روشی برای طرح اختلاط و بهینه‌سازی مخلوط های آسفالت بازیافتی امولسیونی

سید محمود دیباج، کارشناس ارشد، شرکت اندیشه نگاران کیا، تهران، ایران
امیر کاووسی(مسئول مکاتبات)، دانشیار، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران
E-mail: kavussia@modares

دریافت: ۹۱/۰۵/۱۵ پذیرش:۹۱/۱۲/۰۸

چکیده

بازیافت سرد درجای آسفالت با قیر امولسیون در نقاط مختلف دنیا به اجرا در آمده است. اما به دلیل تنوع مواد، مصالح و روشهای اجرا، روش طراحی استانداردی در این زمینه از سوی موسسات استاندارد ارایه نشده است. در این مقاله بر اساس نتایج یک کار تحقیقاتی آزمایشگاهی و صحرایی، روش طراحی مارشال اصلاح شده، مورد بررسی قرار گرفته و پس از شناسایی نقاط ضعف و قوت آن، روشی بهینه ارایه شده است. در روش مارشال اصلاح شده از آزمایشهای وزن مخصوص حقیقی و حداکثر وزن مخصوص و در روش پیشنهادی از آزمایشهای مارشال و کشش غیر مستقیم (در دو حالت خشک و اشباع) و برای دو نوع فیلر مجزا (سیمان و آهک) استفاده شد. نتایج ارزیابی آزمایشگاهی به روش مارشال اصلاح شده نشان داد که برای استفاده از آن در کشور اصلاحاتی در این روش مورد نیاز است. مقایسه روش مارشال اصلاح شده و روش پیشنهادی نشان داد که روش مارشال اصلاح شده، درصد قیر امولسیون بهینه بیشتری نتیجه می دهد، در حالی که خصوصیات مخلوط در درصد قیر امولسیون بهینه به روش پیشنهادی تا اندازه قابل توجهی از مخلوطهای مشابه طراحی شده به روش مارشال اصلاح شده بهتر است.

واژه‌های کلیدی: بازیافت سرد درجا، قیر امولسیون، آهک، سیمان، طرح اختلاط آسفالت سرد بازیافتی

۱. مقدمه

یکی از روشهای بازیافت، بکارگیری قیر امولسیون و بازیافت روسازی به صورت سرد درجاست. بازیافت سرد درجا با استفاده از قیر امولسیون در نقاط مختلف دنیا به اجرا در آمده، اما به دلیل تنوع مواد، مصالح و همچنین روشهای اجرا، روش طراحی استاندارد شده‌ای در این زمینه ارایه نشده است[Gallivan, , 2011; MS-21, 1986]، به طوری که موسسات مختلف با توجه به تجارب قبلی خود و با استفاده از نتایج مطالعات تحقیقاتی و آزمایشگاهی به ارایه روش طراحی مخلوطهای آسفالت بازیافتی سرد پرداخته‌اند. از متداول‌ترین روشهای طراحی، روش مارشال اصلاح شده است. در کشور ما نیز از همین روش برای طراحی مخلوطهای سرد بازیافتی با قیر امولسیون استفاده می‌شود. اما برخی پارامترهای طراحی در این روش مطابق با شرایط ایران و یا استانداردهای موجود نیست.

در این پژوهش با توجه به تحقیقات انجام گرفته بر روی مخلوطهای سرد بازیافتی با قیر امولسیون، این نوع مخلوطها بر اساس آزمایشهای متفاوتی شامل: آزمایش مقاومت مارشال، کشش غیر مستقیم در شرایط خشک و اشباع و همچنین آزمایش حساسیت در برابر رطوبت (نسبت مقاومت کششی اشباع به خشک) انجام شده است.

۲. طراحی مخلوطهای سرد بازیافتی امولسیونی

روشهای طراحی مخلوطهای سرد بازیافتی با قیر امولسیون به دو روش آزمایشگاهی و تجربی تقسیم‌بندی می‌شوند. روشهای آزمایشگاهی از آزمایشهای متفاوتی شامل: آزمایش مقاومت مارشال (روش اونتاریو[1])، آزمایش مقاومت ویم (روش ویم اصلاح شده و روش کالیفرنیا[2])، مدول ارتجاعی (روش چورون[3] و روش اورگون[4])، آزمایش وزن مخصوص (روش مارشال اصلاح شده)، آزمایش کشش غیر مستقیم، نسبت مقاومت کششی اشباع به خشک (روش طراحی[5]) و نسبت مدول ارتجاعی در شرایط مرطوب به خشک (روش پنسیلوانیا[6]) استفاده می‌کنند [Sule- man, 2002]. در ایران بر اساس توصیه نشریه ۳۳۹ سازمان مدیریت از روش مارشال اصلاح شده برای طراحی مخلوطهای سرد بازیافتی با قیر امولسیون استفاده می‌شود [Management and Planning Org. Pub. 339].

۲-۱ روش مارشال اصلاح شده

در این روش، طراحی مخلوط به نحوی انجام می‌شود که مقدار کل رطوبت آن از ٪۳ تجاوز نکند (درصد آب امولسیون، درصد آب موجود در خرده آسفالت و درصد آب اضافه شده به مخلوط). نمونه‌ها با ۵۰ ضربه چکش مارشال متراکم می‌شوند. نمونه‌های متراکم شده به مدت ٦ ساعت در دمای ٦۰ درجه سانتیگراد و سپس به مدت ۱۲ ساعت در محیط آزمایشگاه عمل‌آوری می‌شوند. پس از آن برای تعیین وزن مخصوص، مقاومت مارشال و روانی در ٦۰ درجه سانتیگراد قرار داده می‌شوند. وزن مخصوص حداکثر در مقدار قیر امولسیون بهینه تعیین و سرانجام نمونه‌های حاوی قیر امولسیون بهینه برای مقادیر مختلف درصد آب تهیه می‌شوند (مانند٪۲، ٪۵/۲، ٪۳، ٪۵/۳ و ٪٤). مقدار فضای خالی برای هر درصد رطوبت تعیین می‌شود. پارامترهای طراحی شامل حداقل و حداکثر فضای خالی طراحی به ترتیب ٪۹ و ٪۱٤ است [Sule- man, 2002; MS-21, 1986].

روش مارشال اصلاح شده دارای برخی اشکالات است، به طوری که علاوه بر ابهامات موجود در این روش، این روش با مصالح و شرایط ایران نیز همخوانی ندارد:

الف- روش مارشال اصلاح شده، استانداردی برای استفاده از مصالح جدید ارایه نمی‌کند [Lee, 2003].

ب- در این روش، از مصالح خرده آسفالتی عبوری از الک ۲۵ میلیمتر استفاده می‌شود، که معمولاً با دانه‌بندی میدانی خرده آسفالت متفاوت است. آزمایشها نشان می‌دهند که تغییر در دانه‌بندی مصالح نمونه‌ها (کاهش مصالح درشت دانه) منجر به تغییر در خصوصیات مخلوط شده و نمونه‌های حاوی درصد بیشتر مصالح درشت دانه تطابق بیشتری با شرایط میدانی دارند [Kavussi et al, 2007].

ج- مقدار مصالح نمونه ها ۱۱۵۰ گرم است که برای تهیه نمونه

ها با ارتفاع استاندارد مارشال، بسیار زیاد است [Lee, 2003].

د- مقدار کل رطوبت موجود در مخلوط بازیافتی بایستی از ٪۳ تجاوز نکند. در صورتی که برخی روشهای طراحی آزمایش اندود را پیشنهاد می‌کنند. علاوه بر این، آزمایشهای انجام گرفته نشان می‌دهند، مقدار فوق ممکن است در نقاط مختلف با توجه به نوع مصالح مورد استفاده تغییر کند [Kavussi et al. 2007].

ه- محاسبه وزن مخصوص در روش مارشال اصلاح شده مشابه روش ارایه شده برای آسفالت گرم (بند۹-۲ استاندارد، ۲۷۲٦ASTM-D) است، در صورتیکه نمونه‌ها در این روش رطوبت دارند و وزن مخصوص آنها براساس بند ۹-۱ استاندارد ۲۷۲٦ASTM-D محاسبه می شوند [Kavussi et al, 2007].

و- وزن مخصوص در روش مارشال اصلاح شده با استفاده از استاندارد ۲۷۲٦ASTM-D تعیین می شود. اما جذب آب در برخی نمونه‌های بازیافتی بیش از حد مجاز ٪۲ است. در این نمونه‌ها بهتر است تعیین وزن مخصوص مطابق با استاندارد ۱۱۸۸ASTM-D صورت گیرد [Kavussi et al, 2007].

ز- در روش مارشال اصلاح شده نحوه تعیین درصد قیر بهینه به طور واضح بیان نشده است. به طوری که مقاومت مارشال و روانی نمونه‌ها تعیین می‌شود، ولی محدوده‌های مجاز برای این دو پارامتر مشخص نشده است. علاوه بر این، هیچکدام از خصوصیات مخلوط طراحی شده شامل: مقاومت در برابر شیارشدگی، مقاومت در برابر ترکهای حرارتی و حساسیت در برابر رطوبت (عریان شدگی) در کوتاه مدت و بلند مدت در این روش مورد بررسی قرار نمی‌گیرد.

ح- این روش در استفاده از فیلرهای مختلف در طراحی مخلوطهای سرد بازیافتی، ضوابطی ارایه نکرده است.

ط- در این روش ضابطه ای برای استفاده از انواع قیرهای امولسیون ارایه نشده است.

۲-۲ تحقیقات و مطالعات طراحی مخلوطهای سرد بازیافتی با قیر امولسیون

با توجه به مشکلات روش مارشال اصلاح شده، روش پیشنهادی مجمع احیاء و بازیافت آسفالت[۷] و دیگر تحقیقات، برخی از معایب روش مارشال اصلاح شده را اصلاح و پیشنهاداتی را برای بهبود طراحی مخلوطهای سرد بازیافتی ارایه کرده اند که به طور خلاصه در زیر تشریح می شود.

۲-۲-۱ روش مجمع احیاء و بازیافت آسفالت

در این روش پس از تعیین خصوصیات خرده آسفالت و انتخاب نوع افزودنی مناسب، درصد رطوبت مورد نیاز برای اندود مصالح تعیین می‌شود. آزمایش اندود با اختلاط ۱۰۰۰ گرم خرده آسفالت، در درصد قیر امولسیونی تخمین زده شده و درصد رطوبتهای متفاوت انجام می‌گیرد. نحوه پوشش مصالح با قیر امولسیونی بررسی شده و حداقل درصد رطوبت که پس از آن تغییری در بهبود اندود مصالح ایجاد نگردد، درصد رطوبت بهینه است[ARRA, 2001].

نمونه‌ها مطابق با دانه‌بندی خرده آسفالت با اختلاط ۱۱۰۰ گرم مصالح، آب و قیر امولسیون تهیه می‌شوند. تراکم نمونه‌ها با ۵۰ یا ۷۵ ضربه مارشال انجام می‌گیرد. عمل‌آوری نمونه‌ها را می‌توان در دو حالت عمل‌آوری کوتاه مدت (۲ تا ٤ ساعت در ٦۰ درجه سانتیگراد) و عمل‌آوری بلند مدت (در ۱۱۰ درجه سانتیگراد و تا زمانی که وزن نمونه‌ها ثابت شود) انجام داد. انجام هر یک از آزمایشهای مقاومت مارشال، ویم، مقاومت فشاری، مقاومت کششی غیر مستقیم و نعیین مدول ارتجاعی در این روش پیشنهاد می‌شود. روش پیشنهادی در تعیین مقدار قیر امولسیون بهینه، انتخاب درصد قیری است که در آن یک یا چند شاخص فوق بهینه گردد. همچنین نسبت مقاومت کششی نمونه‌های اشباع شده به نمونه های خشک نیز در این روش بیش از ٪۷۰ تا ٪۸۰ تعیین شده است [ARRA, 2001].

۲-۲-۲ افزودنی‌های مورد استفاده

انواع قیرهای مورد استفاده در بازیافت سرد درجا شامل قیرهای امولسیونی (آنیونی و کاتیونی) و کف قیر هستند. استفاده از قیر امولسیون به علت کاربرد آسان، مستقیم و بدون بکارگیری گرما

نسبت به کف قیر دارای مزیت است، اما از معایب این روش گران بودن و نیاز به زمان برای عمل آوری در مقایسه با کف قیر است[Lewis et al. 1999].

در روش انستیتو آسفالت برای دانه‌بندی خرده آسفالت و مصالح جدید استانداردی ارایه شده که بر اساس دانه بندی مصالح، نوع قیر امولسیون و درجه آن تعیین می شود[MS-21, 1986].

بیکر و همکاران[8] تأثیر دو نوع قیرامولسیون HF[4] و ۱- CSS را با کمک آزمایشهای پروکتر و مارشال مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد که پوشش مصالح سنگی در رطوبت بهینه در هنگام استفاده از قیرامولسیون نوع ۱- CSS بسیار بهتر از قیرامولسیون HF است. به این ترتیب که مقاومت مارشال و چگالی به دست آمده از نمونه‌های حاوی قیر ۱- CSS بیشتر از نمونه‌های حاوی قیر امولسیون HF است [Baker, 2000].

هودکینسون و ویسر[10] اثر فیلرهای فعال و غیرفعال را در مخلوطهای سرد بازیافتی با قیرامولسیون ارزیابی کردند. نتایج نشان داد که استفاده از فیلرهای غیر فعال مانند: فیلر دولومیتی، تأثیری در مقاومت ITS خشک و اشباع مخلوط ندارد و مخلوطهای حاوی فیلر فعال بیشترین مقاومت ITS را در شرایط خشک دارند. به‌طور کلی، استفاده از فیلرهای فعال (نظیر سیمان، آهک و خاکستر بادی) و یا فیلرهای غیرفعال (مانند فیلر دولومیتی) باعث بهبود مقاومت ITS می‌شود که مقدار آن در مورد فیلرهای فعال بسیار بیشتر است [Hodgkinson and Visser, 2004].

تحقیقات لوییس و کاینکر[11] نشان داد که استفاده از سیمان و قیرامولسیون، مقاومت مارشال و ITS در شرایط خشک و اشباع را بیش از ۲ برابر افزایش می‌دهد [Lewis et al. 1999].

۲-۲-۳ آزمایشهای مورد استفاده و معیارهای طراحی

هودکینسون و ویسر برای بررسی اثر فیلرهای فعال و همچنین جنکینز و همکاران برای تعیین درصد قیر بهینه در مخلوطهای سرد بازیافتی از آزمایش ITS خشک و مرطوب استفاده کردند[Hodgkinson and Visser, 2004]. لوییس و کالینگز نیز برای مقایسه خصوصیات مخلوطهای سرد بازیافتنی با کف قیر و قیر امولسیون از آزمایشهای ITS در شرایط خشک و مرطوب، مارشال، مقاومت فشاری و تعیین مدول ارتجاعی استفاده کردند [Lewis et. al. 1999].

فورسبرگ و همکاران[12] برای طراحی مخلوطهای سرد بازیافتی از چهار آزمایش استفاده کرده و از آزمایش ITS برای تعیین مقاومت مخلوط در برابر ترکهای حرارتی بهره بردند. همچنین در این تحقیق از آزمایشهای شن‌زدگی، مارشال و تعیین مقاومت در برابر حساسیت رطوبتی برای تعیین طرح اختلاط استفاده شد[Forsberg et al. 1999].

پرز و همکاران[13] و مارتینز و همکاران[14] به منظور طراحی مخلوطهای سرد بازیافتی از آزمایش ITS و نسبت ITS اشباع به خشک استفاده کردند[Martinez, 2007]. توماس و کادرمانی[15] از چهار آزمایش شن‌زدگی، ITS، حساسیت در برابر رطوبت و مارشال برای بررسی عملکرد و خصوصیات مخلوطهای سرد بازیافتی استفاده کردند [Perez, 2004 and Thomas, 2003].

لوییس و کالینگز هم در کار تحقیقاتی خود تنها محدوده‌هایی را برای قیر امولسیون و سیمان آوردند[Lewis, et. al. 1999]. پرز و همکاران در طراحی مخلوطهای سرد بازیافتی و تعیین قیر امولسیون بهینه تنها به پارامتر حداکثر مقدار مقاومت کششی غیر مستقیم بسنده کردند. البته محققین مزبور برای طراحی اولیه حداقل مقاومت باقیمانده را حدود ٪۷۵ در نظر گرفتند[Perez, 2004]. سانتاگاتا و چیپینلی[16] در پروژه تحقیقاتی خود برای طراحی مخلوطهای سرد بازیافتی با قیر امولسیون از معیار طراحی ارایه شده توسط آیین نامه ایتالیا استفاده و حداقل مقاومت کششی غیر مستقیم را ۲۰۰ کیلو نیوتن بر میلیمتر مربع تعیین کردند[Santagata, 2004]. مارتینز و همکاران در پروژه پژوهشی خود یکی از معیارهای طراحی مخلوط های سرد بازیافتی را نسبت مقاومت کششی غیرمستقیم بیشتر از ٪۷۵ قرار دادند [Martinez et al., 2007]

۲-۳ روش طراحی پیشنهادی در این تحقیق

در این تحقیق پس از نمونه‌برداری از خرده آسفالت، دانه بندی (با

الکهای ۳۷/۵، ۲۵، ۱۹، ۱۲/۵، ۹/۵، ٤/۷۵، ۲/۳٦، ۰/۳۰ و ۰/۰۷۵ میلیمتر)، درصد رطوبت، درصد قیر و خصوصیات مصالح سنگی تراشه آسفالت تعیین شد. بر اساس دانه بندی مصالح، نوع قیر امولسیون و همچنین درصد رطوبت اولیه به کمک آزمایش اندود تعیین گردید. نمونه های ۱۰۰۰ گرمی با قیر امولسیون ٪۱، ٪۲، ٪۳، ٪٤ و ٪۵ با اعمال ۵۰ ضربه چکش مارشال تهیه و پس از عمل آوری در ٦۰ درجه سانتیگراد در ٦ ساعت، به مدت ۲٤ ساعت نیز در دمای محیط قرار گرفتند. در این روش درصد قیر امولسیون بهینه بر اساس مقاومت مارشال، مقاومت کششی غیر مستقیم در شرایط خشک، اشباع و نسبت اشباع به خشک تعیین شد [Marshall et. al. 2009]. بر اساس مطالعات انجام شده، معیارهای طراحی به شرح جدول ۱ است.

۳. طراحی مخلوط سرد بازیافتی با قیر امولسیون

طراحی براساس دو روش مارشال اصلاح شده (نشریه ۳۳۹ سازمان مدیریت) و روش طراحی پیشنهادی در این تحقیق بر روی مصالح به دست آمده از بزرگراه امام رضا (ع) انجام شد.

۳-۱ نتایج آزمایشهای مصالح و مواد

نتایج آزمایشهای مربوط به دانه بندی، درصد رطوبت، درصد قیر، آزمایشهای مصالح سنگی و قیر به دست آمده از آسفالت فرسوده و قیر امولسیون مورد استفاده در جداول ۲- الف، ۲- ب و ۲- ج آورده شده است. با توجه به این که دانه بندی مصالح به دست آمده از تراشه آسفالت بر اساس استاندارد انستیتو آسفالت در محدوده D استاندارد مزبور قرار گرفت، قیر امولسیون مطابق با استاندارد انستیتو آسفالت، قیر امولسیون کاتیونی نوع ۱- CSS انتخاب شد.

۳-۲ درصد قیر بهینه مخلوط حاوی سیمان و آهک

درصد قیر بهینه بر اساس معیارهای تعیین شده در جدول ۱ و شکلهای ۱ و ۲ برای مخلوطهای حاوی سیمان و آهک به ترتیب ٪۳/٤ و ٪۳/۷ تعیین شد.

۳-۳ طرح اختلاط به روش مارشال اصلاح شده

در مخلوطهای حاوی سیمان، درصدهای قیر امولسیون، رطوبت و سیمان بهینه به کمک نمودارهای شکل ۳ به ترتیب ٪٤، ٪٤/۵ و ٪۱/۵ تعیین شد. با توجه به حداکثر وزن مخصوص، درصد فضای خالی مخلوط در در صد قیر امولسیون بهینه حدود ۱٤٪ است که محدوده مجاز آیین‌نامه را تامین می‌کند.

در مخلوطهای حاوی آهک، درصدهای قیر امولسیون، رطوبت و آهک بهینه به کمک نمودارهای شکل ٤ به ترتیب ٪۵، ٪۳/۵ و ٪۲ تعیین شد. با توجه به حداکثر وزن مخصوص، درصد فضای خالی مخلوط در قیر امولسیون بهینه این بار نیز حدود ۱٤٪ است. در مورد درصد سیمان بهینه، با توجه به محدودیت ارایه شده، که حداکثر سیمان را به ٪۲ محدود می‌کند (به علت آنکه استفاده زیادتر فیلر منجر به افزایش سختی مخلوط و افزایش احتمال بروز ترک خوردگی در بلند مدت می گردد). علی‌رغم آنکه بیشترین وزن مخصوص در نمونه‌های حاوی ٪۲/۵ سیمان به دست آمده،

جدول ۱. معیارها و ضوابط طراحی مخلوطهای سرد بازیافتی با قیر امولسیون
[Stephen et. al. 2010; MS-21, 1986: Santagata, 2004; Marshall et al., 2009; Thomas, 2012]

ردیف	آزمایش	مجاز
۱	مقاومت مارشال (کیلوگرم)	٤٦۰
۲	مقاومت کششی غیر مستقیم خشک (کیلو پاسکال)	۲۰۰
۳	مقاومت کششی غیر مستقیم اشباع (کیلو پاسکال)	۱٤۰
٤	نسبت مقاومت کششی غیر مستقیم اشباع به خشک (٪)	۷۰
۵	محدوده فضای خالی (٪)	۹-۱٤
٦	**درصد فیلر فعال (٪)**	۱ -۲

جدول ۲-الف. نتایج آزمایشهای قیر مصرفی و محدوده های مجاز

قیر امولسیونی مورد استفاده: CSS-۱			
نتایج آزمایشهای کنترل کیفیت قیر امولسیون			
آزمایش	ASTM	نتایج	حد مجاز
نشست (۵ روزه)	D۲٤۱۹	٪۰/۸	حداکثر ۱٪
الک	C۱۳۱	صفر	حداکثر ۰/۱
ویسکوزیتهٔ انگلر	D٥۸۲۱	٥/۲[E]	۱۰-٥
اختلاط با سیمان	C۱۲۷و C۱۲۸	٪۰/٦۸	حداکثر ۲٪
خواص قیر خالص ۷۰-٦۰ مورد استفاده در قیر امولسیون			
ویژگی	ASTM	نتیجه	حد مجاز
درجه نفوذ در ۲۵ درجه سانتیگراد، ۰/۱ میلیمتر	D٥	٦۸	٦۰-۷۰
نقطه نرمی (حلقه و گلوله)، سانتیگراد	D۳۰	٥۱	٤٥-٥۲
شکل‌پذیری (خاصیت انگمی) در ۲۵ درجه سانتیگراد، ۵ سانتیمتر بر دقیقه	D۱۱۳	۱۰۰	۱۰۰
وزن مخصوص در ۲۵ درجه سانتیگراد	D۷۰	۱/۰۱۳	۱/۰۱-۱/۰٦

جدول ۲-ب. نتایج آزمایشهای آسفالت تراشیده شده و محدوده های مجاز

مشخصات مصالح سنگی آسفالت موجود			
آزمایش	ASTM	نتیجه	حد مجاز
ارزش ماسه‌ای	D۲٤۱۹	٪٦٥	حداقل ۳۵٪
سایش لس‌آنجلس	C۱۳۱	٪۲۲	حداکثر ٤۰٪
درصد شکستگی در یک جبهه	D٥۸۲۱	٪۷۱	حداقل ٦٥٪
جذب آب	C۱۲۲ و C۱۲۸	٪۱/۹۳	حداکثر ۵٪
افت وزنی با سولفات سدیم در ۵ سیکل	C۸۸	٪۱/۹	حداکثر ۱۲٪

مشخصات قیر استخراج شده از آسفالت فرسوده			
آزمایش	ASTM	AASHTO	نتایج
درجه نفوذ در ۲۵ درجه سانتیگراد، ۰/۱ میلیمتر	D٥	T٤۹	۱۱/٥
نقطه نرمی، سانتیگراد	D۳۰	T٥۳	٦٤/٥
شکل‌پذیری در ۲۵ درجه سانتیگراد، ۵ سانتیمتر بر دقیقه	D۱۱۳	T٥۱	٥/٥

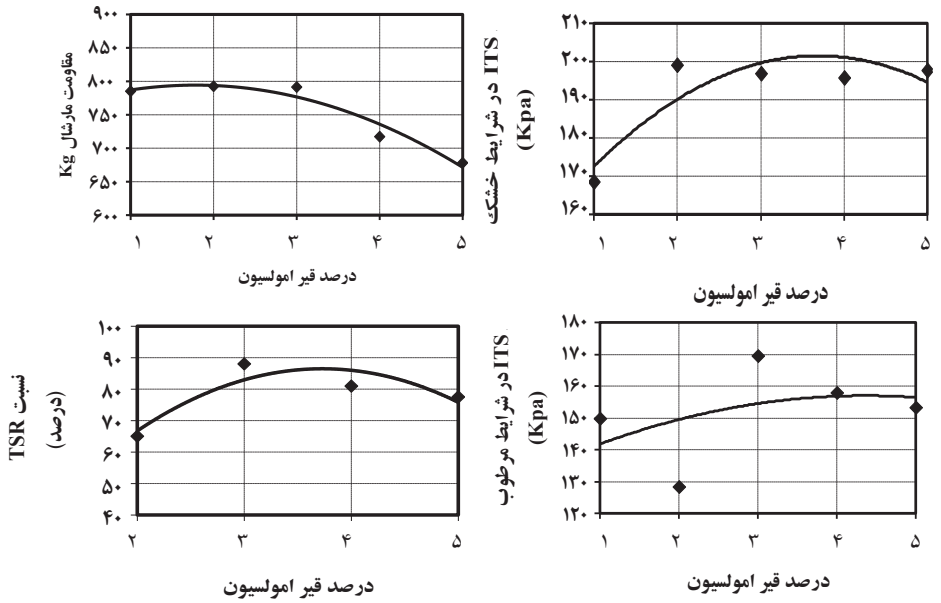
اما درصد سیمان بهینه با توجه به موارد ذیل ٪۱/۵ شده است:

- تأمین محدودیت حداکثر ٪۲ سیمان
- تغییرات نامحسوس در مقادیر وزن مخصوص نمونه‌های حاوی ٪۱/۵ و ٪۲/۵ سیمان
- عدم افزایش قابل توجه در مقادیر مقاومت مارشال نمونه‌ها با افزایش درصد سیمان (شکل ۵)

در مورد درصد آهک بهینه، با توجه به نمودار تغییرات درصد آهک- مقاومت مارشال، درصد آهک بهینه را حدود ٪۰/۵ نشان میدهد. اما با توجه به شکل ٦ این مقدار آهک، مقاومت مارشال را نسبت به نمونه‌های حاوی ٪۲ آهک حدود ٪۲۵ کاهش می‌دهد.

جدول ۲-ج. نتایج آزمایشهای دانه‌بندی و اجزاء آسفالت تراشیده شده و محدوده های مجاز

دانه بندی			اجزای مخلوط	
اندازه الک	تراشه آسفالت	مصالح استخراجی	D	
۳۷/۵ میلیمتر	۱۰۰	–	۱۰۰	وزن مخلوط بازیافتی (گرم) ۱۲۰۰
۲۵ میلیمتر	۹۵/۹	۱۰۰	۸۰–۱۰۰	وزن فیلتر قبل از استفاده (گرم) ۴۳
۱۹ میلیمتر	۹۴/۴	۹۸/۶	–	وزن فیلتر بعد از استفاده (گرم) ۵۰
۱۲/۵ میلیمتر	۸۸/۵	۹۵/۲	–	وزن فیلر عبوری (گرم) ۴/۵
۹/۵ میلیمتر	۸۲/۲	۹۱/۴	–	وزن مصالح سنگی (گرم) ۱۱۳۱
۴/۷۵ میلیمتر	۶۰/۲	۷۶/۲	۲۵–۸۵	وزن قیر مخلوط بازیافتی (گرم) ۵۷/۵
۲/۳۶ میلیمتر	۳۴/۶	۵۱/۴	–	درصد قیر بر حسب مصالح سنگی ۵/۰
۰/۳ میلیمتر	۳	۱۶/۹	–	درصد قیر بر حسب کل مخلوط ۴/۸
۰/۰۷۵ میلیمتر	۰/۳	۸/۵	۳–۱۵	درصد رطوبت ۰/۵



شکل ۱. نحوه تعیین درصد قیر امولسیون بهینه مخلوط سیمانی بر اساس آزمایشات مقاومتی

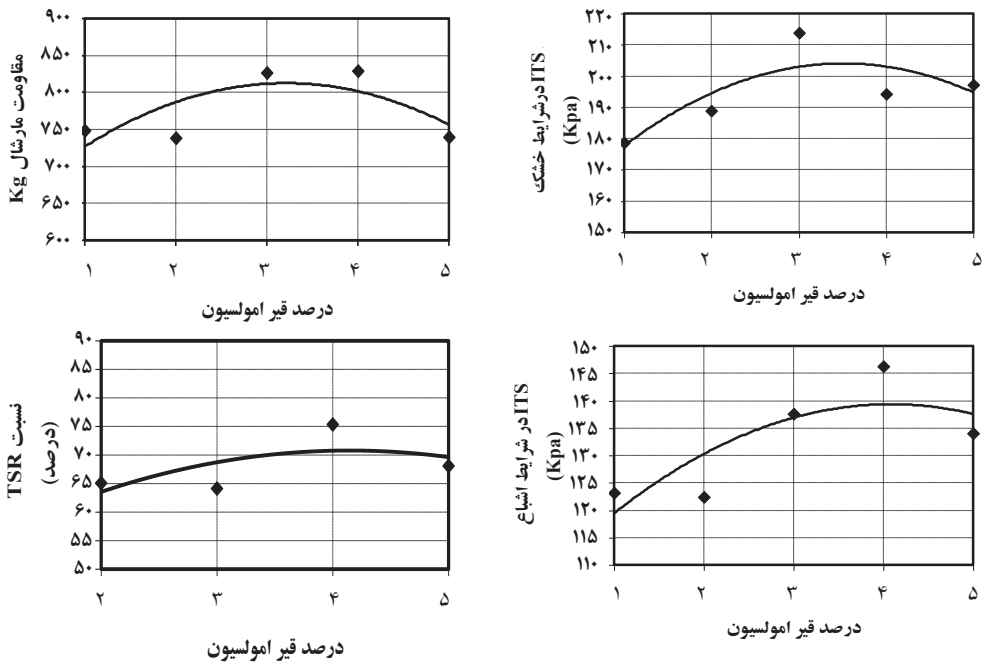
در نتیجه درصد آهک بهینه با توجه به نمودار تغییرات درصد آهک- مقاومت مارشال ٪۲ تعیین شد.

۴-۳ مقایسه نتایج روش مارشال اصلاح شده و روش طراحی پیشنهادی این تحقیق

با توجه به جدول ۳، نتایج درصد قیر امولسیون بهینه در روش مارشال اصلاح شده برای مخلوطهای امولسیونی حاوی آهک و سیمان نسبت به روش پیشنهادی در این تحقیق بیشتر است.

جدول ۳. درصد قیر امولسیون بهینه مخلوطهای حاوی سیمان و آهک

روش طراحی	مارشال اصلاح شده	روش پیشنهادی در این تحقیق
درصد قیر بهینه		
مخلوط حاوی سیمان	٪۴	٪۳/۴
مخلوط حاوی آهک	٪۵	٪۳/۷



شکل ۲. نمودارهای تعیین درصد قیر امولسیون بهینه مخلوط آهکی بر اساس آزمایشهای مقاومتی

به منظور بررسی دقیق‌تر این دو روش، در صد قیر امولسیون بهینه دو روش و خصوصیات مخلوطهای حاوی سیمان و آهک در جدول ٤ آمده است.

با توجه به مقادیر جدول ٤، مقاومت مارشال، مقاومت کششی غیر مستقیم در شرایط خشک و نسبت TSR در قیر امولسیون بهینه به روش مارشال اصلاح شده در مقایسه با خصوصیات فوق در قیر بهینه روش پیشنهادی مقادیر کمتری دارند. این در حالی است که درصد قیر امولسیون به دست آمده از روش مارشال اصلاح شده، نسبت به روش پیشنهادی در این تحقیق برای مخلوطهای حاوی سیمان و آهک به ترتیب ٪۰/٦ و ٪۱/۳ بیشتر است، که علاوه بر افزایش هزینه‌های اجراء منجر به کاهش مقادیر مقاومتی مخلوط بازیافتی می شود.

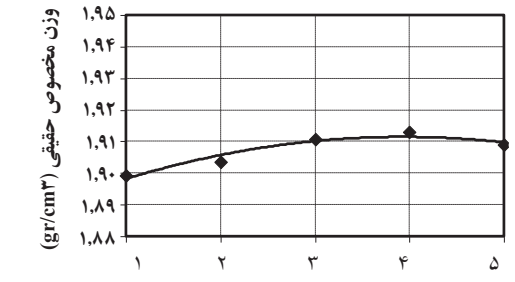
البته مزیت روش مارشال اصلاح شده نسبت به روش پیشنهادی در این تحقیق، هزینه‌های آزمایشگاهی کمتر این روش است.

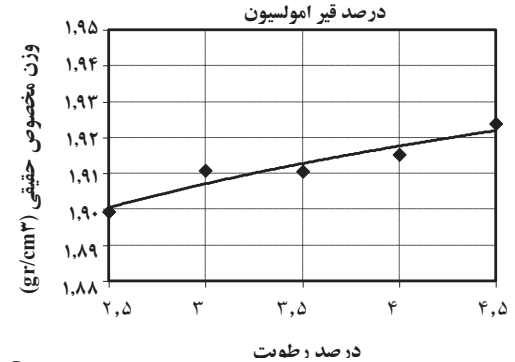
۳-۵ مقایسه خصوصیات مقاومتی مخلوطهای حاوی سیمان و آهک

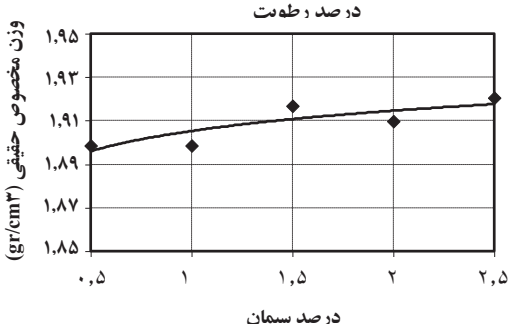
هدف اصلی از بکارگیری افزودنیهای شیمیایی افزایش مقاومت اولیه مخلوط، کاهش آسیب‌پذیری آن در برابر رطوبت و مقاومت

جدول ٤. خصوصیات آسفالت های سرد بازیافتی در دو روش مورد مطالعه

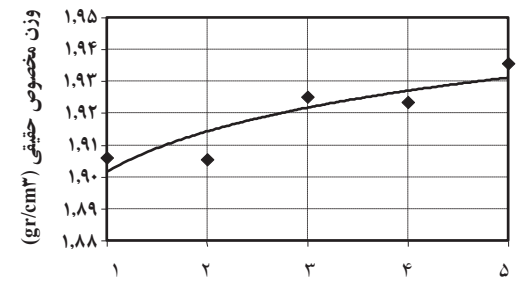
نوع فیلر	مخلوط حاوی سیمان		مخلوط حاوی آهک	
روش طراحی	مارشال	روش پیشنهادی	مارشال	روش پیشنهادی
مقدار قیر امولسیون	٪٤	٪۳/٤	٪۵	٪۳/۷
وزن مخصوص(g/cm^3)	۱/۹۱۳	۱/۹۱۱	۱/۹۳۵	۱/۹۲٦
مقاومت مارشال (Kg)	۷۱۷	۷٦٦	۷٤۰	۸۱۲
ITS خشک (kPa)	۱۹٦	۲۰۱	۱۹۷	۲۰٤
ITS اشباع (kPa)	۱۵۸	۱۵٦	۱۳٤	۱۳۹
نسبت TSR (٪)	۸۱	۸۷	٦۸	۷۳

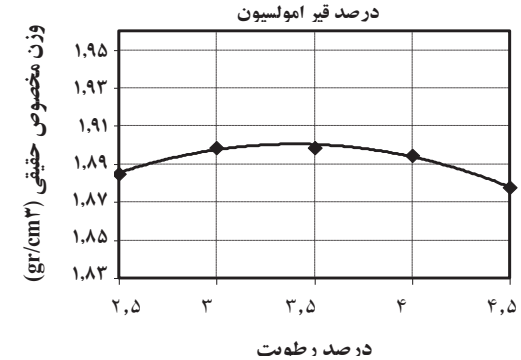


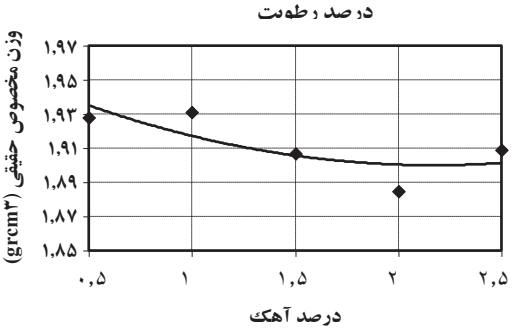




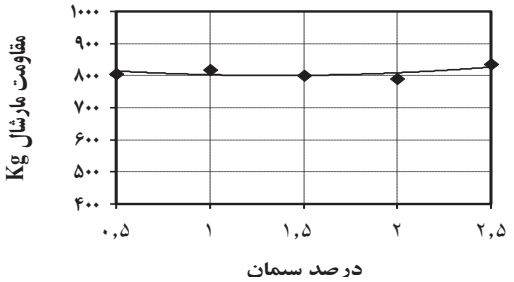
شکل ۳. نمودارهای تعیین درصد قیر امولسیون، رطوبت و سیمان بهینه



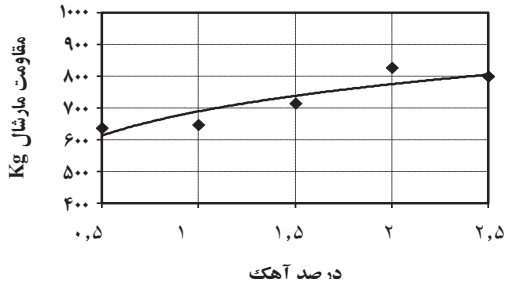




شکل٤. نمودارهای تعیین درصد قیر امولسیون، رطوبت و آهک بهینه



شکل ۵. نمودار تغییرات درصد سیمان- مقاومت مارشال



شکل ٦. نمودار تغییرات درصد آهک- مقاومت مارشال

در برابر شیارشدگی است. به همین دلیل نتایج آزمایشهای مقاومت مارشال، مقاومت کششی غیر مستقیم در شرایط خشک و اشباع و نسبت آن برای نمونه‌های حاوی سیمان و آهک با هم مقایسه شده و شکل ۷ نتایج آزمایشهای مزبور را نشان می‌دهد.

با توجه به شکل ۷، مقادیر مقاومت کششی غیر مستقیم در شرایط خشک و مقاومت مارشال نمونه‌های حاوی آهک نسبت به نمونه‌های حاوی سیمان تا حدودی بیشتر است، به طوری که با افزایش درصد قیر امولسیون (از ٤٪ به ٥٪) مقاومت مارشال مخلوطهای حاوی آهک حدود ۱۰٪ تا ۱۵٪ نسبت به مخلوطهای دارای سیمان افزایش می‌یابد. اما با توجه به این که مقاومت مارشال نمونه‌های سیمانی حدوداً بیش از ۷۰۰ کیلوگرم است، در نتیجه مخلوطهای حاوی سیمان نیز می‌توانند مقاومت اولیه مناسبی

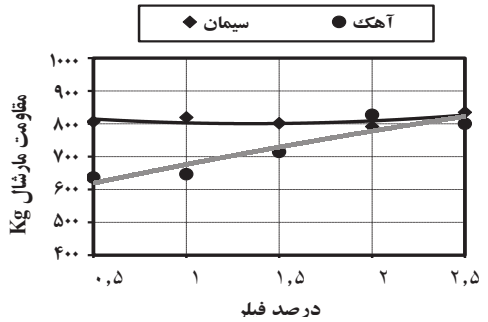
داشته باشند. از طرف دیگر، نسبت TSR (مقاومت کششی غیر مستقیم در شرایط اشباع به خشک) برای نمونه‌های حاوی آهک در این پروژه تا حدودی کمتر از این نسبت برای نمونه‌های حاوی سیمان است، که احتمالاً به دلیل آن است که بار ذرات قیر امولسیون کاتیونیک و ذرات آهک مثبت است.

نکته قابل توجه در مورد مخلوطهای حاوی سیمان آن است که در این نوع مخلوط با توجه به شکل ۸ تغییر درصد فیلر مصرفی تاثیر چندانی در مقاومت مارشال نمونه‌ها (حدود ٪۵) ندارد. در حالی که در مخلوطهای حاوی آهک با تغییر درصد آهک مقاومت مارشال تغییرات زیادی را نشان می‌دهد (تا حدود ٪۲۰). این مهم حاکی از آن است که مخلوطهای حاوی آهک نسبت به مخلوطهای حاوی سیمان حساسیت بیشتری در برابر تغییرات درصد فیلر دارند.

با توجه به مطالب بیان شده می‌توان تفاوت‌های اصلی روش پیشنهادی با روش مارشال اصلاح شده را به شرح جدول ۵ بیان نمود.

٤. جمع بندی و نتیجه‌گیری

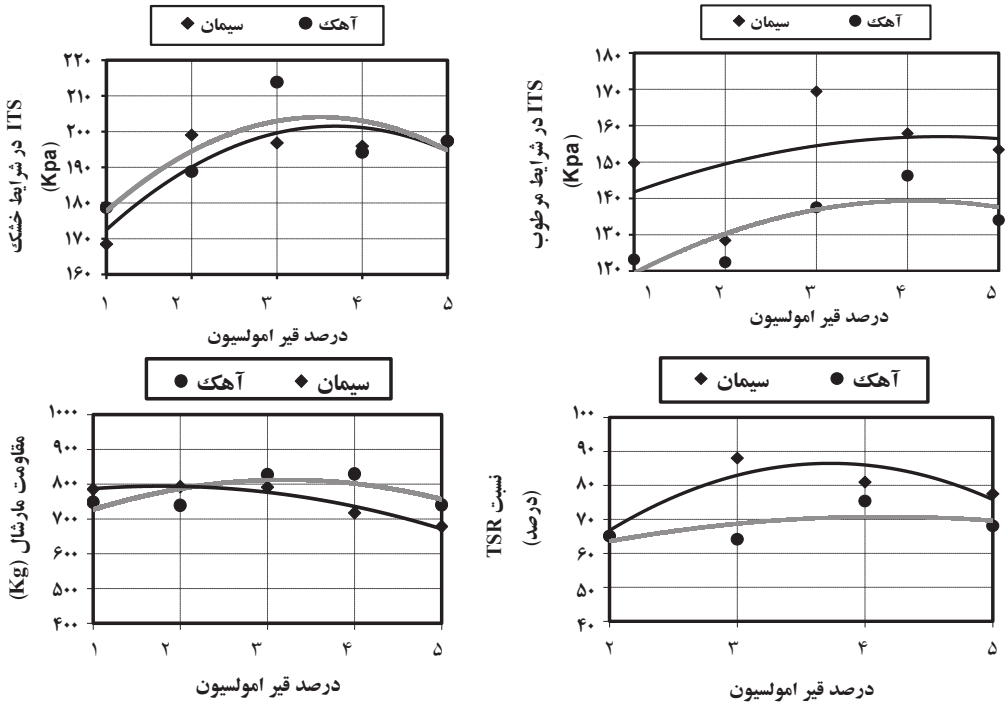
از تحقیق انجام شده نتایج زیر به دست آمد:



شکل ۸. مقاومت مارشال مخلوطهای سرد بازیافتی حاوی سیمان و آهک با تغییر در درصد فیلر

۱- نتایج ارزیابی آزمایشگاهی به روش مارشال اصلاح شده نشان داد که به منظور استفاده از آن در کشور اصلاحاتی در روش می بایست انجام شود.

۲- مقایسه دو روش مارشال اصلاح شده و روش پیشنهادی در این تحقیق نشان می‌دهد، روش مارشال اصلاح شده درصد قیر امولسیون بهینه بیشتری پیشنهاد می‌کند. در حالی که خصوصیات مخلوط در درصد قیر امولسیون بهینه به روش پیشنهادی به میزان قابل توجهی از مخلوطهای طراحی شده به روش مارشال اصلاح شده بهتر است. در نتیجه روش مارشال اصلاح شده، علاوه بر



شکل۷. مقایسه خصوصیات مقاومتی مخلوطهای سرد بازیافتی حاوی سیمان و آهک

جدول ۵. تفاوتهای اصلی روش پیشنهادی با روش مارشال اصلاح شده

روش طراحی شرح	مارشال اصلاح شده	روش پیشنهادی
مقدار مصالح مصرفی برای هر نمونه (گرم)	۱۱۵۰	۱۰۰۰
درصد رطوبت کل	٪۳	استفاده از آزمایش اندود
آزمایشات موثر در طراحی	وزن مخصوص، مقاومت مارشال	وزن مخصوص، مقاومت مارشال، ITS خشک، اشباع و نسبتTSR
محدودیت‌های طراحی	فضای خالی	فضای خالی، مقاومت مارشال، ITS خشک، اشباع و نسبتTSR

افزایش هزینه‌های اجراء منجر به کاهش مقاومت مخلوط های بازیافتی می‌گردد.

۳- مزیت روش مارشال اصلاح شده نسبت به روش پیشنهادی در این تحقیق، هزینه‌های آزمایشگاهی کمتر است. به طوری که در پروژه‌ها با تنوع خرده آسفالت کم (عملیات تعمیر و نگهداری محدود)، این روش ممکن است به دلیل عدم نیاز به تکرار آزمایشها برای مصالح مختلف، مناسب باشد. اما در روسازیهایی که تنوع خرده آسفالت در آن ها زیاد است، استفاده از روش پیشنهادی در این تحقیق (به دلیل هزینه‌های آزمایشگاهی بیشتر)، نیاز به بررسی بیشتری دارد.

٤- تحلیل فنی مخلوطهای حاوی سیمان و آهک نشان می‌دهد که مقادیر مقاومت کششی غیر مستقیم در شرایط خشک و مقاومت مارشال نمونه‌های حاوی آهک نسبت به نمونه‌های حاوی سیمان تا حدودی بیشتر است. اما با توجه به مقاومت مناسب مخلوطهای حاوی سیمان، این نوع از مخلوطها نیز می‌توانند مقاومت اولیه مناسبی داشته باشند. علاوه بر این، مخلوطهای حاوی آهک نسبت به مخلوطهای حاوی سیمان (از لحاظ پارامتر مقاومت مارشال) حساسیت بیشتری در برابر تغییرات درصد فیلر دارند.

۵. پی نوشتها

1- Ontario Method
2- California Method
3- Chevron Method
4- Oregon Method
5- Koch Reflex Method
6- Pennsylvania Method
7- Asphalt Recycling and Reclaiming Association
8- Baker et al
9- High Float
10- Hodgkinson and Visser
11- Lewis and Collings
12- Forsberg et al
13- Perez et al
14- Martinez et al
15- Thomas and Kadrmas
16- Santagata and Chiappinelli

٦. مراجع

- Baker, D., Wourms, O., Berthelot, C. and Gerbrandt, R. (2000) "Cold in place recycling using asphalt emulsion for strengthening for Saskatchewan Low Volume Roads", Canadian Technical Asphalt Association, Proceedings, 45th Annual Conference, Canada.

- Cross, Stephen A., Kearney, Edward R., Justus, Henry G. and Chesner, Warren H. (2010) "Cold-in-place recycling in New York state", New York State Department of Transportation, New York, USA.

- Forsberg, A., Lukanen, E. and Thomas, T. (1999) "Blue earth county CSAH 20 – an engineered cold in-place recycling project," paper presented at the 81st Annual Meeting, Transportation Research Board, Washington, D.C., USA.

- Gallivan, V. (2011) "Cold in-place recycling state of practice review", Department of Transportation - Federal Highway Administration (FHWA), USA.

- Hodgkinson, A. and Visser, A.T. (2004) "The role of fillers and cementitious binders when recycling with

foamed bitumen or bitumen emulsion", Proceedings of the 8th Conference on Asphalt Pavements for Southern Africa, South Africa.

- Kavussi, A., Dibaj, S. M. and Saghafi, B. (2007) "Cold in place recycling mix design: A case study in Tehran Khavaran Highway", Proceedings of the 6th International Conference on Sustainable Aggregates, Asphalt Technology and Pavement Engineering, Liverpool John Moores University, Liverpool, UK.

- Lee, K.W., Brayton, E.T. and Harrington, J. (2003) "New mix-design procedure of cold in-place recycling for pavement rehabilitation." Proceedings, Transportation Research Board, 82th Annual Meeting, Washington D.C., USA.

- Lewis, A. J. N. and Collings, D.C. (1999) "Cold in place recycling: A relevent process for road rehabilitation and upgrading", Proceeding of the 7th Conference on asphalt pavements for Southern Africa, South Africa.

- Marshall, R. T., Garcia, L. and Carpenter, S. H. (2009)"Cold in-place recycling and full-depth recycling with asphalt products (CIR & FDRWAP)", Illinois Center for Transportation Department of Civil and Environmental Engineering, University of Illinois, Canada.

- Martinez, A. H., Miro, R. and Perez-Jimenez, F. (2007) "Spanish experience with the application of gyratory compactor and indirect tensile test in design and control of cold recycled asphalt pavements." TRB 86th Annual Meeting, Washington D.C. USA.

- Perez, F., Miro, R., Martinez, C., Fernandez, M. and Soto, J. A. (2004) "Mix designs and performance of cold pavement recycling with emulsion in the paramix-project." 3rd Eurasphalt and& Eurobitume Conference, Vienna, Austria.

- Santagata, E. and Chiappinelli, G. (2004) "Improvements in the mix design of cold recycling of bituminous mixtures", 3rd Eurasphalt & Eurobitume Conference, Vienna, Austria.

- Suleiman, N. (2002) "A state-of-the-art review of cold in-place recycling of asphalt pavements in the Northern Plains region," University of North Dakota, Department of Civil Engineering, North Dakota Department of Transportation Bismarck, ND, USA.

- Thomas, T. (2012) "Mix and thickness design for cold in-place recycling (CIR)", Asphalt Recycling and Reclaiming Association (ARRA), Annapolis, MD, USA.

- Thomas, T. and Kadrmas, A. (2003) "Performance-related tests and specifications for cold in-place recycling: lab and field experience." TRB 82th Annual Meeting, Washington D.C. USA.

- Asphalt Recycling and Reclaiming Association (2001) "ARRA, Basic asphalt recycling manual, and Publication No. NHI01-022, Asphalt Recycling and Reclaiming Association (ARRA), Annapolis, MD, USA.

Asphalt Institute (1986) "Asphalt cold-mix recycling, manual series No. 21 (MS-21), edition", The Asphalt Institute, Lexington, Kentucky, USA.

-سازمان مدیریت و برنامه ریزی کشور (۱۳۸۵) " مشخصات فنی اجرایی بازیافت سرد آسفالت"، نشریه شماره ۳۳۹، دفتر امور فنی و تدوین معیارها، سازمان مدیریت و برنامه-ریزی کشور، تهران، ایران