طراحی روسازی آسفالتی با استفاده از بازیافت سرد رویه و اساس تثبیت شده با سیمان با بکارگیری دستگاه WR (مطالعه موردی: شهر قم)

مقاله علمی – پژوهشی

سیدمحمدحسین دهناد*، استادیار، دانشکدهٔ فنی و مهندسی، دانشگاه قم، قم، ایران
محسن کریمیان، دانشجوی دکتری، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه قم، قم، ایران
ابوالفضل خیرخواه، دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه قم، قم، ایران
مهدی هدایی، دانش آموخته کارشناسی، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه قم، قم، ایران
*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: qom.ac.ir@m.dehnad

دریافت: ۱۴۰۴/۰۱/۰۹– پذیرش: ۱۴۰۴/۰۵/۰۱
صفحه ۳۲۲-۳۰۳

چکیده

در اثر عبور و مرور وسایل نقلیه و ایجاد خرابی‌های متعدد و مداوم، روسازی‌های آسفالتی نیاز به بهسازی و ترمیم دارند. بازیافت سرد در محل، یکی از روش‌های نوین بهسازی و ترمیم روسازی است که در سال‌های اخیر رواج یافته است. این روش علاوه بر این که هزینه سنگین سالانه تامین ماشین آلات، تامین مواد و مصالح در مناطق شهری را کم می‌کند، از طرف دیگر اختلال در ترافیک عبوری از مسیر را کاهش می‌دهد. با این‌حال، لایه‌های روسازی آسفالتی بازیافت شده معمولاً با مشکلاتی مانند شن‌زدگی، عریان‌شدگی، مقاومت اولیه کم و زمان عمل‌آوری طولانی مواجه می‌شوند. برای رفع این مشکلات از افزودنی‌ها و مواد تثبیت کننده مختلف مانند آهک، سیمان، امولسیون قیر و مواد بازیافتی مانند گرد و غبار کوره سیمان، خاکستر بادی، و ماسه بتن بازیافتی، می‌توان استفاده کرد. در این مقاله آزمون آزمایشگاهی تعیین مقاومت فشاری تک محوری بر روی نمونه‌های مصالح بازیافتی آسفالت رویه و اساس در ترکیب با درصدهای مختلف سیمان به عنوان ماده تثبیت کننده مورد بررسی قرار گرفت و جهت دستیابی به مقاومت طرح مورد نظر (۳۵ Kg/cm^2)، درصد بهینه سیمان ۷/۵ درصد بدست آمد. همچنین در این تحقیق طراحی روسازی و بهسازی بلوار خداکرم قم با استفاده از دستگاه WR و بهینه سیمان تعیین شده، مورد بررسی قرار گرفته است. با استفاده از این دستگاه می‌توان سنگفرش و متراکم سازی خاک تثبیت شده، تنظیم ضخامت و عرض روسازی را به سرعت انجام داد. استفاده از این روش علاوه بر تامین مقاومت لازم و کاهش خرابی‌های موجود آسفالتی باعث افزایش عمر مفید روسازی در مقایسه با سایر روش‌ها می‌گردد و اجرای این روش خللی در جریان ترافیک عبوری ایجاد نمی‌کند و هزینه‌های ترمیم و بهسازی را نیز کاهش می‌دهد.

واژه‌های کلیدی: بهسازی و تثبیت، بازیافت سرد در محل، دستگاه WR، سیمان، مصالح بازیافتی آسفالت

۱- مقدمه

امروزه از مصالح دورریز با رویکرد زیست محیطی در ساخت و طراحی پروژه‌های عمرانی استفاده می‌گردد. خرده آسفالت تولید شده در مراحل ترمیم روسازی آسفالتی یکی از این مصالح است که مجدداً در ساخت رویه‌های آسفالتی به کار گرفته می‌شود. استفاده از این ماده، دارای مزایای زیست محیطی و اقتصادی زیادی است. زیرا با وجود سنگدانه‌های بدست آمده می‌توان هزینه‌های استخراج، حمل‌ونقل سنگدانه تا محل احداث جاده و خریداری سنگدانه از واسطه‌ها را کاهش داد. همچنین باعث صرفه جویی در زمان اتمام پروژه و به دنبال آن کاهش دستمزد کارگران می شود و می‌تواند از نظر مالی و اقتصادی در کاهش هزینه ساخت یا ترمیم راه‌ها تا حد چشمگیری تاثیرگذار باشد. با استفاده از مواد بازیافت شده در بتن آسفالتی و به عنوان مکمل

در قیر خالص می‌توان میزان تولید آلاینده‌ها، میزان حرارت و بخارات ناشی از تبخیر قیر و فرآورده‌های وابسته به آن که به محیط اطراف انتقال می‌یابند، را کاهش داد و به دنبال آن دی اکسید کربن کمتری تولید شده و کاهش میزان آلودگی هوا در پروسه آسفالت جاده را در پی دارد. استفاده از RAP صرفه‌جویی تخمینی بیش از ۹۳ میلیون تن سنگدانه بکر و صرفه جویی در حدود ٤,۹ میلیون تن چسب آسفالت را به همراه داشته است (Alarcón, J., M. Jiménez and R. Benítez , ۲۰۲۰). همچنین این ارقام صرفه‌جویی اقتصادی بیش از ٤,٦ میلیارد دلار به دلیل کاهش هزینه‌های مواد و هزینه‌های دفع زباله را ایجاد کرده است (Alarcón, Jiménez and Benítez ۲۰۲۰, Bocci, Graziani et al. ۲۰۲۰). در فرآیند بازیافت، مقادیری از مصالح سنگی قدیمی موجود در لایه‌های آسفالتی استفاده می‌شود که این امر موجب حفظ میلیون‌ها تن مصالح می‌گردد. این در حالی است که برای تولید مصالح بازیافتی به مصرف انرژی کمتری نسبت به حالت معمولی نیاز است. امروزه به دلیل صرفه‌جویی‌های اقتصادی، حفظ منابع طبیعی، بهبود کیفیت راه، حذف خرابی‌های قبلی و ترک‌های موجود، کاهش اثرات مخرب بر محیط زیست، سرعت اجرای کار و ... تمایل به سمت بازیافت آسفالت افزایش یافته‌است (Golchin and Rabbi۲۰۲۰,). مطالعات تجربی اخیر نشان داده‌اند که مخلوط‌های حاوی RAP می‌توانند عملکردی مشابه با مخلوط‌های ساخته شده با مواد بکر داشته باشند. به عنوان مثال، تحقیقات انجام شده در مرکز ملی فناوری آسفالت (NCAT) نشان داد که روکش‌هایی با حداقل ۳۰ درصد آسفالت بازیافتی عملکرد مطلوبی به اندازه روکش‌های آسفالتی با ۱۰۰ درصد مواد اولیه داشته‌اند. بازیافت مصالح آسفالتی برای بهسازی، نوسازی و ترمیم روسازی‌ها بیش از۷۰ سال است که مورد استفاده قرار می‌گیرد و قابلیت صرفه جویی در استفاده از مصالح و سوخت‌های فسیلی، کاهش انتشار آلاینده‌ها و بهبود عملکرد روسازی را داراست (Xiao, Yao et al.۲۰۱۸). بازیافت روسازی‌های آسفالتی به صورت کلی به دو روش داغ و سرد قابل انجام است.

بازیافت سرد روسازی به سه روش: الف) بازیافت سرد در محل، ب) بازیافت سرد کارخانه‌ای و ج) بازیافت تمام عمق انجام می‌شود. تفاوت بازیافت سرد تمام عمق با بازیافت سرد درجا در این است که در بازیافت سرد تمام عمق علاوه بر لایه‌ی رویه آسفالتی، بخشی از اساس دانه‌ای نیز هم زمان بازیافت می‌شود. بازیافت سرد در مقایسه با بازیافت داغ به دلیل عدم نیاز به داغ کردن مصالح آسفالتی بازیافتی صرفه‌جویی عمده‌ای در مصرف انرژی و هزینه‌های مربوط به آن فراهم می‌کند و مزایای زیست محیطی، اقتصادی و ایمنی قابل توجهی دارد (Ma et al, and ۲۰۱۹ Gu, Ayar۲۰۱۸ ,).

با این وجود، استفاده از مخلوط‌های آسفالتی بازیافتی سرد نسبت به مخلوط‌های آسفالتی داغ[۵] برخی ضعف‌های عملکردی به همراه دارد. درصد هوای نسبی بالاتر، زمان عمل‌آوری به نسبت بالا، مقاومت اولیه‌ی کمتر و حساسیت رطوبتی بیشتر از مخلوط‌های HMA مهم‌ترین این موارد می‌باشند (Modarres, ,۲۰۱۴ .Ling, Hanz et al۲۰۱۴ , Rahimzadeh et al). در فرآیند CIR، سطح آسفالت موجود قبل از آسیاب گرم نمی‌شود و مواد بازیافتی برای اصلاح به کارخانه ارسال نمی‌شوند، بلکه در محل اصلاح می‌شوند.

CIR یک فرآیند چند مرحله‌ای مداوم است که در آن روسازی آسفالت موجود با استفاده از تجهیزات تخصصی بازیافت می‌شود که روسازی آسفالتی را آسیاب سرد می‌کند و امولسیون و سنگدانه آسفالت را (در صورت لزوم) با مواد بازیافتی مخلوط می‌کند (N. Samariya۲۰۱۹ ,).

ماشین‌های CIR مزایا و محدودیت‌های متعددی در فرآیند تولید دارند. مزایا عبارتند از: مزایای زیست محیطی، مقرون به صرفه بودن و توانایی بازیافت روسازی‌های آسفالتی موجود بدون حمل مواد به عقب و جلو (Bocci, Graziani et al. ۲۰۲۰ Sabouri and Wegman, ۲۰۲۳,). علاوه بر این، کیفیت ناسازگار مواد CIR ، به ویژه در لایه سطحی، می‌تواند یک نقطه ضعف باشد که منجر به مسائلی مانند حساسیت به رطوبت و ترک خوردگی در دمای پایین می‌شود (Moon, ۲۰۲۱ , Bozorgzad et al). علی‌رغم این محدودیت‌ها، پیشرفت‌هایی مانند توسعه روش‌های آزمایش مبتنی بر عملکرد جدید و ترکیب مواد افزودنی برای افزایش خواص مخلوط‌های CIR برای بهبود اثربخشی و پایداری کلی ماشین‌های بازیافت سرد در محل در فرآیندهای بازسازی روسازی در حال بررسی هستند (Moon, Bozorgzad et ,۲۰۲۱ .Jin, Ge et al۲۰۲۱ , al). از جمله ماشین‌های بازیافت سرد در محل دستگاه WR است که مزایای قابل توجهی برای تثبیت خاک در بازیافت روسازی آسفالت دارد. با استفاده از این دستگاه، می‌توان

به سرعت سنگفرش و فشرده سازی خاک تثبیت شده، تنظیم ضخامت و عرض روسازی و دستیابی به جاده سازی کارآمد را ممکن کرد. دستگاهWR، با فرز کردن و دانه دانه کردن آسفالت‌های موجود و همزمان تزریق بایندرها و آب در مقادیر دقیق مخلوط همگنی ایجاد می‌کند که یکپارچگی ساختاری سطح جاده را بهبود می‌بخشد. این فرآیند در محل انجام می‌شود، که امکان بازسازی کارآمد را بدون نیاز به حمل و نقل گسترده مواد فراهم می‌کند و در نتیجه تأثیرات زیست‌محیطی و زمان ساخت را به حداقل می‌رساند. مکانیسم تثبیت به کار رفته توسط دستگاه WR چندوجهی است. در درجه اول، از فناوری بازیافت سرد استفاده می‌کند که شامل تجزیه مکانیکی لایه‌های آسفالت موجود به همراه افزودن عوامل تثبیت‌کننده مانند آسفالت امولسیونی یا قیر فومی است. این افزودنی‌ها نه تنها انعطاف‌پذیری آسفالت را افزایش می‌دهند بلکه ظرفیت باربری آن را نیز بهبود می‌بخشند. گنجاندن این مواد باعث می‌شود که ساختار آسفالت انعطاف‌پذیرتر شود و بتواند بهتر در برابر بارهای ترافیکی متغیر و شرایط محیطی مقاومت کند.علاوه بر مخلوط مکانیکی، دستگاه WR از روتورهای پیشرفته فرز و مخلوط‌کن بهره‌مند است که اختلاط کامل عوامل تثبیت‌کننده با آسفالت بازیافتی را تضمین می‌کند (شکل۱). اختلاط کامل باعث ایجاد یک لایه اساس جدید با ظرفیت باربری و دوام بالا می‌شود. این فرآیند همچنین مقاومت در برابر نفوذ آب را افزایش می‌دهد و در نتیجه عمر مفید آسفالت را طولانی‌تر می‌کند.

شکل۱. پردازش مواد در حین بازیافت سرد با دستگاه WR

یکی از روش‌های رایج بازیافت، استفاده دوباره از خرده آسفالت همراه با سیمان برای تقویت لایه اساس و جایگزینی آن در لایه های روسازی می‌باشد که انتخاب طرح مناسب موجب بالا بردن کیفیت ساخت لایه روسازی و کاهش هزینه‌های اجرایی می‌گردد. یکی از معیارهای مهم در طرح این مخلوط‌ها، انتخاب دانه‌بندی مناسب برای اختلاط با سیمان و به دست آوردن مقاومت مورد نظر است. افزودن سیمان باعث افزایش مقاومت، کاهش تغییر شکل ماندگار، افزایش دوام و کاهش حساسیت حرارتی می‌شود. اما افزایش مقاومت خود باعث کاهش انعطاف پذیری مخلوط شده و می‌تواند تأثیر مفید سیمان بر عمر خستگی مخلوط‌ها را تحت تأثیر قراردهد.فن‌آوری تثبیت با چسب‌ها مانند آهک، سیمان و قیر فوم‌دار، برای افزایش ظرفیت باربری حیاتی است، که منجر به مزایای اقتصادی و زیست‌محیطی از طریق استفاده از مواد بازیافتی و در محل می‌گردد (Sorociak and Dobrzyński۲۰۲۳ ,). علاوه بر این، ترکیب مواد زائد مانند لجن روغنی می‌تواند خواص مواد دانه‌ای و خاک‌های زیربنایی را بهبود بخشد و به مدیریت پایدار منابع و کاهش اثرات منفی زیست محیطی کمک کند (Alarcón, Jiménez et al۲۰۲۰ ,). استفاده از افزودنی‌های شیمیایی نظیر سیمان برای بهبود عملکرد مخلوط‌های بازیافتی سرد بسیار متداول است. پژوهش‌های متعددی نشان می‌دهند که افزودنی‌های شیمیایی مقاومت اولیه و مقاومت در برابر رطوبت را به طرز قابل توجهی افزایش می‌دهد. مخلوط‌های همگن آسفالت سرد امولسیون قیر سیمانی می‌توانند با استفاده از ۱ تا ۱۲٪ سیمان و امولسیون‌های قیر کندگیر تولید شوند.

این مخلوط‌ها از نظر مصرف انرژی و انتشار گاز CO_2 نسبت به مخلوط‌های گرم آسفالتی HMA مزایایی دارند. (Fang, Taziani ,۲۰۱۶ .Hernandez et al-Garcia, , ۲۰۱۷ Toraldo et al ,۲۰۱۶ ., Yan, Leng et al.). افزودن سیمان برای کسب سریع‌تر مقاومت اولیه‌ی مخلوط‌های

آسفالتی سرد یکی از راهکارهای متداول است؛ زیرا از یک سو شکست امولسیون را تسریع می‌کند و از سوی دیگر پس از فرآیند هیدراتاسیون به عنوان یک عامل اتصال ثانویه عمل می‌کند. استفاده از افزودنی‌های شیمیایی در عین حال تردی این مخلوط‌ها را نیز افزایش می‌دهد (Fang, Garcia۲۰۱۶ ,. Hernandez et al-). که خود می‌تواند خصوصیات شکست و عملکرد درازمدت آن‌ها را به شدت تحت تاثیر قراردهد. عملکرد خستگی مخلوط‌های حاوی سیمان در سطوح ترافیک سنگین کاهش شدیدی نسبت به مخلوط های بدون سیمان نشان‌داده است (Modarres, Rahimzadeh et al۲۰۱۶ .). همچنین استفاده از سیمان میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای را افزایش می‌دهد که این امر از فواید زیست محیطی بازیافت سرد می‌کاهد (Hernandez et al-Fang, Garcia۲۰۱۶ ,). سردیهار و همکاران ویژگی‌های مکانیکی و دوام آسفالت بازیافت شده با سیمان برای مصالح اساس و زیراساس تولید شده با تغییر درصد سنگدانه بکر، سنگدانه آسفالت بازیافتی و محتوای سیمان را مورد بررسی قراردادند. مشخص شد که این مخلوط‌ها می‌توانند به عنوان جایگزینی برای اساس و زیراساس‌های دانه‌ای در روسازی‌های انعطاف‌پذیر یا لایه اساس روسازی‌های بتنی به جای بتن غلتکی مورد استفاده قرارگیرند این مطالعه عملکرد شانزده نمونه از مخلوط‌های CTRA را با استفاده از آزمایش‌های UCS، دوام و خمش ارزیابی کرد.

نتایج نشان داد که محتوای رطوبت بهینه برای تمام مخلوط‌ها بین ۶٫۵-۷٫۵٪ و حداکثر چگالی خشک (MDD) بین ۲٫۲۰-۲٫۲۸ گرم بر سانتی‌متر مکعب بود. اضافه کردن سیمان تأثیر بیشتری بر چگالی رطوبت-خشک نسبت به AR داشت. مدل شکست این مخلوط‌ها خرد شدن بود، با افزایش محتوای سیمان، مقاومت خمشی افزایش یافت. سختی خمشی بین ۲۵۰۰ تا ۲۱۰۰۰ مگاپاسکال بدست آمد وسختی پایین برای مخلوط ۶۰R۴۰V در محتوای سیمان ۲٫۵٪ مشاهده شد. دوام مخلوط کمتر از حد مجاز ۱۴٪ (که توسط IRC۳۷-۲۰۱۲ مشخص شده بود) یافت شد. مخلوط بهینه به دلیل استحکام بیشتر پیوند بین دانه‌های پوشش داده شده با قیر و ملات سیمان در مخلوط‌های CTRA با ۳۰٪ محتوای RA و ۷۰٪ مخلوط VA بدست آمد. مطالعه استفاده از RA تا ۳۰٪ در مخلوط‌های CTRA را توصیه می‌کند. (Kasu, Manupati et al. ۲۰۲۰).

تاثیر پلیمر نیوکوفلوک (NICOFLOK) با سیمان پرتلند بر روی خاک‌های دانه‌ای و مواد آسفالت بازیافتی را بازوقی و همکاران بررسی‌کردند. نتایج نشان داد که افزودن مواد سیمان- نیکوفلوک به خاک بستر باعث افزایش قابل توجهی در مقادیر[10] CBR و نیز کاهش مقدار مصالح خاکی مورد نیاز شد. کارایی این پلیمر با سیمان پرتلند به عوامل مختلفی از جمله میزان سیمان، زمان عمل‌آوری، اندازه و شکل دانه‌های خاک بستگی دارد. تثبیت بستر و مواد آسفالت بازیافتی با سیمان و نیکوفلوک نیز عملکرد طولانی مدت روسازی را بهبود بخشیده است (Baroughi, Rezaei et al۲۰۲۰ ,). چاپرا و همکاران عملکرد لایه اساس بهبود یافته با سیمان[11] (CTB) با ترکیب مواد روسازی آسفالت بازیافتی و تثبیت کننده شیمیایی با روش بهسازی کامل عمق[12] (FDR) را تجزیه و تحلیل کردند. از داده‌های به دست آمده مشخص‌گردید که مخلوط تهیه شده با ۴/۵ درصد سیمان و ۴ درصد تثبیت کننده شیمیایی بهترین نتیجه را از نظر پارامترهای مقاومتی و ویژگی‌های دوام نمونه‌های مورد مطالعه به دست می‌دهد(Chhabra, Ransinchung ۲۰۲۱ , et al). پتانسیل روسازی آسفالت بازیافتی (RAP) تثبیت شده با سیمان و مخلوط خاک لاتریتی توسط آنیروت و سوکسان مورد ارزیابی قرارگرفت. استحکام برشی با افزایش نسبت جایگزینی RAP افزایش یافت در حالی که سفتی مخلوط‌های RAP خاک تثبیت‌شده با سیمان به دلیل جذب انرژی بالای چسب آسفالت کاهش‌یافت. (Aniroot and Suksun,۲۰۲۳). لی و همکاران ارزیابی آزمایشگاهی عملکرد مقاومتی بازیافت تمام عمق با مواد سیمان پرتلند را انجام دادند. بازیافت تمام عمق با سیمان پرتلند (PC-FDR) یک فن‌آوری نوآورانه بازیافت سرد برای روسازی‌ها را نشان می‌دهد که به دلیل ظرفیت آن در استفاده مجدد از لایه‌های اساس روسازی فرسوده، رویکرد قابل توجهی دارد.

نتایج نشان داد که افزایش محتوای سیمان، افزایش زمان عمل آوری و افزایش دمای عمل‌آوری همگی به افزایش مقاومت فشاری تک محوری کمک می‌کنند (Li۲۰۲۴ ,. Luo et al).

هدف از این تحقیق الف) معرفی و تشریح مکانیزم دستگاه WR و مزایای و محدودیت‌های آن در اجرای آسفالت بازیافتی ب) تعیین درصد بهینه سیمان مورد استفاده جهت تثبیت آسفالت رویه و لایه اساس با استفاده از نتایج

آزمایشگاهی مقاومت فشاری تک محوری نمونه‌های ساخته شده ج) طراحی روسازی آسفالتی و تعیین ضخامت لایه‌های مختلف روسازی مسیر بلوار خداکرم قم بر اساس مطالعات ترافیک انجام گرفته و درصد بهینه سیمان بدست آمده از آزمون‌های آزمایشگاهی می‌باشد.

۲- روش تحقیق

مسیر مورد مطالعه بخشی از جاده قدیم –قم تهران را شامل می‌شود که توجه به عبور و مرور قابل ملاحظه وسائل نقلیه سنگین از این مسیر و بروز خرابی‌های متعدد و مداوم در روسازی مسیر، هر ساله هزینه قابل ملاحظه‌ای صرف تعمیر و نگهداری این مسیر می‌شود. عملیات اجرایی نامناسب، بارهای سنگین و عدم هماهنگی میان ارگان‌های گوناگون متولی تأسیسات، آسیب‌های پی‌درپی روسازی را به همراه داشته است. از سوی دیگر انجام عملیات تعمیر علاوه بر هزینه‌های قابل توجه تأمین ماشین آلات، تعمیر مواد و مصالح در مناطق شهری نیازمند به ایجاد اختلال در ترافیک عبوری از مسیر می‌گردد. خرابی‌هایی مشاهده شده شامل الف) ناهمواری‌های متعدد، ب) خرابی‌های موضعی نظیر ترک‌های پوست سوسماری، پ) نشست موضعی روسازی، ت) عدم پایداری مخلوط آسفالتی (که سبب برهم خوردن نظم خط کشی‌های مسیر شده است)، ث) عیوب آسفالت (به دلیل تراشیدن‌های پی در پی و همینطور تاسیسات شهری و لوله از مسیر)، ج) عدم وجود سیستم زهکشی آب‌های سطحی به صورت درست و کاربردی و کور شدن مسیر ورودی آب‌های سطحی و نفوذ آب می‌باشد. به جهت رفع خرابی‌ها مسیر مورد مطالعه دو گزینه جهت بازسازی مسیر مطرح گردید. گزینه اول روش بازسازی است که شامل تراش کامل لایه آسفالتی موجود، برداشت یک لایه ۱۵ سانتی متری از مصالح غیرچسبنده، شخم زنی و تراکم لایه‌های زیرین آسفالت، اجرای یک لایه ۱۵ سانتی‌متری اساس با زهکش مناسب و درنهایت روکش آسفالتی می‌گردد. این گزینه در قطعاتی که لایه‌های زیرآسفالت دارای تراکم و مقاومت سازه‌ای قابل قبول هستند و لایه آسفالت دارای مقاومت سازه‌ای کم و دارای ترک‌های عمیق می‌باشد، می تواند مورد توجه قرارگیرد. اما با توجه به اینکه امکان انحراف ترافیک عبوری به منظور برداشتن لایه‌های ضعیف نمی‌باشد، لذا این روش عملا امکان پذیر نیست. گزینه دوم روش تثبیت مصالح موجود با سیمان می باشد و در این روش مصالح شنی با کیفیت نسبتاً خوب را می‌توان با سیمان تثبیت کرده و از آن برای ایجاد لایه‌های اساس با قابلیت باربری زیاد استفاده‌کرد.از لایه های اساس سیمانی برای روسازی‌های بتنی و آسفالتی استفاده می‌گردد. مقاومت مصالح اساس سیمانی بستگی به جنس و دانه بندی مصالح سنگی، درصد سیمان، کیفیت اختلاط، شرایط عمل آوردن مخلوط، میزان تراکم و زمان دارد. درصد سیمان برای تثبیت خاک و مصالح سنگی با انجام آزمایش مقاومت فشاری و آزمایش دوام به دست می‌آید. ابتدا نمونه‌هایی با درصدهای مختلف سیمان ساخته می‌شود و پس از عمل آوری به مدت ۷روز در اتاق مربوط بر روی آن‌ها آزمایش فشاری تک محوری انجام شده ومنحنی نمایش تغییرات مقاومت فشاری نمونه‌ها بر حسب درصد سیمان رسم می‌شود. با در دست داشتن مقاومت فشاری مطلوب میزان سیمان مورد نیاز به دست می‌آید. جزییات این گزینه الف) تراش لایه آسفالت و اساس موجود و خرد کردن کلوخه‌های آن، ب) پخش سیمان واختلاط مصالح سنگی و سیمان، پ) پخش آب و اختلاط مصالح سنگی، سیمان و آب با یکدیگر، ت)کوبیدن و متراکم نمودن مصالح تثبیت شده با سیمان به عمل آوردن آن و ث) اجرای روکش آسفالتی می‌باشد. با توجه به این‌که در این روش امکان اصلاح روسازی در یک خط و انتقال تمامی ترافیک به خط مجاور وجود دارد، لذا نیازی به مسدود نمودن مسیر نمی‌باشد. جهت اجرای روش دوم تثبیت از دستگاه WR استفاده گردید. تثبیت لایه‌های روسازی با دستگاه WR به شرح روبرو انجام می گیرد: الف- ابتدا بر اساس طرح ضخامت آسفالت مازاد توسط دستگاه ریزگرد تراشیده می‌شود. با توجه به اینکه در بیشتر طرح‌ها ضخامت آسفالت بیش از ۴۰ درصد ضخامت لایه تثبیتی نمی‌تواند باشد بایستی آسفالت مازاد تراشیده و از محل خارج گردد. ب) پس از اینکه اطمینان حاصل شد ضخامت آسفالت مناسب لایه تثبیت می‌باشد توسط دستگاه WR آسفالت باقی مانده را با مصالح زیر آسفالت تا ضخامت طرح می‌تراشند. پ) پس از تراشیدن ضخامت لایه بازیافتی مقدار سیمان طبق طرح و یا دوغاب سیمان و یا دوغاب آهک و یا قیر مورد نیاز رابه لایه بازیافتی اضافه نموده و هم‌زمان دستگاه WR اختلاط لایه با افزودنی مورد نظر را انجام خواهد داد. ت) پس از اختلاط کامل لایه بازیافتی سطح راه را که مخلوطی از آسفالت مصالح اساس و زیر اساس (Base, Sub base) و افزودنی که طبق طرح انجام شده است با دستگاه گریدر تسطیح و به کد ارتفاعی مورد نظر می‌رساند. ث) با توجه به اینکه ضخامت لایه معمولاً بیش از ۲۵ سانتیمتر می‌باشد، پس از

تسطیح ابتدا با غلطک پاچه بزی و پس از آن با غلطک ویبره کوبیده می‌شود .ج)عمل آوری (تا سه روز) لایه تثبیت شده با سیمان، به وسیله آب و به صورت تر خواهد بود.

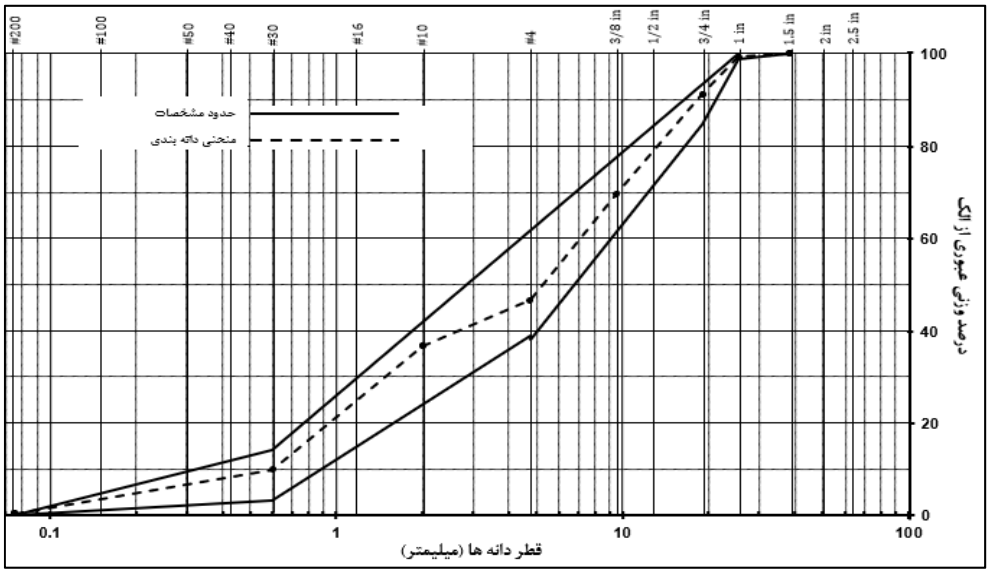
۳- مواد و روش‌ها

مواد و مصالح مصرفی جهت بازیافت سرد آسفالت شامل مصالح خرده آسفالتی حاصل از تراش رویه آسفالت، مصالح اساس (لایه اول از زیر لایه آسفالت) و سیمان می‌باشد.

۳-۱- تراشه آسفالت

تراشه آسفالت به مصالحی اطلاق می‌شود که با یا بدون حرارت دادن توسط دستگاه‌هایی به نام آسفالت تراش از روسازی آسفالت‌های اضمحلال‌شده تراشیده و جدا می‌شوند. این مصالح شامل درصدی از مصالح سنگی و قیر سفت شده (پیر شده) می‌باشند. مصالح تراشه آسفالتی استفاده‌شده در ساخت نمونه‌های آزمایشگاهی در این پژوهش از پروژه بهسازی و اصلاح روسازی آسفالتی بلوار خداکرم قم تهیه شده‌اند و مصالح سنگ آهک کوهی مربوط به معدن روستای کهک در نزدیکی قم می‌باشد. شکل۱ دانه‌بندی تراشه آسفالت را به همراه حدود بالا و پایین استاندارد مشخص می‌کند. برای دانه‌بندی خرده‌های آسفالت، ابتدا سنگدانه‌های به‌هم‌چسبیده در حرارت ۱۲۰ درجه سانتیگراد آون (گرم خانه) در مدت ۳۰ دقیقه قرار گرفتند. سپس با استفاده از یک سری الک و دستگاه شیکر، خرده‌های آسفالت سرند شدند. الک‌های مورد استفاده در دانه بندی مصالح شامل الک نمره ۳۰، ۱۰، ٤، ۳/۸ اینچ، ۳/٤ اینچ، ۱ اینچ و ۱/۵ اینچ (تعداد ۷ الک) می‌باشد. همان‌طورکه در شکل ۱ مشاهده می‌شود، دانه‌بندی خرده‌های آسفالت در محدوده استاندارد AASHTO MP-۳۱-۱۷ می‌باشد.

بر اساس آزمایشات انجام گرفته تراشه آسفالت مورد استفاده از نوع ۰۲۵ با ٤۸ کیلوگرم قیر در هر تن مصالح آسفالت (نسبت قیر به مصالح سنگی ٤/۸٪) می‌باشد. در جدول۱ مشخصات فیزیکی و شیمیایی مصالح خرده آسفالتی نشان داده شده است.



شکل۱. دانه‌بندی مصالح خرده آسفالتی جهت ساخت نمونه‌های آزمایشگاهی

جدول ۱. مشخصات فیزیکی و شیمیایی مصالح خرده آسفالتی

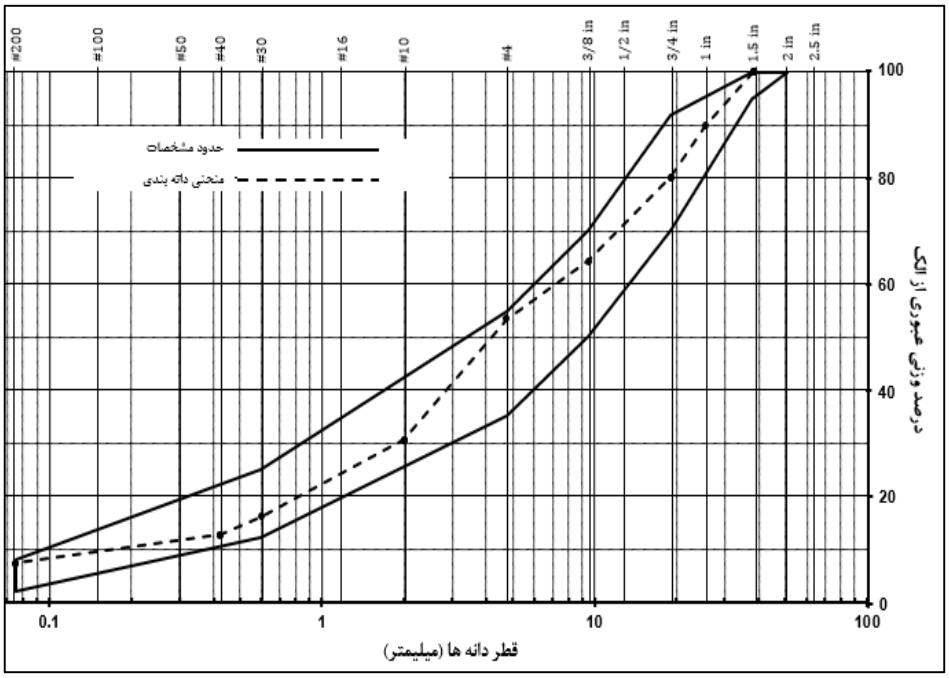
موارد آزمایش	واحد	استاندارد آزمایش	الزامات فنی ترافیک سنگین	نتایج آزمایش
درصد قیر نسبت به مخلوط آسفالت	(%)	-	-	٤/۸
مقاومت مخلوط	kg	AASHTOT245	≥۸۰۰	۱۰۲۱
روانی	mm	AASHTOT245	۵/۳≥ ≥۲	۳/۱
درصد شکستگی	(%)	AASHTOT245	≥۷۵	۱۰۰
درجه حرارت محیط	C	AASHTOT245	≥۱۰	۱۱
درجه حرارت آسفالت (جاده)	C	AASHTOT245	۱۶۳≥	۱۳۳
وزن مخصوص نمونه مارشال	gr/cm^3	AASHTOT166	-	۲/۳۹
وزن مخصوص حقیقی مصالح	gr/cm^3	AASHTOT166	-	۲/٦٦
درصد فضای خالی نمونه مارشال	(%)	AASHTOT245	۵≥ ≥۳	٤/۵٦
درصد حجمی فضای خالی مصالح	(%)	AASHTOT245	۸≥ ≥۳	۷/۸
درصد فضای خالی پرشده با قیر	(%)	AASHTOT245	۷۵≥ ≥٦۰	٦۷/۷

۲-۳- مصالح لایه اساس

در این پژوهش مصالح اساس مرتبط با لایه اول زیر لایه آسفالت نیز جهت طرح اختلاط مورد استفاده قرارگرفته است. این مصالح سنگ آهکی از معدن شهید مولوی واقع در جاده روستای ونارچ قم تهیه و استفاده شده است. الک های مورد استفاده در دانه بندی مصالح شامل الک نمره ۳۰، ۱۰، ٤، ۳/۸ اینچ، ۳/٤ اینچ، ۱ اینچ و ۱/۵ اینچ (۷ الک) می باشد. در شکل ۳ دانه‌بندی مصالح اساس به همراه حدود استاندارد ارائه‌شده در نشریه ۱۰۱ ارائه شده‌است. همان‌طورکه در شکل ۲ مشاهده می‌شود دانه‌بندی مصالح اساس در محدوده مجاز قرار گرفته‌است. در جدول۲ مشخصات فیزیکی و شیمیایی مصالح اساس نشان داده شده است.

۳-۳- سیمان

سیمان مورد استفاده جهت تثبیت در طرح اختلاط آسفالت سرد از نوع II می باشد و از کارخانه سیمان نیزار تامین شده‌است. مشخصات فیزیکی و شیمیایی سیمان بر اساس آزمایشات انجام گرفته و ارائه شده توسط کارخانه سازنده به شرح جدول ۳ می‌باشد. بر اساس آزمایشات فیزیکی دانسیته، سطح ویژه، مقاومت فشاری، زمان گیرش اولیه و نهایی سیمان طبق الزامات فنی ارائه شده در جدول ۳ در محدوده مجاز می‌باشند. همچنین آزمایشات شیمیایی تعیین درصد سولفات، اکسید منیزیم، کلر و اکسید کلسیم انجام گرفته و مقایسه آن با محدوده مجاز ارائه شده در جدول ۳ نشان می‌دهد که سیمان مصرفی در محدوده مجاز می‌باشد.



شکل۲. دانه‌بندی مصالح اساس جهت ساخت نمونه‌های آزمایشگاهی

جدول ۲. مشخصات فیزیکی و شیمیایی مصالح اساس

موارد آزمایش	واحد	استاندارد آزمایش	الزامات فنی	نتایج آزمایش
گروه دانه بندی	-	-	-	٤
ارزش ماسه ای	(%)	AASHTOT176	≥٤۰	٤۹
درصد شکستگی	(%)	AASHTOT177	≥۷۵	۱۰۰
درصد پولکی	(%)	BS812	۳۵≥	۱۹/٦
درصد سوزنی	(%)	BS812	۱۵≥	۱٤/۸
درصد سایش لس آنجلس	(%)	AASHTOT196	٤۵≥	۲٤
حد خمیری	(%)	AASHTOT90	٤≥	**N.PL**
حد روانی	(%)	AASHTOT89	۲۵≥	**N.LL**
افت وزنی در برابر سولفات (ساندنس)	(%)	AASHTOT104	۱۲≥	٤/۹

جدول ۳. مشخصات سیمان مصرفی در طرح اختلاط

موارد آزمایش	واحد	استاندارد آزمایش	الزامات فنی	نتایج آزمایش
دانسیته (ρ)	(gr/cm^3)	ASTM C188	-	۳/۱۳
سطح ویژه (S)	m^2/kg	ASTM C204	۲۶۰≤	۳۰۵
مقاومت فشاری (Rc)	MPa	ASTM C109	۳ روزه ≤ ۱۰	۲۶/۷
			۷ روزه ≤ ۱۷	۳۲/۱
			۲۸ روزه : -	۴۳/۷
زمان گیرش اولیه	Minute	ASTM C191	۴۵≤	۱۶۵
زمان گیرش نهایی	Minute	ASTM C192	۳۷۵≥	۲۵۵
Sulfur trioxide contentX_{SO3}	(%)	ASTM C114	۳≥	۲/۱
Magnesium oxideX_{MgO}	(%)	ASTM C114	۵≥	۱/۳
Chloride ion contentX_{Cl}	(%)	ASTM C114	۰/۰۶≥	۰/۰۲
Free calcium oxide X_{CaO}	(%)	ASTM C114	۱/۰≥	۰/۹۵
Alkali content$X$	(%)	ASTM C114	۰/۸≥	۰/۷۳

۴-۳- دستگاه WR

سیستم WR یک بازیافت‌کننده سرد و استابیلایزر خاک است که برای بازیافت آسفالت و استحکام‌بخشی به خاک استفاده می‌شود. این دستگاه دارای عرض کاری ۲۰۰۰ میلی‌متر و عمق عملیاتی ۵۰۰ میلی‌متر است و می‌تواند در شرایط مختلف کاری به کار رود. همچنین مدل WR۲۰۰ Xli نیز با عرض کاری بیشتری (۷ فوت و ۱۰ اینچ) و عمق کاری ۱۹/۷ اینچ برای بازار آمریکا طراحی شده است. WR۲۰۰۰ برای بازیافت آسفالت موجود و تزریق مواد چسبنده و آب به مقادیر دقیق و مخلوط کردن همه این مواد در یک عملیات واحد طراحی شده است. هنگامی که به عنوان یک بازیافت‌کننده سرد عمل می‌کند، این دستگاه آسفالت موجود را فرز و دانه‌بندی می‌کند، مواد چسبنده مانند آهک یا سیمان را تزریق می‌کند و همه را در یک مرحله مخلوط می‌کند. از جمله مزایای دستگاه WR۲۰۰۰، صرفه‌جویی در مصرف مواد اولیه و هزینه‌های حمل و نقل، کاهش زمان ترمیم و تأخیرات ترافیکی، افزایش عمر مفید راه و کیفیت زیرساخت، کاهش آلودگی محیط زیست و انتشار گازهای گلخانه‌ای، امکان انجام دو روش بازیافت سرد در محل و بازیابی کامل عمق امکان تنظیم عمق کاری تا ۵۰۰ میلی‌متر، امکان تراشیدن و مخلوط کردن لایه‌های آسفالت با مواد افزودنی مختلف مانند سیمان، آب، امولسیون و فوم آسفالتی می‌باشد. از جمله معایب دستگاه WR۲۰۰۰، نیاز به تجهیزات و دانش فنی مناسب برای انجام عملیات، نیاز به کنترل کیفیت دقیق و مداوم برای اطمینان از نتایج مطلوب، نیاز به شرایط آب و هوایی مناسب برای انجام عملیات، نیاز به زمان انتظار برای سخت شدن مواد افزودنی قبل از پوشش دهی می‌باشد.

در جدول ٤ مشخصات فنی کامل دستگاه بازیافت کننده سرد WR۲۰۰۰ نشان داده شده است.

جدول ٤. مشخصات فنی دستگاه بازیافت کننده سرد WR 2000

مشخصات	مقدار
وزن	۲۵/۲ تن
لاستیک‌های استاندارد	R۲۶۷۵/۶۲۰
عرض کاری	۲۰۰۰ میلی‌متر
عمق عملیاتی	۵۰۰ میلی‌متر
سری مدل	WR ۲۰۰۰
تولیدکننده موتور	Mercedes-Benz
نوع موتور	OM457 LA
قدرت موتور	۳۱۵ کیلووات

٤- تحلیل و نتایج آزمایشات

جهت انجام مراحل طرح اختلاط مصالح ذکر شده در بخش قبل می بایست آزمون‌های آزمایشگاهی جهت تعیین پارامترها و خصوصیات مصالح مورد استفاده قرارگیرد. برنامه آزمایشات شامل انجام آزمایشات دانه‌بندی و طبقه‌بندی بر روی مصالح

به صورت جدا و بر روی مخلوط حاصل، آزمایشات تراکم بر روی مخلوط مصالح اساس وسیمان، آزمایش‌های تعیین مرغوبیت مصالح سنگی بر روی مصالح اساس شامل ارزش ماسه‌ای، درصد افت وزنی در مقابل سایش به روش لس‌انجلس، حدود اتر برگ، درصد شکستگی مصالح سنگی، درصد تطویل و تورق، درصد سنگدانه‌های پهن و دراز، درصد افت وزنی در مقابل سولفات سدیم و آزمایش مقاومت فشاری تک محوری بر روی نمونه‌های مخلوط آسفالتی سرد می‌باشد.

٤-١- دانه بندی و طبقه بندی

آزمایش دانه بندی مصالح اساس بر اساس استاندارد ۲۷T-AASHTO و همچنین با روش شستشو برای مصالح اساس ریزدانه انجام پذیرفت. علاوه بر این آزمایش هیدرومتری به روش ۸۸T-AASHTO بر روی نمونه مصالح اساس لایه اول از زیر آسفالت و دانه‌بندی آسفالت بعد از شستشو طبق استاندارد ۱۶۴T-AASHTO و دانه‌بندی مخلوط آسفالت با مصالح اساس لایه اول از زیر آسفالت انجام پذیرفته است. دانه‌بندی مصالح اساس و خرده آسفالت در شکل ۱ و ۲ بخش قبل ارائه شده‌است. دانه‌بندی مصالح مخلوط آسفالت با مصالح اساس لایه اول نیز در شکل ۳ مشخص شده‌است. طبقه‌بندی مصالح اساس طبق روش آشتو AASHTO M-۱۴۵، در رده A-۱-a قرار گرفته است.

٤-٢- تراکم آزمایشگاهی نمونه مخلوط

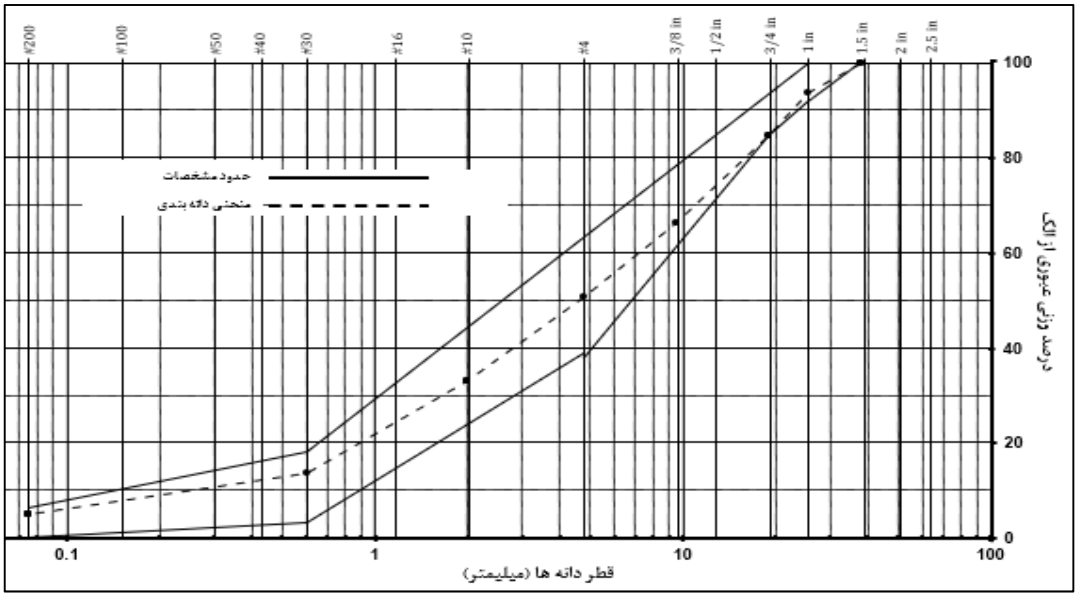
بر روی یک نمونه مخلوط مصالح اساس، خرده آسفالت و سیمان محدوده مورد بررسی در درصدهای مختلف سیمان، جهت تعیین حداکثر دانسیته خشک و درصد رطوبت بهینه، آزمایش تراکم آزمایشگاهی بر اساس استاندارد ASTM D۵۵۸-۱۱ روش B انجام شد. نتایج آزمایشات به صورت جدول۵ به دست آمده است.

٤-٣- تراکم آزمایشگاهی و دانسیته در محل نمونه‌های مصالح آسفالت بازیافتی و مصالح اساس

آزمایش دانسیته در محل و تراکم آزمایشگاهی در لایه‌های آسفالت بازیافتی و لایه اول اساس در محدوده طرح مورد بررسی، انجام گرفت و نتایج در جدول ٦ ارائه گردیده‌است.

جدول ۵. نتایج آزمون‌های تراکم آزمایشگاهی مخلوط آسفالتی

درصد مخلوط مصالح سنگی		درصد سیمان(٪)	حداکثر دانسیته خشک (gr/cm^3)	درصد رطوبت بهینه(٪)
خرده های آسفالت (٪)	لایه اول از زیر آسفالت (٪)			
٤٠	٦٠	٣	٢/٠٦	٥/٠
٤٠	٦٠	٥	٢/٠٨	٤/٩



شکل ۳. دانه‌بندی مصالح مخلوط آسفالت با مصالح اساس لایه اول

جدول ٦. نتایج آزمون‌های تراکم آزمایشگاهی و دانسیته در محل مصالح آسفالت بازیافتی و اساس

شماره آزمایش	محل آزمایش		تراکم محل		تراکم آزمایشگاهی		درصد تراکم نسبی	وضعیت لایه			
	سمت	کیلومتر	دانسیته خشک	درصد رطوبت	حداکثر دانسیته خشک	درصد رطوبت		ضخامت (cm)	شماره لایه	نوع لایه	مشخصات تراکم نسبی (٪)
۱	راست	P1	۲/۱۸٦	٤/۱	۲/۱٦۳	٦/۱	۱۰۱	*	۱	بازیافت سرد	۱۰۰
۲	چپ	P2	۲/۱۷	۵/۵	۲/۱٦۳	٦/۱	۱۰۰	*	۱	بازیافت سرد	۱۰۰
۳	وسط	P3	۲/۱۳۹	٤/۳	۲/۱٦۳	٦/۱	۹۹	*	۱	بازیافت سرد	۱۰۰
٤	راست	P4	۲/۱۳۲	۵/۳	۲/۱٦۳	٦/۱	۹۹	*	۱	بازیافت سرد	۱۰۰
۵	وسط	P5	۲/۱۰۷	٤	۲/۱۲	۸/۱	۹۹	۲٤	۱	اساس بازیافت	۱۰۰
٦	راست	P6	۲/۱۲۲	٤/۲	۲/۱۲	۸/۱	۱۰۰	۲۵	۱	اساس بازیافت	۱۰۰
۷	چپ	P7	۲/۱۱۲	٤/۵	۲/۱۲	۸/۱	۱۰۰	۲٦	۱	اساس بازیافت	۱۰۰
۸	وسط	P8	۲/۰۸۸	٦/۳	۲/۱۲	۸/۱	۹۸	۲۵	۱	بازیافت سرد	۱۰۰
۹	وسط	P9	۲/۱۵	۲/٤	۲/۱٤۱	۷/۹	۱۰۰	۲٦	۱	بازیافت اساس	۱۰۰
۱۰	راست	P10	۲/۱٤٤	۳/۵	۲/۱٤۱	۷/۹	۱۰۰	۲۸	۱	بازیافت اساس	۱۰۰
۱۱	چپ	P11	۲/۱۰۳	٤/۲	۲/۱٤۱	۷/۹	۹۸	۲٤	۱	بازیافت اساس	۱۰۰
۱۲	وسط	P12	۲/۱٤۲	٤/٦	۲/۱٤۱	۷/۹	۱۰۰	۲٤	۱	بازیافت اساس	۱۰۰
۱۳	وسط	P13	۲/۱۱۲	۵/۱	۲/۱۲	۸/۸	۱۰۰	۱٦	۱	بازیافت سرد	۱۰۰
۱٤	راست	P14	۲/۰۸۵	٤/۱	۲/۱۲	۸/۸	۹۸	۲٦	۱	بازیافت سرد	۱۰۰
۱۵	چپ	P15	۲/۱	٤	۲/۱۲	۸/۸	۹۹	۲۸	۱	بازیافت سرد	۱۰۰
۱٦	راست	P16	۲/۱٤۷	۲/٦	۲/۱۵۱	۷/٤	۱۰۰	۲۱	۱	بازیافت سرد	۱۰۰
۱۷	چپ	P17	۲/۱۵	۵/۷	۲/۱۵۱	۷/٤	۱۰۰	۲۷	۱	بازیافت سرد	۱۰۰
۱۸	وسط	P18	۲/۱۱۸	۵/٦	۲/۱۵۱	۷/٤	۹۸	۲٤	۱	بازیافت سرد	۱۰۰
۱۹	راست	P19	۲/۱۳۵	۳/۹	۲/۱۵۱	۷/٤	۹۹	۲۷	۱	بازیافت سرد	۱۰۰
۲۰	چپ	P20	۲/۱۲۹	٤/۳	۲/۱۵۱	۷/٤	۹۹	۲٤	۱	بازیافت سرد	۱۰۰
۲۱	وسط	P21	۲/۱۱٦	۵/٤	۲/۱۵۱	۷/٤	۹۸	۲٦	۱	بازیافت سرد	۱۰۰
۲۲	وسط	P22	۲/۱۱۷	٦/٤	۲/۱۱	۸	۱۰۰	۲۷	۱	بازیافت سرد	۱۰۰
۲۳	راست	P23	۲/۰۸۳	۵/۱	۲/۱۱	۸	۹۹	۲۸	۱	بازیافت سرد	۱۰۰
۲٤	چپ	P24	۲/۰۵	۷/۳	۲/۱۱	۸	۹۷	۲٦	۱	بازیافت سرد	۱۰۰
۲۵	وسط	P25	۲/۰۹۸	۵/۵	۲/۱۱	۸	۹۹	۲۷	۱	بازیافت سرد	۱۰۰

٤-٤- آزمایش‌های تعیین مرغوبیت مصالح سنگی

آزمایش‌های تعیین مرغوبیت مصالح سنگی بر روی مصالح اساس شامل ارزش ماسه‌ای، درصد افت وزنی در مقابل سایش به روش لس‌آنجلس، حدود اتر برگ، درصد شکستگی مصالح سنگی، درصد تطویل و تورق، درصد سنگدانه‌های پهن و دراز، درصد افت وزنی در مقابل سولفات سدیم انجام گرفت و نتایج در جدول ۷ ارائه شده است.

٤-٥- آزمایشات مقاومت فشاری تک محوری

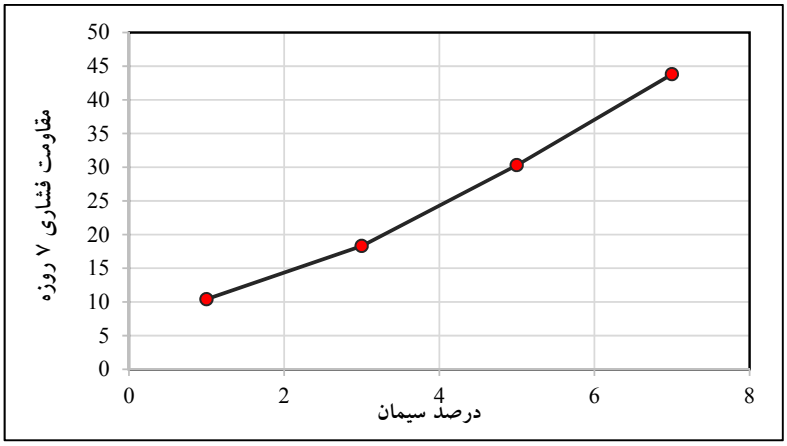
ساخت، عمل‌آوری و تعیین مقاومت فشاری تک محوری نمونه های طرح اختلاط مصالح روسازی (لایه اول از زیر آسفالت،آسفالت) و سیمان به ترتیب بر اساس استانداردهای ASTM D ۱۱-۵۵۸ (METHOD B)، STMD ۱-۱۶۳۲ و ASTM D ۱۷-۱۶۳۳ انجام شده است. جهت عمل‌آوری، پس از ساخت نمونه‌ها به مدت ۱۲ ساعت در اتاق رطوبت نگهداری شدند، سپس با استفاده از جک بیرون‌آورنده از قالب خارج و بعد از آن نمونه‌ها به اتاق رطوبت بازگردانده شدند. به طوری که از وجود کوچکترین قطرات آب بر روی آن‌ها جلوگیری به عمل آمد. پس از پایان مدت عمل‌آوری (۷ روز) نمونه ها از اتاق رطوبت خارج و به مدت ٤ ساعت در آب غوطه ور شدند و سپس آزمایش تعیین مقاومت فشاری بر روی آن‌ها انجام گرفت. آزمایشات با نسبت‌های اختلاط مصالح سنگی لایه‌های روسازی و سیمان با درصدهای ۱، ۳، ۵ و ۷ درصد وزن کل مصالح سنگی انجام گرفت و نتایج مقاومت فشاری ۷ روزه به صورت جدول ۸ و شکل ٤ ارائه شده است.

جدول ۷. نتایج آزمون‌های تعیین مرغوبیت مصالح سنگی

عنوان آزمون		نتایج آزمون
ارزش ماسه‌ای (AASHTO-T176)		۳٤
درصد افت وزنی در مقابل سایش به روش لس انجلس AASHTO T-96	نوع دانه بندی	B
	تعداد دور	۵۰۰
	درصد سایش	۱۹
حدود اتر برگ AASHTO T-89,90	حد روانی (LL)	غیر قابل تعیین
	حد خمیری (PL)	غیر قابل تعیین
	دامنه خمیری (PI)	N.P
درصد شکستگی مصالح سنگی روی الک شماره ٤	در یک جبهه	٦٤
	در دو جبهه	٥٤
درصد تطویل		۲۲
درصد تورق		۲۵
درصد سنگدانه‌های پهن و درازبا نسبت ۱ به ۵		۲
درصد افت وزنی در مقابل سولفات سدیم AASHTO T-104	بخش درشت دانه	۱/۲
	بخش ریز دانه	۱/۵

جدول ۸. نتایج آزمون‌های مقاومت فشاری تک محوری مخلوط مصالح روسازی با درصدهای مختلف سیمان

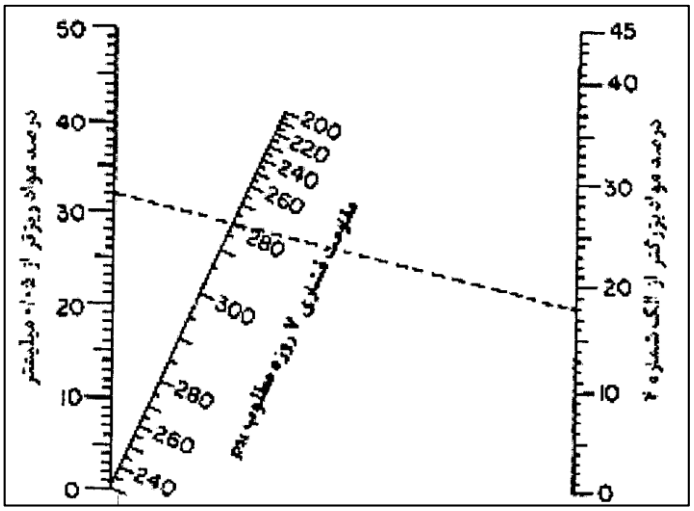
شماره نسبت اختلاط	۱	۲	۳	٤
مقدار سیمان	۱ درصد	۳ درصد	۵ درصد	۷ درصد
مقاومت فشاری ۷ روزه	۱۰/٤	۱۸/۳	۳۰/۳	٤۳/۸



شکل ٤. نمودار مقاومت فشاری مخلوط مصالح روسازی با درصدهای مختلف سیمان

٤-٦- تعیین میزان سیمان

از آنجایی که طبق دستورالعمل تثبیت لایه‌های خاکریز و روسازی راه (شماره ۲٦۸) حداقل مقاومت فشاری قابل قبول خاک‌های تثبیت شده با سیمان بر مبنای نمودار شکل ۵ (برگرفته از شکل ۳-۳ دستورالعمل تثبیت لایه‌های خاکریز و روسازی راه‌ها - نشریه ۲٦۸ سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی کشور) و خط ترسیمی از درصد مواد بزرگتر از الک نمره ٤ و درصد مواد ریز تر از الک ۰/۰۵ میلیمتر تعیین می‌گردد. لذا بر اساس حداقل مقاومت فشاری قابل قبول برای طرح اختلاط مورد بحث ۲۹۲ پوند بر اینچ مربع (۲۰/۵ کیلوگرم بر سانتی متر مربع) حاصل می‌گردد. لازم به ذکر است بر اساس موازین مقاومتی مندرج در نشریه فوق‌الذکر خاک تثبیت‌شده‌ای که درصد سیمان آن براساس آزمایش فشاری تک محوری به دست آمده باشد معمولاً دارای دوام کافی در برابر عوامل جوی خواهند بود. لیکن عکس این مطلب صادق نیست یعنی خاک تثبیت شده‌ای که درصد سیمان آن بر اساس نتایج آزمایش‌های دوام به دست آمده باشد لزوماً دارای حداقل مقاومت قابل قبول نخواهد بود لذا خاکی که درصد سیمان آن بر اساس دوام تعیین شده است اگر پس از عمل آوری به مدت ۷ روز در اتاق مرطوب دارای مقاومت فشاری ۲۰/۵ کیلوگرم برسانتی متر مربع باشد و علاوه بر آن با گذشت زمان به مقاومت آن اضافه شود برای تثبیت با سیمان مناسب است. براین اساس سیمان بهینه برمبنای کسب حداقل مقاومت فشاری ۲۰/۵ کیلوگرم بر سانتی متر مربع تعیین شده‌است.



شکل ۵. حداقل مقاومت فشاری قابل قبول خاک‌های تثبیت شده با سیمان (نشریه ۲٦۸ سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی کشور)

٤-٧- تعیین میزان سیمان انتخابی طرح اختلاط آزمایشگاهی

بر مبنای مقاومت فشاری تعیین‌شده در بند ۵ (۲۹۲ پوند بر اینچ مربع-۲۰/۵ کیلوگرم بر سانتی متر مربع) و با استفاده از نتایج مقاومت فشاری تک محوری نمونه‌های ساخته شده با درصدهای مختلف سیمان با مصالح روسازی موجود و میزان درصد سیمان انتخابی طرح اختلاط آزمایشگاهی برابر ۳/۵ درصد تعیین شده است. با توجه به آزمون‌های انجام پذیرفته حداقل درصد سیمان مورد نیاز جهت کسب حداقل مقاومت فشاری تک محوره ۷ روزه مورد نظر متقاضی (۳۵ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع) طبق نمودار شکل٤ ۵/۷ درصد می‌باشد.

٤-٨-مطالعات ترافیکی محدوده طرح

آمار ترافیکی عبوری اخذ شده که از سایت سازمان راهداری استخراج شده است، که بر اساس ۵ کلاس مختلف به صورت جدول ۹ دسته بندی شده است. برای محاسبه درصد رشد در ابتدا به داده‌های جمع آوری شده از آمار سازمان راه‌داری مراجعه شد. درصد رشد یکی از پارامترهای مهم و تاثیرگذار در مطالعات ترافیک می‌باشد. به صورتی که سال‌های آتی برمبنای درصد رشد ترافیک کنونی محاسبه می‌شود. هرگاه اطلاعات مربوط به جریان ترافیک سال‌های پیشین در اختیار باشد، بر پایه آن می‌توان نرخ حجم ترافیک درسال‌های قبل را تعیین کرد و با طرح افکنی روند گذشته، نرخ رشد ترافیک آتی را بر مبنای قابل قبولی مشخص نمود. در جدول ۱۰ اطلاعات مربوط به متوسط ترافیک عبوری روزانه در سال‌های مختلف در مسیر قم به تهران و بلعکس ارائه شده‌است.

جدول ۹. دسته‌بندی کلاس خودروهای مختلف

کلاس	۱	۲	۳	٤	۵
وسیله نقلیه	سواری و وانت	کامیونت و مینی بوس	کامیون دو و سه محور	اتوبوس	تریلی

جدول ۱۰. اطلاعات مربوط به جریان ترافیک متوسط روزانه در سال‌های مختلف در مسیر قم به تهران و بلعکس

سال	قم-تهران			تهران-قم		
	سنگین	سبک	مجموع	سنگین	سبک	مجموع
۹۱	۳۸۸۸	۳۸٤۸	۷۷۳٦	۱۹۱۰	٤٦۳۷	٦٥٤۷
۹۲	۱۱۸۳	٤۰۳۱	٥۲۱٥	۷۸۲	۲۹۱۸	۳۷۰۰
۹۳	۱۲٦۸	٤۷۷٦	٦۰٤٤	۱۷۱٤	٤٤۹۰	٦۲۰٤
۹٤	۳۸۳۲	۲۰۳٥	٥۸٦۷	۲٤۲۳	٦۲٦۰	۸٦۸۳
۹٥	۱۳۰۳	٤۱۰۹	٥٤۱۲	۱٥۷۹	٥۷٤۲	۷۳۱۲
۹٦	۲۲۰۰	٤۰۷۷	٦۲۷۷	۲٦٦۱	٦۷٦۰	۹٤۲۱
۹۷	۲۲٦٦	٤۱٥۹	٦٤۲٥	۲۷٤۱	٦۸۹٥	۹٦۳٦
۹۸	۲۳۳٤	٤۲٤۲	٦٥۷٦	۲۸۲۳	۷۰۳۳	۹۸٥٦
۹۹	۲٤۰٤	٤۳۲۷	٦۷۳۱	۲۹۰۸	۷۱۷٤	۱۰۰۸۲

داده‌های ترافیکی برای محور قم-تهران و برعکس از سایت سازمان راهداری برداشت شده است. این داده‌ها طی سال‌های ۹۱ تا ۹۹ با فقدان داده در ماه‌های محدودی به‌صورت برخط اندازه‌گیری شده‌اند و در محاسبات درصد رشد از آن‌ها استفاده شده‌است. نتایج حاصل از جداول موید نوسانات شدید ترافیک در سال‌های مختلف بوده‌است، به طوری که نمی‌توان برازش مناسبی بر داده‌های ترافیکی موجود انجام داد و درصد رشد معینی را تعریف‌کرد. در نهایت با توجه به مطالعات اخیر صورت گرفته در این مسیر درصد رشد به صورت جدول۹ ارائه می‌گردد. باتوجه به اینکه در پروژه مذکور قرار به احداث راه جدیدی نبوده

در نهایت ترافیک جذبی از مسیرهای دیگر برای آن‌ها در نظر گرفته‌نشده است و تنها ترافیک عبوری از مسیر شامل ترافیک عبوری بین مسیر قم و تهران می‌گردد. همچنین با توجه به درصد رشد محاسبه شده در جدول۱۱، با در نظرگرفتن رشد ۳ درصد برای وسایل نقلیه سنگین و رشد ۲ درصدی برای وسایل نقلیه سبک، میزان ترافیک متوسط روزانه برای سال‌های آتی بعد از سال ۱۳۹۹ تا ۱۴۰۶ برای دو مسیر قم به تهران و بلعکس، به صورت جداول ۱۲ و ۱۳ پیش‌بینی می‌گردد.

جدول ۱۱. درصد رشد ترافیک سالانه

مسیر	درصد رشد ترافیک (٪)	
	وسیله نقلیه سبک	وسیله نقلیه سنگین
قم-تهران	۲	۳
تهران-قم	۲	۳

جدول ۱۲. میزان ترافیک پیش‌بینی شده متوسط روزانه مسیر برای کلاس‌های مختلف خودروی در مسیر قم به تهران

سال	سواری وانت	کامیونت مینی بوس	کامیون دو و سه محور	اتوبوس	تریلر	مجموع
۱۳۹۹	۳۳۳۱	۹۹۵	۵۷۶	٦٤٠	۱۱۸۸	٦۷۳۰
۱٤۰۰	۳۳۹۸	۱۰۱۵	۵۹۳	٦٦۰	۱۲۲۳	٦۸۸۹
۱٤۰۱	۳٤٦٦	۱۰۳٦	٦۱۱	٦۷۹	۱۲٦۰	۷۰۵۲
۱٤۰۲	۳۵۳۵	۱۰۵٦	٦۲۹	۷۰۰	۱۲۹۸	۷۲۱۸
۱٤۰۳	۳٦۰٦	۱۰۷۷	٦٤۸	۷۲۱	۱۳۳۷	۷۳۸۹
۱٤۰٤	۳٦۷۸	۱۰۹۹	٦٦۸	۷٤۲	۱۳۷۷	۷۵٦٤
۱٤۰۵	۳۷۵۱	۱۱۲۱	٦۸۸	۷٦۵	۱٤۱۸	۷۷٤۳
۱٤۰٦	۳۸۲٦	۱۱٤۳	۷۰۸	۷۸۸	۱٤٦۱	۷۹۲٦
۱٤۰۷	۳۹۰۳	۱۱٦٦	۷۲۹	۸۱۱	۱۵۰۵	۸۱۱٤
۱٤۰۸	۳۹۸۱	۱۱۹۰	۷۵۱	۸۳۵	۱۵۵۰	۸۳۰۷
مجموع	۳٦٤۷۵	۱۰۸۹۸	٦٦۰۱	۷۳٤۱	۱۳٦۱۷	۷٤۹۳۲

جدول ۱۳. میزان ترافیک متوسط روزانه مسیر برای کلاس‌های مختلف خودروی در سال‌های مختلف در مسیر تهران به قم

سال	سواری وانت	کامیونت مینی بوس	کامیون دو و سه محور	اتوبوس	تریلر	مجموع
۱۳۹۹	۵٤٤۵	۱۷۲۹	۸۸۵	٦۹٦	۱۳۲۷	۱۰۰۸۲
۱٤۰۰	۵۵۵٤	۱۷٦۳	۹۱۲	۷۱۷	۱۳٦٦	۱۰۳۱۲
۱٤۰۱	۵٦٦۵	۱۷۹۹	۹۳۹	۷۳۸	۱٤۰۷	۱۰۵٤۸
۱٤۰۲	۵۷۷۸	۱۸۳۵	۹٦۷	۷٦۱	۱٤۵۰	۱۰۷۹۱
۱٤۰۳	۵۸۹٤	۱۸۷۱	۹۹٦	۷۸۳	۱٤۹۳	۱۱۰۳۷
۱٤۰٤	٦۰۱۲	۱۹۰۹	۱۰۲٦	۸۰۷	۱۵۳۸	۱۱۲۹۲
۱٤۰۵	٦۱۳۲	۱۹٤۷	۱۰۵۷	۸۳۱	۱۵۸٤	۱۱۵۵۱
۱٤۰٦	٦۲۵۵	۱۹۸٦	۱۰۸۹	۸۵٦	۱٦۳۲	۱۱۸۱۸
۱٤۰۷	٦۳۸۰	۲۰۲۵	۱۱۲۱	۸۸۲	۱٦۸۰	۱۲۰۸۸
۱٤۰۸	٦۵۰۷	۲۰٦٦	۱۱۵۵	۹۰۸	۱۷۳۱	۱۲۳٦۷
مجموع	۵۹٦۲۲	۱۸۹۳۰	۱۰۱٤۷	۷۹۷۹	۱۵۲۰۸	۱۱۱۸۸٦

با استفاده از داده‌های جداول ۱۲ و ۱۳ میزان بار هم ارز روسازی برای مسیر تهران-قم و بلعکس به صورت جداول ۱۴ و ۱۵ محاسبه گردید. بر این اساس بیشترین بار هم ارز برای مجموع ترافیک ۱۰ ساله در محدوده تهران به قم با مقدار ۳۹۸۴۸۷۳۵ خودرو پیش‌بینی و محاسبه شده است و ملاک طراحی ضخامت لایه‌های روسازی قرار گرفته است.

جدول ۱۴. میزان بار هم ارز روسازی برای کلاس‌های مختلف خودرو و ترافیک ۱۰ ساله در مسیر تهران به قم

کلاس	نوع وسیله نقلیه	خالی یاپر بودن	ضریب بار هم ارز	مجموع ترافیک ۱۰ ساله	بار هم ارز
کلاس۱	سواری	-	۰,۰۰۱۳۴	۸۷۰۴۷۹۳	۱۱۶۶۴
	وانت	-	۰,۰۰۷۳۳	۸۷۰۴۷۹۳	۶۳۸۰۶
کلاس ۲	مینی بوس	-	۰,۰۵۴۸	۲۷۶۳۶۱	۱۵۱۴۵
	کامیون دو محور سبک	پر	۱,۷۸۶۴	۳۹۳۸۱۵۱	۷۰۳۵۱۱۳
		خالی	۰,۲۰۱۴	۱۳۱۲۷۱۷	۲۶۴۳۸۱
کلاس۳	کامیون دو محور سنگین	پر	۶,۸۹۹۴	۲۰۷۲۷۱۱	۱۴۳۰۰۴۶۳
		خالی	۰,۳۶۱۸	۶۹۰۹۰۴	۲۴۹۹۶۹
	کامیون سه محور	پر	۳,۳۴۴۴	۱۱۱۱۰۷۳	۳۷۱۵۸۷۱
		خالی	۰,۲۱۲۲۸	۳۷۰۳۵۸	۷۸۶۱۹
کلاس۴	اتوبوس	-	۰,۳۶۱۸	۲۳۳۰۰۵۲	۸۴۳۰۱۳
کلاس۵	تریلی ۵ محور	پر	۳,۶۱۹۲	۱۶۶۵۲۳۷	۶۰۲۶۸۲۶
		خالی	۰,۳۲۷۸۳	۵۵۵۰۷۹	۱۸۱۹۷۲
		پر	۴,۰۶۸۶	۱۶۶۵۲۳۷	۶۷۷۵۱۸۴
		خالی	۰,۵۱۶۵۲	۵۵۵۰۷۹	۲۸۶۷۰۹
مجموع					۳۹۸۴۸۷۳۵

جدول ۱۵. میزان بار هم ارز روسازی برای کلاس‌های مختلف خودرو و ترافیک ۱۰ ساله در مسیر قم به تهران

کلاس	نوع وسیله نقلیه	خالی یاپر بودن	ضریب بار هم ارز	مجموع ترافیک۱۰ ساله	بار هم ارز
کلاس۱	سواری	-	۰,۰۰۱۳۴	۵۳۲۵۳۴۵	۷۱۳۶
	وانت	-	۰,۰۰۷۳۳	۵۳۲۵۳۴۵	۳۹۰۳۵
کلاس ۲	مینی بوس	-	۰,۰۵۴۸	۱۵۹۱۳۳	۸۷۲۰
	کامیون دو محور سبک	پر	۱,۷۸۶۴	۲۲۶۷۶۴۰	۴۰۵۰۹۱۲
		خالی	۰,۲۰۱۴	۷۵۵۸۸۰	۱۵۲۲۳۴
کلاس۳	کامیون دو محور سنگین	پر	۶,۸۹۹۴	۱۱۹۳۴۹۵	۸۲۳۴۳۹۸
		خالی	۰,۳۶۱۸	۳۹۷۸۳۲	۱۴۳۹۳۵
	کامیون سه محور	پر	۳,۳۴۴۴	۷۲۲۸۸۳	۲۴۱۷۶۱۰
		خالی	۰,۲۱۲۲۸	۲۴۰۹۶۱	۵۱۱۵۱
کلاس۴	اتوبوس	-	۰,۳۶۱۸	۲۱۴۳۵۰۱	۷۷۵۵۱۹
کلاس۵	تریلی ۵ محور	پر	۳,۶۱۹۲	۱۴۹۱۰۳۲	۵۳۹۶۳۴۳
		خالی	۰,۳۲۷۸۳	۴۹۷۰۱۱	۱۶۲۹۳۵
		پر	۴,۰۶۸۶	۱۴۹۱۰۳۲	۶۰۶۶۴۱۲
		خالی	۰,۵۱۶۵۲	۴۹۷۰۱۱	۲۵۶۷۱۶
مجموع					۲۷۷۶۳۰۵۶

٤-٩-مطالعات طرح روسازی

ظرفیت باربری روسازی راه با توجه به رابطه ۱ کنترل می‌گردد.

$$LogW_{8.2} = Z_R S_0 + 9.36\,Log(SN+1) - 0.2 + \frac{Log\left(\frac{\Delta PSI}{4.2-1.5}\right)}{0.4+\frac{1094}{(SN+1)^{5.19}}} + 2.3\,Log\left(\frac{M_r}{15}\right) - 8.07$$

که در این معادله W8.2: تعداد کل بارهای محوری ساده ۸/۲ تنی هم ارز پیش بینی شده در عمر روسازی، Z_R: انحراف معیار نرمال، S0: انحراف معیار کلی پیش بینی ترافیک و عملکرد روسازی، SN: عدد ضخامت روسازی، ΔPSI: افت نشانه خدمت دهی و Mr: ضریب برجهندگی خاک بستر روسازی یا ضریب ارتجاعی مصالح اساس یا زیراساس می‌باشد.

عدد ضخامت SN به صورت رابطه ۲ ارائه می‌شود:

$$SN = \frac{1}{2.5}(a_1 D_1 + a_2 m_2 D_2 + a_3 m_3 D_3)$$

که در این معادله a_1، a_2 و a_3 به ترتیب ضریب قشر لایه آسفالت، اساس تثبیت شده با سیمان و زیر اساس می‌باشند.

جدول ١٦. ضخامت لایه‌های پیشنهادی

لایه	ضخامت (سانتی‌متر)
آسفالت	۹
اساس تثبیت شده با سیمان	۲۵
زیراساس	۳۰

جدول ١٧. پارامترهای طراحی

پارامتر های طراحی	مقدار
R	۹۰
Zr	-۱/۲۸۲
Pt	۲/۵
Mr	۱۱۹۰
ضریب موثر قشر زیراساس	۰/۰۹
ضریب قشر اساس تثبیت شده با سیمان	۰/۲
ضریب قشر اسفالت	۰/٤٤
ضرایب زهکشی لایه اساس و زیر اساس	۱

پارامترهای D_1، D_2 و D_3 به ترتیب ضخامت لایه‌های آسفالت، اساس تثبیت شده با سیمان و زیر اساس می‌باشند.

بر اساس ضخامت لایه‌های پیشنهادی (جدول ١٦) برای لایه‌های اساس تثبیت شده باسیمان وآسفالت به محاسبه بار قابل تحمل توسط طرح پیشنهادی پرداخته‌شده‌است. در جدول ۱۷ پارامترهای مورد نیاز برای محاسبه ظرفیت باربری روسازی پیشنهادی ارائه شده‌است. باتوجه به ضخامت لحاظ شده، مقدار بار قابل تحمل با استفاده از رابطه ۱ برابر ۵۹ میلیون محور هم ارز استاندارد به دست آمده‌است که مقدار آن از مقدار بار ترافیکی وارده محاسبه شده در بخش قبل (٤٠ میلیون محور هم ارز) بیشتر می‌باشد. بنابراین طرح روسازی پیشنهادی جوابگوی بار ترافیکی مسیر می‌باشد. با توجه به طراحی ارائه شده جزییات مقطع عرضی روسازی شامل ٤ سانتیمتر لایه رویه، ۵ سانتیمتر لایه آستر (بیندر) به صورت رگلاژی، ۲۵ سانتیمتر تثبیت لایه‌های موجود به صورت درجا به وسیله‌ی سیمان با استفاده از ماشین بازیافت درجا (WR) با تراکم حداقل ۹۸ درصد و مقاومت فشاری تک محوری ۷ روزه برابر ۳۵ کیلوگرم بر سانتی متر مربع و ۳۰ سانتیمتر لایه زیراساس می‌باشد.

۵- نتیجه‌گیری

در مقاله حاضر به بررسی خرابی‌های موجود، تحلیل ترافیک عبوری و نتایج آزمایشگاهی مربوطه و ارائه راهکار مربوط به محور قم-تهران پرداخته شد. طبق مطالعه انجام شده، با توجه به اینکه اجرای روش دوم (تثبیت روسازی موجود باسیمان) خللی در جریان ترافیک عبوری به وجود نمی‌آورد و همچنین با توجه به استفاده از مصالح موجود، که خود باعث کاهش هزینه‌های ترمیم و بهسازی می‌گردد، لذا این گزینه به عنوان گزینه پیشنهادی ارائه گردید. به توجه به آزمایشات تک محوری انجام پذیرفته حداقل میزان سیمان مورد نیاز جهت کسب حداقل مقاومت فشاری تک محوره ۷ روزه مورد نظر (۳۵ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع) ۷/۵ درصد طبق آزمایشات طرح اختلاط انجام گرفته بدست آمد. با توجه به مطالعات طرح روسازی و ترافیک انجام گرفته مقدار بار قابل تحمل برابر ۵۹ میلیون محور هم ارز استاندارد به دست آمده است که مقدار آن از مقدار بار ترافیکی وارده (۵۰ میلیون محور هم ارز) بیشتر می‌باشد. بنابراین طرح روسازی پیشنهادی جوابگوی بار ترافیکی مسیر می‌باشد. تثبیت لایه‌های موجود به ضخامت ۲۵ سانتیمتر به صورت درجا به وسیله‌ی سیمان با استفاده از ماشین

بازیافت درجا با تراکم حداقل ۹۸ درصد و مقاومت فشاری تک محوری ۷ روزه برابر ۳۵ کیلوگرم بر سانتی متر مربع انجام گرفت.

٦-سپاسگزاری

از شهرداری قم و معاونت فنی و عمرانی شهرداری قم و آقای مهندس طاهری سپاسگزاری می‌گردد.

۷- مراجع

-Alarcón, J., M. Jiménez and R. Benítez (2020). Stabilization of soils through the use of oily sludge. *Revista ingeníera de construcción,* 35(1): 5-20.

-Aniroot, S. and H. Suksun (2023). Evaluation of cement stabilized recycled asphalt pavement/lateritic soil blends for soft soil improvement. *Rock and Soil Mechanics* 43(12): 6-7.

-Ayar, P. (2018). Effects of additives on the mechanical performance in recycled mixtures with bitumen emulsion: An overview. *Construction and Building Materials,* 178: 551-561.

-Baroughi, M. Z., A. H. Rezaei and H. Katebi (2020). Influence of "Nicoflok" Polymer-Mineral with Portland Cement on Granular Soils and Recycled Asphalt Material. *The Baltic Journal of Road and Bridge Engineering,* 15(5): 94-117.

-Bocci, E., A. Graziani and M. Bocci (2020). Cold in-place recycling for a base layer of an Italian high-traffic highway. *Proceedings of the 5th International Symposium on Asphalt Pavements & Environment (APE),* 5, Springer.

-Chhabra, R. S., G. D. Ransinchung and S. S. Islam (2021). Performance analysis of cement treated base layer by incorporating reclaimed asphalt pavement material and chemical stabilizer. *Construction and Building Materials,* 298: 123866-123867.

-Fang, X., A. Garcia-Hernandez and P. Lura (2016). Overview on cold cement bitumen emulsion asphalt. *RILEM Technical Letters,* 1: 116-121.

-Golchin, B. and M. Rabbi (2020). Evaluation of the Technical Properties of Asphalt Mixtures Containing Reclaimed Asphalt Pavement and Sasobit. *Journal of Transportation Research,* 17(2): 187-198.

-Gu, F., W. Ma, R. C. West, A. J. Taylor and Y. Zhang (2019). Structural performance and sustainability assessment of cold central-plant and in-place recycled asphalt pavements: A case study. *Journal of Cleaner Production,* 208: 1513-1523.

-Jin, D., D. Ge, S. Chen, T. Che, H. Liu, L. Malburg and Z. You (2021). Cold in-place recycling asphalt mixtures: Laboratory performance and preliminary ME design analysis. *Materials,* 14(8): 2036.

-Kasu, S. R., K. Manupati and A. R. Muppireddy (2020). Investigations on design and durability characteristics of cement treated reclaimed asphalt for base and subbase layers. *Construction and Building Materials,* 252: 119102.

-Li, Y., C. Luo, K. Ji, H. Zhang and B. Sun (2024). Laboratory Evaluation of Strength Performance of Full-Depth Reclamation with Portland Cement Material. *Coatings,* 14(5): 573-574.

-Ling, C., A. Hanz and H. Bahia (2014). Evaluating moisture susceptibility of cold-mix asphalt. *Transportation Research Record,* 2446(1): 60-69.

-Modarres, A., M. Rahimzadeh and M. Zarrabi (2014). Field investigation of pavement rehabilitation utilizing cold in-place recycling. *Resources, Conservation and Recycling* 83: 112-120.

-Moon, B., A. Bozorgzad, H. Lee, S.-A. Kwon, K.-D. Jeong and N.-J. Cho (2021). Development of warm in-place recycling technique as an eco-friendly asphalt rehabilitation method. *Infrastructures,* 6(7): 101-102.

-N. Samariya, M. C. a. B. N. (2019). An Experimental Study on Cost Optimization of Cold-in-Place Recycling Technique. *International Journal for Research in Applied Science & Engineering Technology (IJRASET),* 7(I).

-Nanjegowda, V. H. and K. P. Biligiri (2020). Recyclability of rubber in asphalt roadway systems: A review of applied research and advancement in technology. *Resources, Conservation and Recycling* 155: 104655.
-Sabouri, M. and D. E. Wegman (2023). Performance evaluation of cold in-place recycling materials through a simple semi-circular bending test. *Road Materials and Pavement Design,* 24(4): 1158-1172.
-Sorociak, W. and M. Dobrzyński (2023). Optimisation of weak soil stabilisation with a hydraulic binder for road construction subgrade. *Architecture, Civil Engineering, Environment,* 16(3): 111-115.
-Taziani, E. A., E. Toraldo, F. Giustozzi and M. Crispino (2016). Investigation on the combined effect of fibers and cement on the mechanical performance of foamed bitumen mixtures containing 100% RAP. *Advances in Materials Science and Engineering,* 2016(1): 4894351.
-Xiao, F., S. Yao, J. Wang, X. Li and S. Amirkhanian (2018). A literature review on cold recycling technology of asphalt pavement. *Construction and Building Materials,* 180, 579-604.
-Yan, J., Z. Leng, F. Li, H. Zhu and S. Bao (2017). Early-age strength and long-term performance of asphalt emulsion cold recycled mixes with various cement contents. *Construction and Building Materials,* 137, 153-159.

Design of Flexible Pavement Using Recycled Surface and Cement-Stabilized base with the Use of WR2000 Machine (Case Study: Qom City)

Mohammad Hosein Dehnad, Assistant Professor, Department of Civil Engineering, University of Qom, Qom, Iran.

Mohsen Karimian, Ph.D., Student, Department of Civil Engineering, University of Qom, Qom, Iran.

Abolfazal Kheiyrkhah, M.Sc., Student, Department of Civil Engineering, University of Qom, Qom, Iran.

Mehdi Hodaie, B.Sc., Grad., Department of Civil Engineering, University of Qom, Qom, Iran.

E-mail: m.dehnad@qom.ac.ir

Received: May 2025- Accepted: August 2025

ABSTRACT

As a consequence of vehicular traffic and various forms of damage, the enhancement and repair of asphalt pavements have become imperative. Cold in-situ recycling (CIR) has emerged as a contemporary method for the improvement and repair of pavements, gaining popularity in recent years. This technique not only mitigates the substantial annual expenses associated with the provision of machinery and materials in urban settings but also minimizes the disruption to traffic flow on the affected roadways. Nevertheless, layers of recycled asphalt pavement (RAP) often encounter challenges such as raveling, stripping, low initial strength, and prolonged curing times. To address these issues, a range of additives and stabilizing agents, including lime, cement, bitumen emulsion, and recycled materials such as cement kiln dust (CKD), fly ash (FA), and recycled concrete sand (RCS) can be employed. This study presents a laboratory investigation aimed at determining the uniaxial compressive strength of RAP and base material samples, incorporating varying percentages of cement as a stabilizing agent. The optimal cement percentage required to achieve the target design strength of 35 kg/cm² was identified as 7.5%. Furthermore, this research examined the pavement design and enhancement of Khodakaram Boulevard in Qom, utilizing the WR device alongside the established optimal cement content. The WR device facilitates rapid paving and compaction of stabilized soil while allowing precise adjustments to the thickness and width of the pavement. This method not only provides the necessary strength and reducing existing asphalt damage but also extends the service life of the pavement compared to alternative techniques. Additionally, its implementation of this method does not disrupt the flow of traffic and contributes to a reduction in repair and improvement costs.

Keywords: Rehabilitation and Stabilization, CIR, WR Machine, Cement, RAP