

## روشی برای طرح اختلاط و بهینه‌سازی مخلوط‌های آسفالت بازیافتی امولسیون

سید محمود دیباج، کارشناس ارشد، شرکت اندیشه نگاران کیا، تهران، ایران  
امیر کاوسی (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 استاندارد 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

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 ۶ ساعت در دمای ۶۰ 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 ۶۰ 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 ۴٪). مقدار فضای خالی برای هر درصد رطوبت تعیین می‌شود. پارامترهای طراحی شامل حداقل و حداکثر فضای خالی طراحی به ترتیب ۹٪ و ۱۴٪ 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، استاندارد برای استفاده از مصالح جدید رایج 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 نمونه‌ها ۱۱۵۰ گرم است که برای تهیه نمونه

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 رایج 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 رایج 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 اوتاریو<sup>۱</sup>)، آزمایش مقاومت ویم (روش ویم اصلاح شده و روش کالیفرنیا<sup>۲</sup>)، مدول ارتجاعی (روش چورون<sup>۳</sup> و روش اورگون<sup>۴</sup>)، آزمایش وزن مخصوص (روش مارشال اصلاح شده)، آزمایش کشش غیر مستقیم، نسبت مقاومت کششی اشباع به خشک (روش طراحی<sup>۵</sup>) و نسبت مدول ارتجاعی در شرایط مرطوب به خشک (روش پنسیلوانیا<sup>۶</sup>) استفاده می‌کنند [Sule - man, 2002]. در ایران بر اساس توصیه نشریه ۳۳۹ سازمان

مجمع احیاء و بازیافت آسفالت<sup>۶</sup> و دیگر تحقیقات، برخی از معایب روش مارشال اصلاح شده را اصلاح و پیشنهاداتی را برای بهبود طراحی مخلوطهای سرد بازیافتی ارائه 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 امولسیون تعیین زده شده و درصد رطوبتهای متفاوت انجام می‌گیرد. نحوه پوشش مصالح با قیر امولسیون 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 ۴ ساعت در ۶۰ 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 تعیین 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 اشیاع 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 امولسیون (آنیونی و کاتیونی) و کف قیر هستند. استفاده از قیر امولسیون به علت کاربرد آسان، مستقیم و بدون بکارگیری گرما

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 ارائه شده برای آسفالت گرم (بند ۹-۲ استاندارد، ASTM-D 2726) است، در صورتیکه نمونه‌ها در این روش رطوبت دارند و وزن مخصوص آنها براساس بند ۹-۱ استاندارد ASTM-D 2726 محاسبه می‌شوند [Kavussi et al, 2007].  
و- وزن مخصوص در روش مارشال اصلاح شده با استفاده از استاندارد ASTM-D 2726 تعیین می‌شود. اما جذب آب در برخی نمونه‌های بازیافتی بیش از حد مجاز ۲٪ است. در این نمونه‌ها بهتر است تعیین وزن مخصوص مطابق با استاندارد ASTM-D 1188 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 ارائه نکرده است.

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

#### ۲-۲ تحقیقات و مطالعات طراحی مخلوطهای سرد

##### بازیافتی با قیر امولسیون

با توجه به مشکلات روش مارشال اصلاح شده، روش پیشنهادی

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<sup>۱۲</sup> 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 شن زدگی، مارشال و تعیین مقاومت در برابر حساسیت رطوبتی برای تعیین طرح اختلاط استفاده شد [Forsberg et al. 1999].

پرز و همکاران<sup>۱۳</sup> و مارتینز و همکاران<sup>۱۴</sup> به منظور طراحی مخلوطهای سرد بازیافتی از آزمایش ITS و نسبت ITS اشباع به خشک استفاده کردند [Martinez, 2007]. توماس و کادرمانی<sup>۱۵</sup> از چهار آزمایش شن زدگی، ITS، حساسیت در برابر رطوبت و مارشال برای بررسی عملکرد و خصوصیات مخلوطهای سرد بازیافتی استفاده کردند [Perez, 2004 and Thomas, 2003]. لویس و کالینگر 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<sup>۱۶</sup> 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]

### ۳-۲ روش طراحی پیشنهادی در این تحقیق

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

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 دانه بندی 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<sup>۱۷</sup> تأثیر دو نوع قیر امولسیون HF<sup>۱۸</sup> و CSS-۱ 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 قیر امولسیون نوع CSS-۱ بسیار بهتر از قیر امولسیون HF است. به این ترتیب که مقاومت مارشال و چگالی به دست آمده از نمونه‌های حاوی قیر CSS-۱ بیشتر از نمونه‌های حاوی قیر امولسیون HF است [Baker, 2000].

هودکینسون و ویسر<sup>۱۹</sup> اثر فیلرهای فعال و غیرفعال را در مخلوطهای سرد بازیافتی با قیر امولسیون 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. به طور کلی، استفاده از فیلرهای فعال (نظیر سیمان، آهک و خاکستر بادی) و یا فیلرهای غیرفعال (مانند فیلر دولومیتی) باعث بهبود مقاومت ITS می شود که مقدار آن در مورد فیلرهای فعال بسیار بیشتر است [Hodgkinson and Visser, 2004].

تحقیقات لویس و کالینگر<sup>۲۰</sup> نشان داد که استفاده از سیمان و قیر امولسیون، مقاومت مارشال و ITS در شرایط خشک و اشباع را بیش از ۲ برابر افزایش می دهد [Lewis et al. 1999].

### 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]. لویس و کالینگر نیز برای مقایسه خصوصیات مخلوطهای سرد بازیافتی

روشی برای طرح اختلاط و بهینه‌سازی مخلوط‌های آسفالت بازیافتی امولسیون

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 ۳/۴٪ 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 ۴٪، ۵٪ و ۱/۵٪ تعیین شد. با توجه به حداکثر وزن مخصوص، درصد فضای خالی مخلوط در درصد قیر امولسیون بهینه حدود ۱۴٪ است که محدوده مجاز آیین‌نامه را تامین می‌کند.

در مخلوط‌های حاوی آهک، درصدهای قیر امولسیون، رطوبت و آهک بهینه به کمک نمودارهای شکل ۴ 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 ۱۴٪ است. در مورد درصد سیمان بهینه، با توجه به محدودیت ارابه 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 می‌گردد). علی‌رغم آنکه بیشترین وزن مخصوص در نمونه‌های حاوی ۲/۵٪ سیمان به دست آمده،

الکهای ۳۷/۵، ۲۵، ۱۹، ۱۲/۵، ۹/۵، ۴/۷۵، ۲/۳۶، 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. نمونه‌های ۱۰۰۰ گرمی با قیر امولسیون ۱٪، ۲٪، ۳٪، ۴٪ و ۵٪ با اعمال ۵۰ ضربه چکش مارشال تهیه و پس از عمل آوری در ۶۰ درجه سانتیگراد در ۶ ساعت، به مدت ۲۴ 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

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)	۴۶۰
۲	مقاومت کششی غیر مستقیم خشک (کیلو پاسکال)	۲۰۰
۳	مقاومت کششی غیر مستقیم اشباع (کیلو پاسکال)	۱۴۰
۴	نسبت مقاومت کششی غیر مستقیم اشباع به خشک (%)	۷۰
۵	محدوده فضای خالی (%)	۹-۱۴
۶	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)	D۲۴۱۹	۰/۸٪	حداکثر ۱٪
الک	C۱۳۱	صفر	حداکثر ۱/۱
ویسکوزیته انگلر	D۵۸۲۱	۵/۲ <sup>E</sup>	۱۰-۵
اختلاط با سیمان	C۱۲۷ و C۱۲۸	۰/۶۸٪	حداکثر ۲٪
خواص قیر خالص ۶۰-۷۰ مورد استفاده در قیر امولسیون			
ویژگی	ASTM	نتیجه	حد مجاز
درجه نفوذ در ۲۵ درجه سانتیگراد، ۰/۱ میلیمتر	D۵	۶۸	۶۰-۷۰
نقطه نرمی (حلقه و گلوله)، سانتیگراد	D۳۰	۵۱	۴۵-۵۲
شکل پذیری (خاصیت انگمی) در ۲۵ درجه سانتیگراد، ۵ سانتیمتر بر دقیقه	D۱۱۳	۱۰۰	۱۰۰
وزن مخصوص در ۲۵ درجه سانتیگراد	D۷۰	۱/۰۱۳	۱/۰۱-۱/۰۶

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

مشخصات مصالح سنگی آسفالت موجود			
آزمایش	ASTM	نتیجه	حد مجاز
ارزش ماسه‌ای	D۲۴۱۹	۶۵٪	حداقل ۳۵٪
سایش لس آنجلس	C۱۳۱	۲۲٪	حداکثر ۴۰٪
درصد شکستگی در یک جبهه	D۵۸۲۱	۷۱٪	حداقل ۶۵٪
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	D۵	T۴۹	۱۱/۵
نقطه نرمی، سانتیگراد	D۳۰	T۵۳	۶۴/۵
شکل پذیری در ۲۵ درجه سانتیگراد، ۵ سانتیمتر بر دقیقه	D۱۱۳	T۵۱	۵/۵

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

افزایش درصد سیمان (شکل ۵)

- تأمین محدودیت حداکثر ۲٪ سیمان

در مورد درصد آهک بهینه، با توجه به نمودار تغییرات درصد

- تغییرات نامحسوس در مقادیر وزن مخصوص نمونه‌های حاوی

آهک- مقاومت مارشال، درصد آهک بهینه را حدود ۰/۵٪ نشان

۱/۵٪ و ۲/۵٪ سیمان

میدهد. اما با توجه به شکل ۶ این مقدار آهک، مقاومت مارشال را

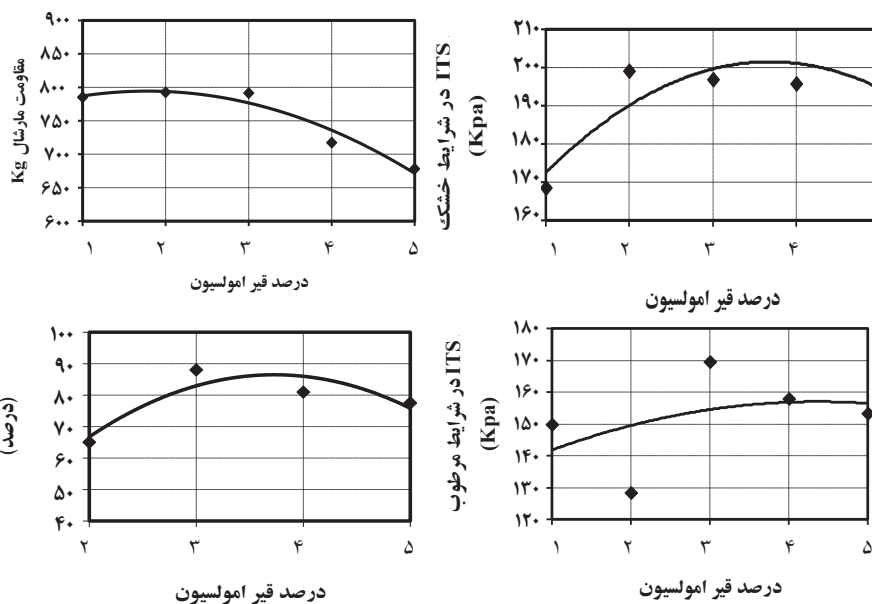
- عدم افزایش قابل توجه در مقادیر مقاومت مارشال نمونه‌ها با

نسبت به نمونه‌های حاوی ۲٪ آهک حدود ۲۵٪ کاهش می‌دهد.

روشی برای طرح اختلاط و بهینه‌سازی مخلوط های آسفالت بازیافتی امولسیون

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

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



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

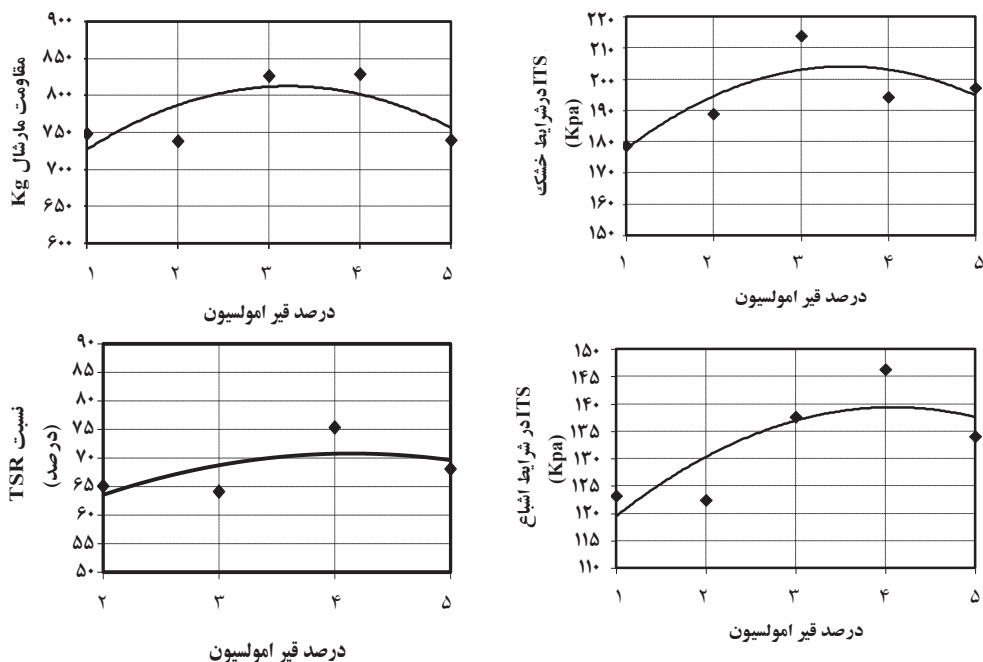
مارشال اصلاح شده برای مخلوطهای امولسیونی حاوی آهک و سیمان نسبت به روش پیشنهادی در این تحقیق بیشتر است.

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

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

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

با توجه به جدول ۳، نتایج درصد قیر امولسیون بهینه در روش



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

سیمان و آهک به ترتیب ۰/۶٪ 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 آسیب پذیری آن در برابر رطوبت و مقاومت

به منظور بررسی دقیق تر این دو روش، در صد قیر امولسیون بهینه دو روش و خصوصیات مخلوطهای حاوی سیمان و آهک در جدول ۴ آمده است.

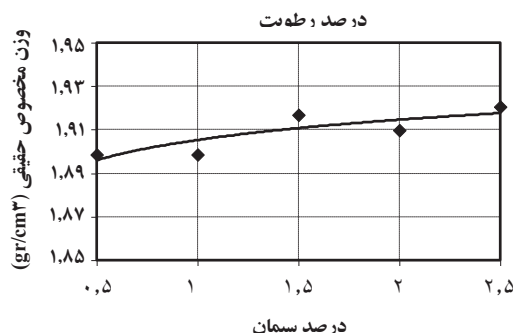
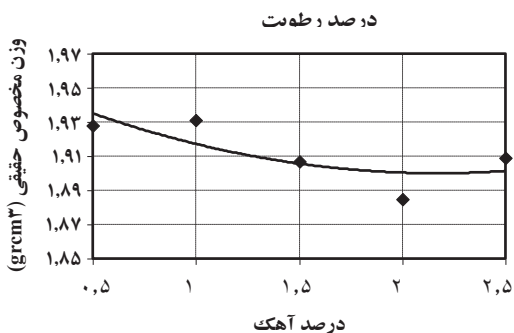
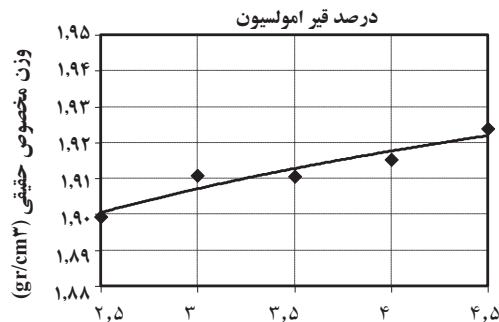
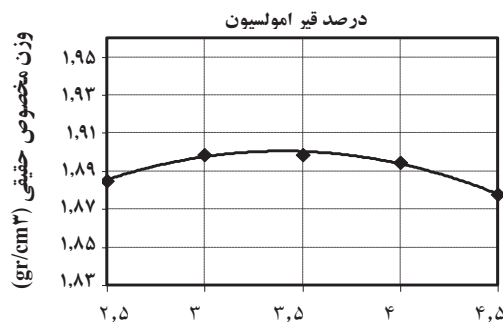
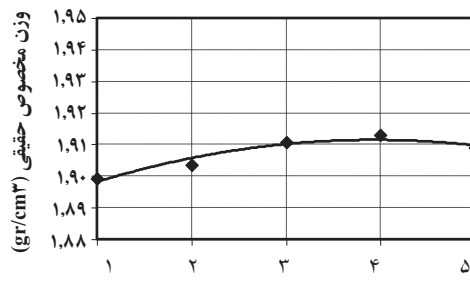
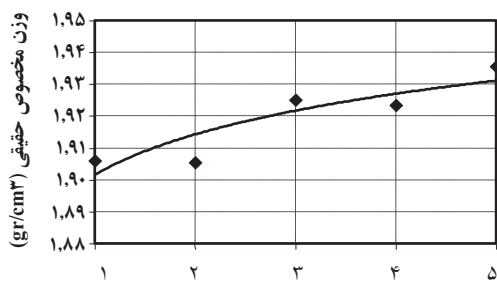
با توجه به مقادیر جدول ۴، مقاومت مارشال، مقاومت کششی غیر مستقیم در شرایط خشک و نسبت TSR در قیر امولسیون بهینه به روش مارشال اصلاح شده در مقایسه با خصوصیات فوق در قیر بهینه روش پیشنهادی مقادیر کمتری دارند. این در حالی است که درصد قیر امولسیون به دست آمده از روش مارشال اصلاح شده، نسبت به روش پیشنهادی در این تحقیق برای مخلوطهای حاوی

جدول ۴. خصوصیات آسفالت های سرد بازیافتی در دو روش مورد مطالعه

مخلوط حاوی آهک		مخلوط حاوی سیمان		نوع فیلر
روش پیشنهادی	مارشال	روش پیشنهادی	مارشال	روش طراحی
۳/۷٪	۵٪	۳/۴٪	۴٪	مقدار قیر امولسیون
۱/۹۲۶	۱/۹۳۵	۱/۹۱۱	۱/۹۱۳	وزن مخصوص (g/cm <sup>3</sup> )
۸۱۲	۷۴۰	۷۶۶	۷۱۷	مقاومت مارشال (Kg)
۲۰۴	۱۹۷	۲۰۱	۱۹۶	ITS خشک (kPa)
۱۳۹	۱۳۴	۱۵۶	۱۵۸	ITS اشباع (kPa)
۷۳	۶۸	۸۷	۸۱	نسبت TSR (%)

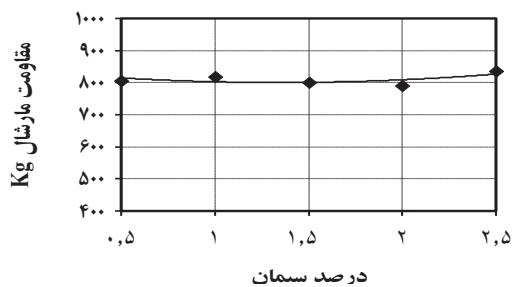
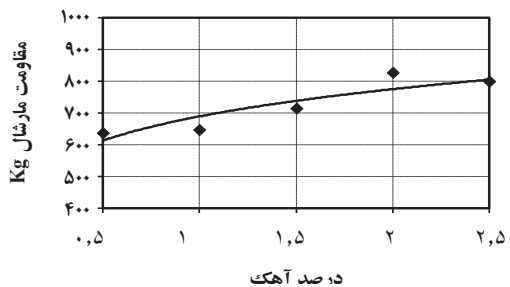


روشی برای طرح اختلاط و بهینه‌سازی مخلوط‌های آسفالت بازیافتی امولسیون



شکل ۴. نمودارهای تعیین درصد قیر امولسیون، رطوبت و آهک بهینه

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



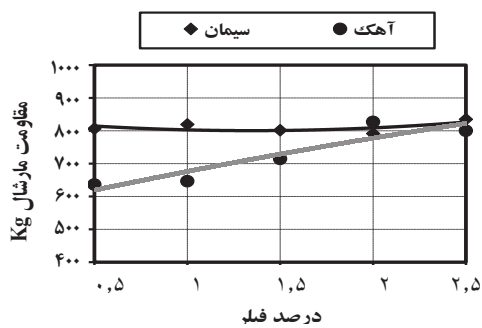
شکل ۶. نمودار تغییرات درصد آهک- مقاومت مارشال

شکل ۵. نمودار تغییرات درصد سیمان- مقاومت مارشال

به نمونه‌های حاوی سیمان تا حدودی بیشتر است، به طوری که با افزایش درصد قیر امولسیون (از ۴٪ به ۵٪) 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

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



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

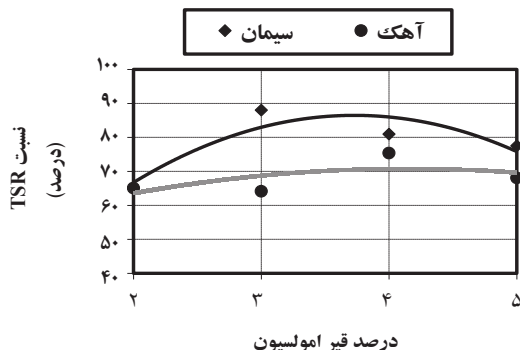
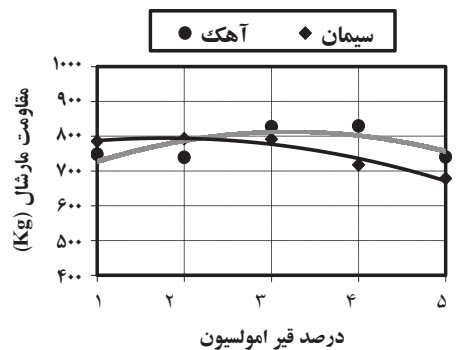
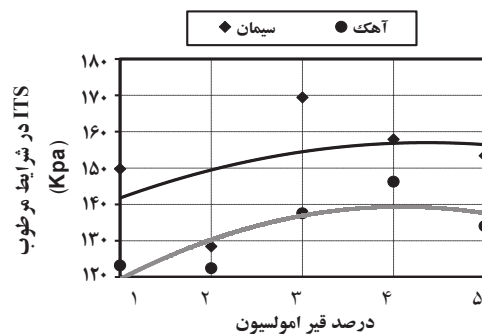
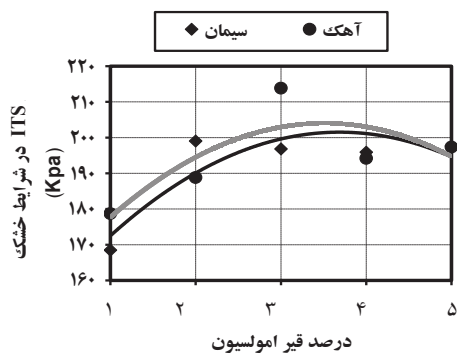
داشته باشند. از طرف دیگر، نسبت TSR (مقاومت کششی غیر مستقیم در شرایط اشباع به خشک) برای نمونه‌های حاوی آهک در این پروژه تا حدودی کمتر از این نسبت برای نمونه‌های حاوی سیمان است، که احتمالاً به دلیل آن است که بار ذرات قیر امولسیون کاتیونیک و ذرات آهک مثبت است.

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.

#### ۴. جمع بندی و نتیجه گیری

از تحقیق انجام شده نتایج زیر به دست آمد:



شکل ۷. مقایسه خصوصیات مقاومتی مخلوط‌های سرد بازیافتی حاوی سیمان و آهک

روشی برای طرح اختلاط و بهینه‌سازی مخلوط های آسفالت بازیافتی امولسیون

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 نسبت TSR
محدودیت‌های طراحی	فضای خالی	فضای خالی، مقاومت مارشال، ITS خشک، اشباع و نسبت TSR

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

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 روسازیهای 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.

۴- 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.

## ۶. 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

## ۵. پی نوشتها

- 1- Ontario Method
- 2- California Method
- 3- Chevron Method
- 4- Oregon Method
- 5- Koch Reflex Method
- 6- Pennsylvania Method

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 Kadmas, 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

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 relevant 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 parmix-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

Surf and download all data from SID.ir: [www.SID.ir](http://www.SID.ir)

Translate via STRS.ir: [www.STRS.ir](http://www.STRS.ir)

Follow our scientific posts via our Blog: [www.sid.ir/blog](http://www.sid.ir/blog)

Use our educational service (Courses, Workshops, Videos and etc.) via Workshop: [www.sid.ir/workshop](http://www.sid.ir/workshop)