانی برای جلوگیری از پخش مضاعف جریان قیرامولسیون از نازلی که در خط مجاور حرکت می‌کند از اتاق کنترل قطع می‌شد.

عملیات تراکم بلافاصله پس از اختلاط و پخش لایه بازیافت شده آغاز شد. تراکم اولیه با استفاده از غلتک فلزی لرزنده انجام شد. این غلتک‌ها مجهز به تجهیزات بارگذاری بوده و میزان باربری لایه را حین تراکم اندازه‌گیری می‌کردند. تراکم ثانویه با استفاده از غلتک چرخ لاستیکی انجام شد. در واقع تراکم نهایی لایه با استفاده از این غلتک به دست می‌آید. در صورت نیاز به منظور اتوی سطح نهایی، در برخی از مناطق از غلتک چرخ فلزی استفاده می‌شد. در شکل ۱۵ سطح نهایی لایه بازیافت‌شده مشاهده می‌شود.

شکل ۱۵. سطح نهایی لایه بازیافت شده، سال ۱۳۸۵

پس از اتمام عملیات سطح لایه با استفاده از قیرامولسیون به میزان متوسط ۵۰۰ گرم بر مترمربع اندود شده و تا سه روز نگهداری شد. پس از این مدت لایه بیندر اول اجرا شد. پس از گذشت یک هفته از اجرای لایه بازیافتی و پخش لایه دوم روکش آسفالتی مسیر جهت عبور ترافیک بازگشایی شد.

۸. بررسی عملکرد

پس از اتمام عملیات بهسازی در تمامی قطعات از اواسط سال ۱۳۸۵ عملکرد روسازی مورد بازرسی دوره‌ای قرار گرفت. در این بررسی‌ها وضعیت سطح روسازی از نظر نوع، مقدار و شدت خرابی‌ها مورد بررسی قرار گرفته و در بعضی از قطعات شاخص وضعیت روسازی توسط گروهی از کارشناسان مهندسین مشاور اندازه‌گیری شد. برنامه بازدیدها

به صورت دوره‌های ٦ ماهه تعیین شد که در برخی از مناطق به دلیل وقوع خرابی‌های زودرس فواصل بررسی‌ها به ۲ الی ۳ ماه کاهش یافت. براساس این بررسی‌ها وضعیت روسازی در قطعات ۱، ۳، ٤ و ٦ بسیار مناسب بوده و هیچ‌گونه خرابی سازه‌ای در آنها مشاهده نشد. به عنوان نمونه شکل ١٦ وضعیت سطحی روسازی را در بخشی از قطعه شماره ٤ که در سال ۱۳۹۰ برداشت شده‌است نشان می‌دهد. مطابق جدول ۱، روسازی در این محدوده به روش بازیافت سرد بهسازی شد. به طور مشابه در سایر قطعات فوق‌الذکر هر دو روش بهسازی سنتی و بازیافت نتایج موفقیت‌آمیزی داشته‌اند.

شکل ١٦. وضعیت روسازی در بخشی از قطعه ٤، سال ۱۳۹۰

در قطعات ۲ و ۵، در بررسی‌های اولیه انجام شده در حدود شش ماه تا یک سال پس از اتمام عملیات مناطق بسیار محدودی با ترک‌های خستگی مشاهده شد. در قطعه ۲ این خرابی‌ها به صورت پراکنده در فاصله کیلومتر ۲۹ تا ۳۵ و در قطعه ۵ نیز به صورت پراکنده و موضعی در فاصله کیلومتر ۷۵ تا ۸۳ مشاهده شد. نمونه‌ای از این خرابی‌ها در شکل ۱۷ مشاهده می‌شود. در اغلب موارد این ترک‌ها با نشست‌های موضعی همراه بوده و آثار وجود ریزدانه در اطراف ترک به‌خصوص بعد از روزهای بارانی مشاهده گردید.

شکل ۱۷. نمونه‌ای از خرابی‌ها در حدود ٦ ماه پس از بهسازی شامل ترک‌های خستگی و نشست موضعی به همراه آثار ریزدانه در اطراف ترک، قطعه ۲، کیلومتر ۲۹+۷۰۰، سال ۱۳۸٦

به منظور تشخیص علل و منشاء وقوع این خرابی‌ها در اواسط خردادماه سال ۱۳۸٦ در چند نقطه اقدام به حفر گمانه نموده و وضعیت لایه‌های روکش آسفالتی، لایه بازیافت شده و لایه‌های خاکی زیرین مورد بررسی قرار گرفت. در این بررسی علاوه بر کنترل ضخامت لایه‌ها، کیفیت مصالح و درصد تراکم لایه‌ها با حدود استاندارد مقایسه و کنترل گردید.

در شکل ۱۸ وضعیت گمانه حفر شده در یکی از مناطق وقوع خرابی‌ها مشاهده می‌شود. همچنین در جدول ۳، نتایج آزمایش‌های انجام شده بر روی مصالح به دست آمده از گمانه‌ها ارایه شده‌است. با توجه به بررسی‌های انجام شده بر روی این گمانه‌ها اختلاف ضخامت لایه روکش آسفالتی اجرا شده و ضخامت طراحی بسیار کم بوده و در محدوده رواداری مجاز قرار دارد. همچنین نتایج آزمایش‌های صورت پذیرفته، حاکی از تطابق کامل مشخصات این لایه‌ها و مشخصات موردنظر در طرح بوده‌است.

شکل ۱۸. گمانه حفر شده در قطعه ۲، کیلومتر ۳۲+۲۰۰ (A: سطح آسفالت رویه، B: سطح لایه بازیافتی، C: سطح بستر)، سال ۱۳۸٦

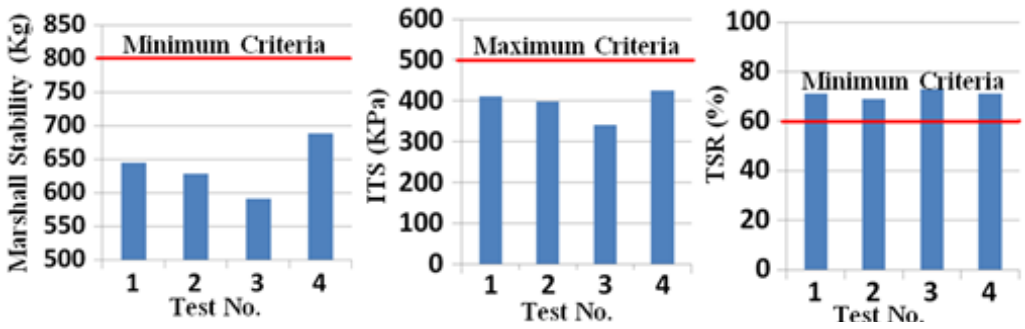
مطابق جدول ۳ در تمامی گمانه‌های استخراج شده ضخامت لایه بازیافتی مناسب بوده و میزان تغییرات نسبت به ضخامت طراحی (۱۷ سانتیمتر) در محدوده مجاز قرار دارد. مطابق این جدول درصد تراکم لایه بازیافتی بین ۹۳ تا ۹٤ درصد متغیر بوده که اندکی کمتر از حد تعیین شده در مشخصات (حداقل ۹۵ درصد نسبت به وزن‌مخصوص حقیقی به روش ASTM D 2726) بوده‌است. به طور کلی به دلیل وجود رطوبت در لایه بازیافتی و سختی اولیه‌ای که وجود سیمان در آن ایجاد می‌کند، تراکم‌پذیری این لایه نسبت به لایه‌های آسفالتی گرم کمتر است. همچنین با توجه به اینکه مصالح لایه‌های زیرین شامل زیراساس یا اساس و بستر دارای کیفیت و تراکم مناسب نیستند، دستیابی به تراکم بالاتر بسیار دشوار است.

جدول ۳. آزمایش‌های کنترلی انجام شده بر روی مصالح به دست آمده از گمانه‌ها

شماره گمانه	قطعه، کیلومتر	نوع لایه	ویژگی مورد آزمایش								
			ضخامت (cm)	دانه‌بندی (mm)	انطباق دانه‌بندی با مشخصات	درصد قیر	*درصد تراکم	استقامت مارشال (Kg)	ITS (KPa)	TSR (٪)	CBR اشباع در تراکم محلی (٪)
۱	قطعه ۲، ۳۲+۲۰۰	رویه	٤,۹	۰–۱۹	√	٥,٦	۹۸	۱۰۹٤	۸۱٤	۸۷	–
		بیندر	۷,۲	۰–۲۵	√	٤,۸	۹۷	۱۰٤۳	۷۷٦	۸۳	–
		بازیافت	۱٦,۸	۰–۳۸	√	٤,۲	۹٤	٦٤٥	٤۱۱	۷۱	–
		زیراساس	۱۳,۷	۰–٥۰	×	–	۹٥	–	–	–	۱٦
		بستر	–	۰–٥۰	–	–	۸۷	–	–	–	٤
۲	قطعه ۲، ۳٤+۳٥۰	رویه	٥,۱	۰–۱۹	√	٥,٤	۹۸	۱۱۲٦	۸۳۲	۸٥	–
		بیندر	۷,۱	۰–۲۵	√	٤,٦	۹۷	۱۰٥٦	۷٤۲	۸۱	–
		بازیافت	۱۷,٥	۰–۳۸	√	٤,۳	۹۳	٦۲۸	۳۹۸	٦۹	–
		زیراساس	۱٤,۳	۰–٥۰	×	–	۹٦	–	–	–	۱٤
		بستر	–	۰–٥۰	–	–	۸٦	–	–	–	۳
۳	قطعه ٥، ۷٥+۸۰۰	رویه	٥,۲	۰–۱۹	√	٥,۳	۹۷	۱۱۲۷	۸۳۲	۸٦	–
		بیندر	۷,۳	۰–۲۵	√	٤,٦	۹۸	۱۰٤٥	۷٤۳	۸۱	–
		بازیافت	۱٦,٥	۰–۳۸	√	٥,۱	۹۳	٥۹۱	۳٤۱	۷۳	–
		اساس	۱۲,٥	۰–۳۸	×	–	۹٦	–	–	–	٤۲
		بستر	–	۰–۳۸	–	–	۸۸	–	–	–	٦
٤	قطعه ٥، ۷۸+۳۰۰	رویه	٤,۸	۰–۱۹	√	٥,٤	۹۷	۱۰۸۲	۸۱٦	۸۲	–
		بیندر	۷,۳	۰–۲۵	√	٤,۷	۹۷	۱۰۳۹	۷٤۷	۸٥	–
		بازیافت	۱۷,٦	۰–۲۵	√	٤,٤	۹٤	٦۸۸	٤۲٥	۷۱	–
		اساس	۱۱,۸	۰–۳۸	×	–	۹٦	–	–	–	۳۸
		بستر	–	۰–۳۸	–	–	۸۸	–	–	–	٥

*درصد تراکم برای لایه‌های آسفالتی و بازیافت نسبت به وزن‌مخصوص حقیقی اندازه‌گیری شده‌است

با توجه به شکل 18-B علی‌رغم انسجام مناسبی که در لایه بازیافتی مشاهده می‌شود، سطح لایه تا حدی ناهموار است. این مساله برای لایه بازیافت‌شده مورد قبول بوده و براساس تحقیقات و گزارشات مختلفی که در این زمینه ارایه شده، سطح این لایه معمولاً ناهموارتر از سطح لایه بتن آسفالتی است[Iowa Highway Research Board, 2007, Suleiman, 2002] . در بررسی‌های دقیق صورت پذیرفته بر روی سطح این لایه ترک‌های بسیار ریزی مشاهده شد. این ترک‌ها انقباضی بوده و وقوع آنها نیز با شدت مشاهده شده قابل پیش‌بینی است. به هر حال این ترک‌ها پیوستگی و انسجام لایه را از بین برده و منافذی برای ورود آب به لایه‌های زیرین خواهند بود. در بررسی‌های انجام شده پس از مغزه‌گیری از لایه بازیافتی آزمایش‌های استقامت مارشال و کشش غیرمستقیم انجام شده و نسبت TSR محاسبه شد. در شکل ۱۹، مقادیر به دست آمده از آزمایش‌ها با معیارهای ارایه شده در آیین‌نامه کنترل شده‌است. براساس نتایج به دست آمده، اگرچه نسبت TSR بالاتر از حد تعیین شده در مشخصات (حداقل ٦٠ درصد) است، اما مقاومت کششی غیرمستقیم و به خصوص استقامت مارشال نمونه‌ها تا حدی کمتر از مقادیر تعیین شده بوده‌است. بنابراین، با توجه به مقادیر به دست آمده مدول این لایه پس از گذشت حدود یک سال از زمان عمل‌آوری در این گمانه‌ها در حدود ۱۸۵۰ تا ۲۲۰۰ مگاپاسکال تخمین زده می‌شود که کمتر از مقدار در نظر گرفته شده در طراحی (۲۵۰۰ مگاپاسکال) است.



شکل ۱۹. مقایسه نتایج به دست آمده از نمونه‌های کنترلی گمانه‌ها با معیارهای آیین‌نامه

معضل اصلی مشاهده شده در گمانه‌ها مربوط به لایه‌های خاکی روسازی و بستر بوده‌است. مطابق جدول ۳، در تمامی گمانه‌ها مشخصات به دست آمده از جمله دانه‌بندی، درصد تراکم و باربری پایین‌تر از حد مطلوب بوده‌است. شکل 18-C نشان می‌دهد که بخش قابل توجهی از مصالح لایه زیراساس را خاک ریزدانه تشکیل داده‌است. با توجه به آزمایش‌های دانه‌بندی و حدود اتربرگ رده خاک در گمانه A-2-6 بوده‌است. همچنین مصالح موجود در بستر نیز رسی بوده و در رده خاک A-6 قرار گرفت.

با توجه به بررسی‌های انجام شده منشاء وقوع نشست‌های موضعی در سطح آسفالت، تراکم ناکافی و باربری کم لایه‌های خاکی روسازی و بخصوص بستر تشخیص داده شد. بررسی شیت‌های آزمایشگاهی کنترلی در زمان تراکم لایه بازیافتی نشان داد که در اکثر موارد درصد تراکم به دست آمده ۹۵ درصد و بیشتر بوده و در ۱۸ شیت از مجموع ۱۵۳ شیت آزمایشگاهی، تراکم حداکثر تا ۲ درصد کمتر از حد مشخصات (یعنی حداقل ۹۳ درصد) بوده‌است.

با توجه به بررسی‌های انجام شده، اصلاح عمقی مناطق تخریب‌شده مدنظر قرار گرفت. پس از بررسی‌های دقیق، طول کل این مناطق در هر دو مسیر شمالی و جنوبی محاسبه

شد که برابر با ۳۵۰۰ متر بوده و تماماً در مسیرکندرو قرار داشت. عملیات بهسازی مجدد در سال ۱۳۸۷ انجام شد. در این عملیات پس از برداشت کل لایه‌های آسفالتی و بازیافت‌شده، ۱۵ سانتیمتر از لایه خاکی زیرین نیز برداشت شد. پس از تراکم سطح بستر تا حصول تراکم ۱۰۰٪ دو لایه مصالح سنگی به مرغوبیت مصالح اساس به ضخامت مجموع ۲۶ سانتیمتر اجرا شده و به طور متوسط ۱۸ سانتیمتر آسفالت بر روی آن اجرا شد.

از سال ۱۳۸۷ تمامی مناطق بهسازی شده با استفاده از روش روکش سنتی و بازیافت و بهسازی مجدد به مدت ٤ سال مورد بازرسی‌های دوره‌های قرار گرفت. با توجه به این بررسی‌ها به غیر از ترک‌های عرضی حرارتی و خرابی‌های غیر سازه‌ای بسیار محدود هیچ‌گونه خرابی در مسیر مشاهده نشد.

۱۰. نتیجه‌گیری و پیشنهادات

با توجه به نتایج و تجربیات به دست آمده از تحقیقات میدانی، پیشنهادات زیر جهت انتخاب پروژه ارایه می‌شود:

۱- تراکم‌پذیری لایه بازیافت‌شده با قیرامولسیون به دلیل وجود رطوبت و نوع دانه‌بندی معمولاً کمتر از مخلوط بتن آسفالتی است. در این پروژه به دلیل استفاده از سیمان و سخت‌شدگی اولیه ناشی از آن حصول تراکم نهایی با سختی بیشتری همراه بوده‌است. تراکم لایه‌های خاکریزی در این پروژه اغلب کمتر از ۹۵ درصد بوده‌است. در مواردی که درصد تراکم این لایه‌ها کمتر از ۹۰ درصد بود، تراکم لایه بازیافت‌شده و مقاومت نهایی بین ۱۰ تا ۲۰ درصد کمتر از مشخصات طرح به دست آمد.

۲- در دستورالعمل‌های فعلی اجرای عملیات بازیافت سرد بر روی بسترهایی با CBR کمتر از ۳ درصد منع شده‌است. در این پروژه در مواردی که مقدار CBR اشباع مصالح بستر در درصد تراکم محلی (یعنی در بحرانی‌ترین وضعیت) به طور متوسط کمتر از ۵ درصد بوده‌است، اجرای عملیات بازیافت با موفقیت همراه نبوده‌است. مقدار متوسط CBR مصالح بستر در این مناطق در تراکم ۱۰۰ درصد و با درصد رطوبت بهینه برابر با ۱۳ درصد بوده‌است.

۳- مدول الاستیسیته لایه‌های روسازی و بستر با استفاده از داده‌های غیرمخرب و با محاسبات معکوس تخمین زده شد. باند جنوبی فاقد لایه اساس بوده و متوسط ضخامت لایه زیراساس برابر با ۱۳,۹ سانتیمتر بود. در مناطقی که مدول لایه‌های زیراساس و بستر در این باند به طور متوسط به ترتیب کمتر از ۱٤۵ و ۵۵ مگاپاسکال به دست آمد، عملیات بازیافت موفقیت‌آمیز نبوده‌است. همچنین باند مقابل فاقد لایه زیراساس بوده و متوسط ضخامت اساس برابر با ۲۳/۷ سانتیمتر بود. در این باند حداقل مقدار مدول لایه‌های اساس و بستر جهت عدم شکست عملیات بازیافت به ترتیب برابر با ۲۵۵ و ٦۰ مگاپاسکال به دست آمد. لازم به توضیح است که حدود تعیین شده کاملاً وابسته به ضخامت لایه‌های زیراساس و اساس، ضخامت آسفالت قدیمی، لایه بازیافت‌شده و روکش آسفالتی جدید است. به هر حال در مناطقی که مدول تخمین زده شده برای مصالح بستر، زیراساس و اساس کمتر از موارد فوق باشد بررسی کیفیت و تراکم این لایه‌ها جهت تصمیم‌گیری برای اجرای عملیات بازیافت ضروری است.

٤- با توجه به زمان‌بر بودن فرآیند شکست کامل قیرامولسیون و پیشرفت واکنش هیدراتاسیون سیمان کنترل مشخصات نهایی لایه بازیافت‌شده از نظر خصوصیات مقاومتی و باربری و کنترل مجدد طراحی در مدت زمان ٦ تا ۱۲ ماه پس از اتمام عملیات بازیافت توصیه می‌شود.

۹. سپاسگزاری

نویسندگان از زحمات کارشناسان و کارکنان سازمان راهداری و حمل و نقل جاده‌ای، اداره کل نگهداری راه و ابنیه، آزمایشگاه فنی و مکانیک استان سمنان و آزمایشگاه مرکزی وزارت راه و شهرسازی تشکر و قدردانی می‌کنند.

۱۱. مراجع

-ARRA, 2001. Basic Asphalt Recycling Manual. Publication No. NHI01-022, Asphalt recycling and reclaiming association (ARRA), Annapolis, MD.

- Batista, F.A., 2004. Asphalt Cold Mixtures for Pavement Rehabilitation Overlays and Recycling. Laboratorio nacional de engenharia civil, Lisbon, Portugal.

- Dynatest International, 2008. "ELMOD Quick Start Manual".

- Epps, J.A., 1990. Cold- Recycled Bituminous Concrete Using Bituminous Materials. National cooperative highway research synthesis of highway practice 160, University of Nevada-Reno, Nevada, USA.

- Fiser, J., and Varaus, M., 2004. Cold Recycling of Pavements in the Czech Republic. Brno University of Technology, Department of Roads, Czech Republic.

- Forsberg, A., Lukanen, E., and Thomas, T., 2001. Blue Earth County CSAH20- An Engineered Cold In-Place Recycling Project. TRB2002 annual meeting, Washington D.C., USA.

- Hamad I. Al-Abdul W. Mirza G.B. Isam A.M. Hisham M.K. 2012. Study of road bases construction in Saudi Arabia using foam asphalt. construction and building materials, 26 (1):pp113-121

- Issa, R., Zaman, M., Miller, A., 2001. Characteristics of Cold Processed Asphalt Millings and Cement –Emulsion Composite. 80th Annual meeting of TRB, Washington D.C., USA.

- Julian, M.B., Zhanping, Y., 2010. The Mechanical Properties of Asphalt Mixtures with Recycled Concrete Aggregates. construction and building materials, March; 24(3): pp230-35.

- Kai S. Yoshitaka H. Ryota M. 2009. Study on recycled asphalt concrete for use in surface course in airport pavement. resources, conservation and recycling, 54 (1): pp 37-44.

- Kandhal, P., and Malick, R., 1997. Pavement Recycling Guidelines for State and Local Governments. Participant's reference book, National center for asphalt technology (NCAT), Report No. FHWA-SA-98-042, Federal Highway Administration, Washington, D.C., USA.

- Miller, J., and Guthrie, S., and Crane, A., 2006. Evaluation of Cement-Stabilized Full-Depth- Recycled Base Material for Frost and Early Traffic Conditions. Department of Civil and Environmental Engineering, University of Massachusetts, Dartmouth and Department of Civil and Environmental Engineering, Brigham, Young University, USA.

- Miro, R., and Martinez, A., and Cancela, A., 2004. Case Study of In-Place Recycled Asphalt Pavement of the N-536 Highway in Spain. TRB2004 annual meeting, Washington DC, USA.

- Moreira, p., and Simoes, R., 2004. Recycling of Bituminous Pavements with Portland Cement Portugal's Experiences and Advances. Mota-engil, engenharia, Porto, Portugal.

- Oruc, S., Celik, F., and Akpinar, M.V., 2006. Effect of Cement on Emulsified Asphalt Mixtures. journal of material engineering and performance, Vol 16(5), October, pp578- 583.

- Rita, I., and Zaman, M., and Miller, A., 2001. Characteristics of Cold Processed Asphalt Millings and Cement –Emulsion Composite. Transportation research board 80th annual meeting, Washington DC, USA, January 7-11.

- Salomon, A., and Newcomb, E., 2000. Cold In-place Recycling Literature Review and Preliminary Mixture Design Procedure. Minnesota department of transportation office of research services, Minnesota, USA.

- Suleiman, N., 2002. A State-of-the-Art Review of Cold in-Place Recycling of Asphalt Pavements in the Northern Plains Region. North dakota department of transportation, Bismark, North Dakota, USA.