

## ارزیابی خصوصیات عملکردی مخلوط بازیافتی سرد با قیر امولسیون و افزودنی‌های شیمیایی

### مقاله علمی - پژوهشی

آذین چیت‌سازان\*، گروه ارزیابی و آمایش سرزمین، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

\*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: Chitsazan.az@gmail.com

دریافت: ۱۴۰۲/۱۰/۰۵ - پذیرش: ۱۴۰۳/۰۲/۲۵

صفحه ۳۴۷-۳۵۸

### چکیده

سه نوع افزودنی شیمیایی برای اصلاح مخلوط بازیافتی با قیر امولسیون استفاده شد. این افزودنی‌های شیمیایی عبارتند از سیمان پرتلند کامپوزیت<sup>۱</sup> (CPC)، آهک هیدراته<sup>۲</sup> (HL)، و ترکیبی از آهک هیدراته و سرباره کوره بلند بالاستی (GGBF). وجود افزودنی‌های مختلف در عملکرد مخلوط بازیافتی با آزمایش‌های حجمی و استحکام، آزمایش حساسیت رطوبتی، آزمایش شیارشدگی و آزمایش خمشی در دمای پایین مورد بررسی قرار گرفت. نتایج آزمایش نشان می‌دهد که بهبود عملکرد مخلوط بازیافتی امولسیونی به انواع و درصدهای افزودنی‌های شیمیایی بستگی دارد. چندین توصیه برای انتخاب مواد شیمیایی ارائه شده است.

واژه‌های کلیدی: آهک هیدراته، سیمان پرتلند، سرباره بالاستی، عملکرد، مخلوط بازیافتی

### ۱- مقدمه

گرفته می‌شود و با اتصال مواد برای طراحی مخلوط بازیافتی سرد تثبیت می‌شود. رایج‌ترین مواد تثبیت‌کننده برای مخلوط‌های بازیافت سرد، امولسیون‌های آسفالتی با درجه اختلاط هستند، زیرا در دمای محیط مایع هستند و می‌توانند به راحتی در سراسر مخلوط پراکنده شوند. قیر امولسیون برای تثبیت RAP با سابقه طولانی استفاده شده است. با این حال، هنوز برخی مشکلات در خواص عملکرد مخلوط بازیافت شده امولسیونی وجود دارد، به عنوان مثال، استحکام پایین در مراحل اولیه، مقاومت ناکافی در برابر خرابی رطوبت، و تغییر شکل دائمی (Cross et al, 2011). این کاستی‌ها از ویژگی شکستگی و پخت امولسیون آسفالت ناشی می‌شود. نشان داده شده است که امولسیون آسفالتی برای بازیابی خواص رئولوژیکی قیر قبل از امولسیون شدن نیاز به زمان پخت طولانی دارد از اوایل دهه ۱۹۷۰، بسیاری از مطالعات نشان داده‌اند که سیمان می‌تواند استحکام مکانیکی اولیه و خواص عملکرد مخلوط قیر امولسیون را بهبود بخشد (James et al, 2006; Quick

عملکرد روسازی آسفالت در سرویس‌دهی به تدریج به دلیل تکرار بار خودرو و عوامل محیطی بدتر می‌شود. هنگامی که وضعیت روسازی به حد غیرقابل قبولی می‌رسد، باید از روش‌های معقول بهسازی برای بازیابی عملکرد خود استفاده کند. علاوه بر مزایای زیست‌محیطی، فناوری‌های بازیافت روسازی، اختلالات ارزان‌تر، سریع‌تر و کم‌تری را جایگزین استراتژی‌های بازسازی مرسوم می‌کنند (Alkins et al, 2008). بازیافت سرد یکی از محبوب‌ترین روش‌های بازیافت روسازی است. در طی بازیافت سرد، روسازی آسفالت موجود توسط دستگاه فرز سرد پودر می‌شود. پیشنهاد می‌شود از روسازی آسفالت ۱۰٪ احیا شده (RAP)<sup>۳</sup> برای طراحی مخلوط بازیافتی سرد استفاده شود. در برخی موارد، از مصالح جدید نیز برای تنظیم دانه بندی RAP استفاده می‌شود. این سنگدانه‌های سست با مواد چسبنده تثبیت می‌شوند و بدون اعمال گرما در یک مسیر پایه از ساختار روسازی جدید مجدداً فشرده می‌شوند. به طور معمول، RAP به عنوان "سنگ سیاه" در نظر

مخلوط آسفالتی بازیافتی مستقیماً از بازیافت سرد در محل روسازی آسیب دیده به دست آمد. سطح RAP حاوی ۴/۲ درصد قیر بر حسب وزن RAP بود. رطوبت ۰.۹ RAP درصد وزن RAP بود. ویژگی‌های عملکردی قیر پیر شده در RAP در جدول ۱ ارائه شده است. حدود طراحی و دانه بندی مورد استفاده در این مطالعه در شکل ۱ نشان داده شده است. دانه بندی RAP در محدوده مورد نیاز از مشخصات بازیافت روسازی است. قیر امولسیون درجه اختلاط انتخاب شده امولسیون آسفالت کاتیونی کندگیر بود. خواص فیزیکی امولسیون در جدول ۲ ارائه شده است. مواد شیمیایی، از جمله آهک هیدراته (HL)، سیمان پرتلند کامپوزیت نوع II (CPC)، و سرباره کوره بلند دانه‌بندی شده (GGBF)، در ترکیب با قیر امولسیون استفاده شد. درصد CPC از ۱.۵٪ به ۳.۵٪ در فواصل ۱٪ بر اساس تجربه عملی اقتباس شد. در افزودنی‌های ترکیبی HL و GGBF، نسبت جرمی HL به ۳:۱ GGBF بود. سایر مواد افزودنی شیمیایی با توجه به نتایج آزمایش مخلوط با CPC انتخاب شدند. به منظور درک خواص فیزیکی و شیمیایی مواد افزودنی، سطح و مقدار متیلن بلو نیز در این مطالعه مورد آزمایش قرار گرفتند. خواص اساسی این مواد شیمیایی در جدول ۳ ارائه شده است.

(et al, 2011). با توسعه فن آوری بازیافت سرد، برخی از تحقیقات همچنین استفاده از سیمان را برای اصلاح مخلوط بازیافتی سرد با قیر امولسیون توصیه کردند. بهبود سیمان بر روی خواص عملکرد مخلوط بازیافتی امولسیون آسفالتی نیز توسط برخی مطالعات تایید شده است (Terrel et al, 1971; Brown et al, 2000). علاوه بر این، برخی از محققان استفاده از آهک هیدراته، خاکستر یا سایر مواد شیمیایی را برای افزایش خواص عملکرد مخلوط بازیافت شده امولسیونی پیشنهاد می کنند (Oruc et al, 2007; Miro et al, 2000). با این حال، هنوز در مورد اثر ترکیبی افزودنی های شیمیایی و قیر امولسیون در عملکرد مخلوط بازیافتی، درک کافی وجود ندارد. هدف از این تحقیق بررسی اثر افزودنی های شیمیایی مختلف بر روی خواص عملکردی مخلوط بازیافتی قیر امولسیون است. یک روش طراحی مخلوط بر اساس انتخاب درصد آب مخلوط بهینه و درصد امولسیون بهینه پیشنهاد شده است. عملکرد مخلوط های بازیافتی با آزمون استحکام کششی غیرمستقیم (ITS)، آزمون حساسیت به رطوبت، آزمون مقاومت شیارشدگی و آزمون خمشی در دمای پایین مورد ارزیابی قرار گرفت.

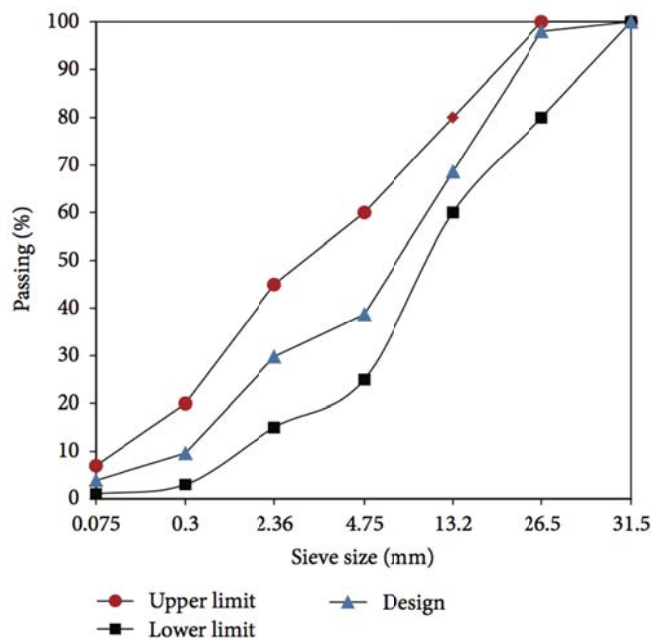
## ۲- مواد و مصالح

جدول ۱. خصوصیات قیر

نتایج	استاندارد	خصوصیات
۶۵	ASTM D36	نقطه نرمی
۳.۸	ASTM D113	شکل پذیری در ۱۵ درجه
۲۷	ASTM D5	درجه نفوذ
۰	-	شکل پذیری در ۵ درجه

جدول ۲. خصوصیات قیر امولسیون

نتایج	خصوصیت
۵۸	باقیمانده از تقطیر
۰.۰۶	آزمایش الک ۱.۱۸٪
۰.۱	پایداری ذخیره سازی
۵.۱۱	pH
۵۹	درجه نفوذ
۷۲	شکل پذیری
۴۸	نقطه نرمی



شکل ۱. دانه بندی مصالح RAP

جدول ۳. خصوصیات افزودنی‌های شیمیایی

نوع افزودنی	وزن مخصوص	سطح مخصوص	CaO	SiO <sub>2</sub>
CPC	۲.۸۸۲	۴.۲۵۳	۱۴.۶	۵۲.۸
HL	۲.۳۲۷	۷.۰۲۵	۶۲.۴	-
GGBF	۲.۳۸۳	۶.۴۱۱	۳۹.۴	۳۴.۳

## ۲-۲- طرح اختلاط

آزمایش عملکرد در دمای اتاق خنک شدند. مهم‌ترین مراحل روش‌های فوق، تعیین درصد بهینه آب پیش مخلوط <sup>۱</sup> (OPWC) و درصد بهینه امولسیون<sup>۲</sup> (OEC) بود. OPWC همراه با آب در امولسیون و درصد آب در RAP متفاوت است. از آنجایی که قطرات قیر در امولسیون در دمای اتاق در حالت جامد یا نیمه جامد است، منطقی است که نتیجه بگیریم که درصد آب بر کارایی و تراکم پذیری مخلوط غالب است. هنگامی که دانه بندی RAP، انواع افزودنی‌های شیمیایی و درصد آن ثابت است، مناسب است فرض کنیم که مجموع OPWC و آب در قیر امولسیون ثابت است. به منظور تعیین- OPWC، قیر امولسیون ۴ درصد وزن RAP در نظر گرفته شد. مخلوط با درصدهای آب پیش مخلوط از ۱.۵٪ تا ۳.۵٪ در فواصل ۰.۵٪ تهیه شد. یک مطالعه نشان داد که OPWC مخلوط قیر امولسیون مربوط به حداکثر چگالی کمی بیشتر از

اگرچه روش طراحی مخلوط پذیرفته شده جهانی برای مخلوط بازیافتی قیر امولسیون در حال حاضر در دسترس نیست، دستورالعمل‌هایی توسط چندین آژانس بر اساس آزمایش‌های آزمایشگاهی تهیه شده است (Kumar et al, 2008). در این مطالعه، مخلوط‌های بازیافتی با استفاده از روش طراحی مخلوط حجمی اصلاح شده مارشال طراحی شدند. در طول اختلاط مخلوط‌های بازیافتی، آب پیش مخلوط قبل از افزودن امولسیون آسفالت در RAP اضافه شد. مواد شیمیایی متفاوتی برای تولید مخلوط اضافه شد. نمونه‌ها با ۷۵ ضربه در هر طرف با چکش مارشال آماده شدند. تمام نمونه‌های فشرده شده در قالب قرار گرفتند و به مدت ۲۴ ساعت در دمای اتاق پخت شدند. پس از پخت اولیه، نمونه‌ها قالب‌گیری شدند و در آون فشاری در دمای ۶۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۷۲ ساعت پخت شدند. نمونه‌های پخت شده حداقل ۲۴ ساعت قبل از

مقاومت در برابر رطوبت مخلوط‌های بازیافتی طراحی شده اولیه باید با آزمایش حساسیت به رطوبت بررسی شود. در این مطالعه، مقاومت رطوبتی با استفاده از آزمون ITS تر شده و آزمون ذوب یخ زده ITS، که هر دو به طور گسترده برای مشخص کردن مقاومت رطوبت مخلوط آسفالت داغ مورد استفاده قرار می‌گیرند، ارزیابی شد. یک مطالعه همچنین ارزیابی مقاومت در برابر رطوبت مخلوط امولسیون آسفالت سرد را با این دو روش توصیه کرد. حساسیت به رطوبت مخلوط بازیافتی با تست ITS تر شده و تست چرخه ذوب انجماد ارزیابی شد. فضای خالی هوای نمونه‌ها برابر با نتایج طراحی مخلوط بود. برای آزمایش ITS خیس شده، نمونه‌ها به مدت ۲۳ ساعت در حمام آب ۲۵ درجه سانتیگراد خیس شدند و سپس به مدت ۱ ساعت در آب ۱۵ درجه سانتیگراد غوطه ور شدند. آسیب رطوبت با استفاده از نسبت استحکام کششی خیس شده (TSR)<sup>۸</sup> که به عنوان نسبت درصد مقاومت کششی خیس شده به خشک در دمای ۱۵ درجه سانتیگراد تعریف شد، ارزیابی شد. برای ارزیابی مقاومت آسیب ذوب یخ زدگی، ۵۵ تا ۸۸ درصد فضاهای خالی هوا در نمونه‌ها باید با آب پاک شوند. نمونه‌های پیچیده شده با یک چرخه ذوب انجماد ساخته شدند. در نهایت، نمونه‌های تهویه شده و بدون شرط به مدت ۲ ساعت در حمام آب ۲۵ درجه سانتیگراد قرار گرفتند. همه نمونه‌ها با آزمون ITS ۲۵ درجه سانتیگراد با سرعت ۵۰ میلی متر در دقیقه آزمایش شدند. مشابه TSR خیس شده، TSR ذوب یخ زده به عنوان نسبت درصد ITS مرطوب به ITS خشک تعیین شد.

### ۳-۲- تست شیار جای چرخ

آزمایش‌های شیار جای چرخ برای ارزیابی پایداری مخلوط آسفالت متخلخل در دمای بالا انجام شد. تست شیار جای چرخ در دمای ۶۰ درجه سانتیگراد بر روی نمونه‌های مستطیلی، با ابعاد ۳۰۰×۵۰×۲۰۰ انجام شد. تکرارهای برای هر آزمایش استفاده می‌شود و داده‌های نهایی میانگین ارزش هر آزمایش است.

### ۳-۳- تست تیر خمشی در دمای پایین

آزمایش تیر خمشی دمای پایین برای ارزیابی مقاومت ترک خوردگی در دمای پایین مخلوط آسفالت متخلخل استفاده شد. نمونه‌هایی که تیرهای مستطیلی ۳۰ × ۳۵ × ۲۵۰ میلی‌متر

OPWC مربوط به حداکثر ITS است. با توجه به اینکه آب آزاد اضافه شده تأثیر نامطلوبی بر عملکرد مخلوط بازیافتی دارد، OPWC بر اساس حداکثر ITS برای یک مخلوط معین با قیر امولسیون ۴ درصد تعیین شد. بدیهی است که OPWC زمانی که درصد امولسیون ۴٪ نبود باید تنظیم شود. برای تعیین OEC، مخلوط‌های بازیافتی با درصد امولسیونی از ۳،۰٪ تا ۵،۵٪ در فواصل ۰،۵٪ آماده شدند. به طور همزمان، OPWC با توجه به درصد امولسیون تنظیم شد. پس از پخت، ITS نمونه‌ها مورد آزمایش قرار گرفتند OEC به عنوان محتوای امولسیونی تعیین شد که با حداکثر ITS برای یک مخلوط معین مطابقت داشت. هنگامی که OEC تعیین شد، OPWC مربوطه را می‌توان به راحتی بر اساس فرض فوق محاسبه کرد.

برای هر ماده شیمیایی، OEC و OPWC باید قبل از آماده سازی نمونه‌ها طبق رویه‌های طراحی توصیف شده تعیین شوند. تراکم و پخت، خواص حجمی و عملکرد مخلوط‌های بازیافتی مورد بررسی قرار گرفت. حجم و حداکثر وزن نمونه‌های مخلوط با روش آب بندی خلاء در دمای ۲۵ درجه سانتیگراد اندازه گیری شد. ابتدا نمونه‌ها را در آب ۱۵ درجه سانتیگراد به مدت ۱ ساعت غوطه‌ور کنید تا دمای آزمایش یکنواخت حاصل شود، آزمایش کشش غیر مستقیم (ITS) بلافاصله انجام شد.

## ۳- برنامه آزمایشگاهی

### ۳-۱- حساسیت رطوبتی

خرابی رطوبتی در روسازی آسفالت به عنوان یکی از مشکلات عمده مهندسی روسازی در سراسر جهان در نظر گرفته شده است. در مخلوط آسفالت داغ، رطوبت موجود در حفره‌های هوا، پیوند مشترک بین قیر و سنگدانه‌ها را تخریب می‌کند و حتی منجر به جدا شدن قیر از سطوح سنگدانه می‌شود. در طول طراحی مخلوط بازیافت شده امولسیونی، آب به سنگدانه‌ها وارد شد تا کارایی مخلوط افزایش یابد. سنگدانه‌های مرطوب، آب اضافه شده و آب موجود در امولسیون بر چسبندگی ماستیک آسفالت و چسبندگی سنگدانه ماستیک تأثیر نامطلوبی دارد. شکست چسبندگی و چسبندگی منجر به آسیب رطوبت می‌شود. برای مبارزه با آسیب رطوبت، توانایی بالقوه

اندازه‌گیری شد. تکرارهای برای هر آزمایش استفاده می‌شود و داده‌های نهایی میانگین ارزش هر آزمایش است. کرنش خمشی طبق رابطه زیر محاسبه شد:

$$\varepsilon_B = \frac{6hd}{L^2}$$

بودند، برای تعیین کرنش خمشی در دمای ۱۰- درجه سانتی‌گراد با نرخ بارگذاری ۵۰ میلی‌متر در دقیقه تا شکست ترک، و بار و انحراف در مرکز آزمایش شدند. نمونه‌های تیر (۱)

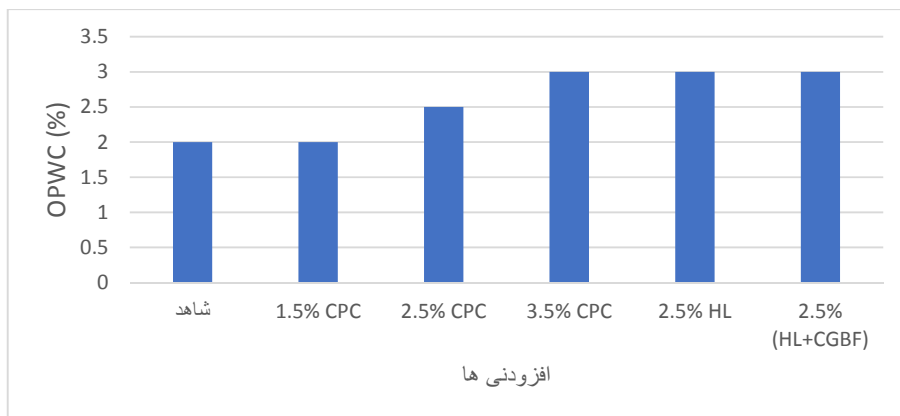
#### ۴- نتایج و بحث

##### ۴-۱- نتایج طرح اختلاط

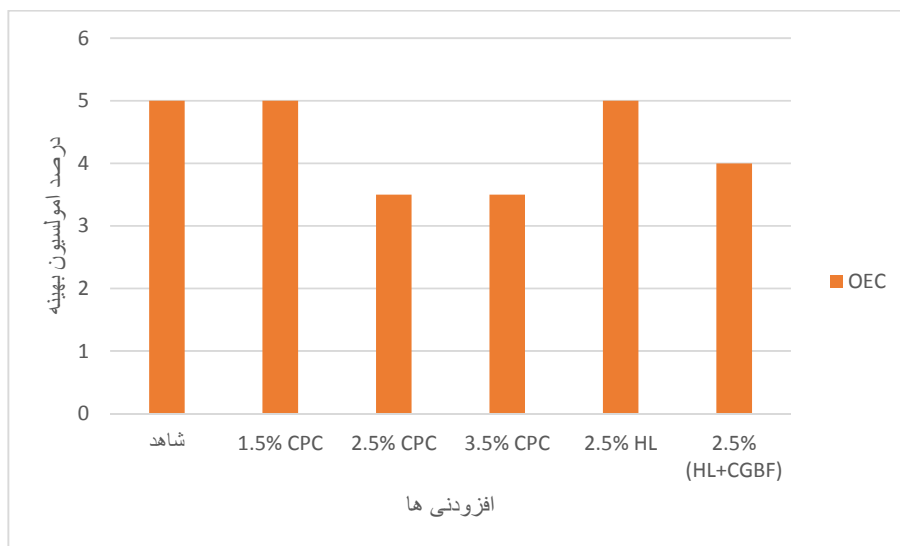
که درصد سیمان بر حسب ترکیب بهینه و مقاومت مکانیکی مخلوط بازیافتی با امولسیون آسفالتی است. بر اساس مقادیر کمتر OEC و مقادیر بالاتر ITS، پیشنهاد می‌شود از ۲٫۵٪ CPC برای اصلاح مخلوط کنترل استفاده شود. هدف دیگر این مطالعه مقایسه اثر افزودنی‌های مختلف بر عملکرد مخلوط بازیافتی است. از آنجایی که مقدار CPC تعیین شده اولیه ۲٫۵٪ است، سایر افزودنی‌های شیمیایی نیز همین محتوا را پذیرفته‌اند. نتایج طراحی مخلوط بازیافتی با افزودنی‌های شیمیایی متفاوت در جدول ۴ ارائه شده است. منجر به OPWC بسیار بالاتری در مخلوط می‌شود. علاوه بر این، جذب شیمیایی بین قیر و HL باعث بهبود چسبندگی ماستیک قیر و رابط RAP می‌شود. مخلوط کنترل ۱۷ درصد افزایش یافته است. با این حال، بهبود ۲٫۵٪ HL در ITS حتی کمتر از ۱٫۵٪ CPC است. این بدان معنی است که CPC ماده بهتری برای بهبود ITS نسبت به HL است. هنگامی که HL و GGBF با امولسیون آسفالت ترکیب می‌شوند، OPWC مخلوط کنترل افزایش یافته و OEC کاهش می‌یابد.

پدیده‌ای شبیه به استفاده از CPC است. علاوه بر این، مقدار ITS مخلوط بازیافتی با HL و GGBF به مقدار مخلوط با CPC نزدیک می‌شود. یک مطالعه نشان داده است که توانایی سیمانی بالقوه GGBF را می‌توان با HL فعال کرد. محصولات هیدراتاسیون از GGBF همچنین می‌توانند عملکرد قیر و مخلوط بازیافتی را مانند اینها از CPC تغییر دهند.

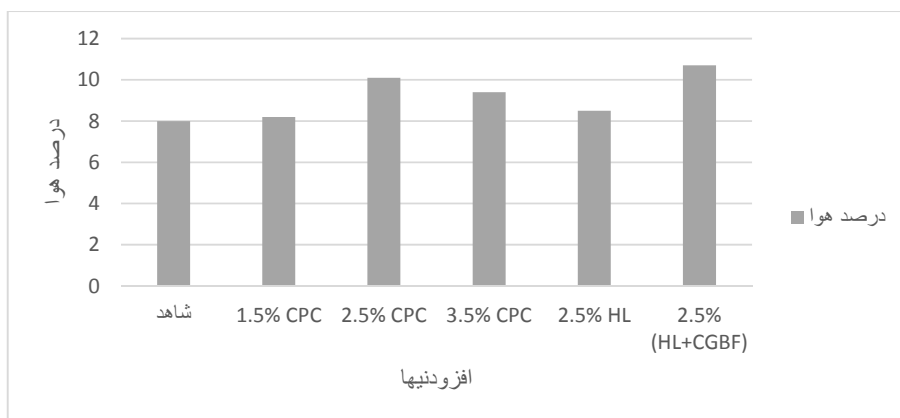
مخلوط شاهد از ۱۰۰٪ RAP و قیر امولسیون تشکیل شده است. افزودنی‌های شیمیایی برای جایگزینی همان وزن RAP با عبور از اندازه الک ۰٫۰۷۵ میلی‌متر معرفی شدند. OPWC و OEC مخلوط‌های بازیافتی با افزودنی‌های شیمیایی متفاوت، هر دو با آزمون ITS تعیین شدند. درصد خالی هوای مخلوط‌ها با نتایج آزمون وزن مخصوص توده و حداکثر وزن مخصوص نظری محاسبه شد. نتایج آزمون OEC، OPWC، ITS و درصد خالی در شکل‌های ۲-۵ نشان داده شده است. هنگامی که ۱٫۵٪ CPC استفاده می‌شود، OPWC و OEC مخلوط بازیافتی مانند مخلوط کنترل است. با افزایش درصد - CPC، آب پیش مخلوط بیشتری مورد نیاز است زیرا برهمکنش بین سیمان و امولسیون باعث افزایش کارایی مخلوط می‌شود. بنابراین، OPWC مخلوط با ۲٫۵٪ CPC در مقایسه با مخلوط با ۱٫۵٪ CPC افزایش می‌یابد. علاوه بر این، OEC مخلوط به وضوح کاهش می‌یابد که درصد CPC ۲٫۵٪ باشد OPWC. بالاتر منجر به افزایش فضای خالی هوا می‌شود، بنابراین OEC پایین‌تر نیز می‌شود. یک مطالعه نشان داده است که محصولات هیدراتاسیون در ماستیک کامپوزیت امولسیونی سیمان و آسفالت وجود دارد (Tomas et al 2000). نشان می‌دهد که محصول هیدراتاسیون در آسفالت به عنوان عامل اتصال دهنده عمل می‌کند و نیاز OEC را کاهش می‌دهد. از نتایج آزمایش ITS در شکل ۵، مشخص شده است که ITS مخلوط‌های کنترل تا ۳۵٪ با اضافه کردن ۱٫۵٪ CPC بهبود می‌یابد. علاوه بر این، بین محتوای ITS و CPC همبستگی مثبت و معناداری وجود دارد. در تئوری، محصولات هیدراتاسیون موجود در ماستیک آسفالت سیمانی می‌توانند عملکرد قیر را تغییر دهند. بنابراین، نتیجه این است



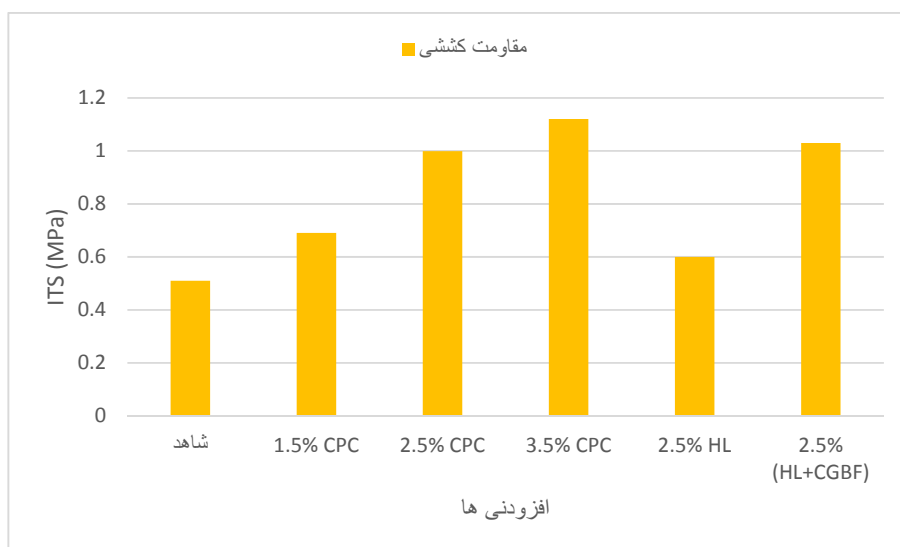
شکل ۲. نتایج درصد آب بهینه



شکل ۳. درصد امولسیون بهینه



شکل ۴. درصد هوا

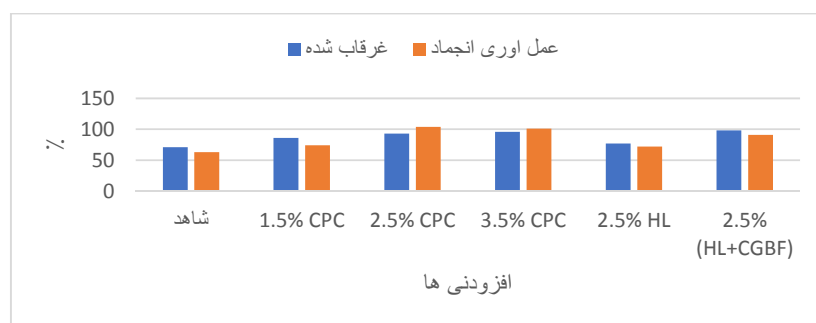


شکل ۵. مقاومت کششی نمونه‌ها

#### ۴-۲- حساسیت رطوبتی

حال، مقادیر ITS و TSR مخلوط با ۲٫۵٪ HL و امولسیون کمتر از مقادیر مخلوط با امولسیون و ۱٫۵٪ CPC است. نشان می‌دهد که HL به عنوان یک افزودنی آسیب ضد رطوبت نسبت به CPC پایین‌تر است. هنگامی که HL و GGBF در ترکیب با امولسیون استفاده می‌شوند، مقادیر ITS و TSR مخلوط نزدیک به مقادیر مخلوط بازیافتی با ۲٫۵٪ CPC است (Niazi et al, 2009). این نتایج نشان می‌دهد که توانایی مقاومت در برابر رطوبت مخلوط کنترل به طور قابل توجهی با ترکیبی از HL و GGBF بهبود می‌یابد. اصلاح محصولات هیدراتاسیون روی قیر امولسیون به مراتب برتر از جذب فیزیکی و شیمیایی بین امولسیون آسفالت و HL است. بنابراین، برای بهبود مقاومت در برابر رطوبت، موثرترین افزودنی CPC یا ترکیبی از HL و GGBF است.

نتایج آزمایش مقاومت در برابر رطوبت در جدول ۴ ارائه شده است. درصد TSR مرطوب شده و ذوب-یخ زده TSR با استفاده از تعریف قبلی محاسبه شده و در شکل ۶ نشان داده شده است. الزامات توصیه می‌کند که درصد TSR مرطوب شده و ذوب منجمد باید به ترتیب بالاتر از ۷۵٪ و ۷۰٪ باشد. برای مخلوط بازیافتی فقط با قیر امولسیون، نمی‌تواند نیاز مشخصات مقاومت در برابر رطوبت را برآورده کند. هنگامی که CPC در ترکیب با قیر امولسیون استفاده می‌شود، هم درصد TSR مرطوب شده و هم TSR ذوب یخ‌زده مخلوط کنترل بهبود می‌یابد. مقادیر TSR در شکل ۶ به وضوح نشان می‌دهد که توانایی مقاومت در برابر رطوبت مخلوط بازیافتی زمانی که تنها ۱٫۵٪ CPC اضافه شود، نیاز مشخصات را برآورده می‌کند. نتایج TSR مخلوط بازیافتی با HL نیز نیاز مقاومت در برابر رطوبت را برآورده می‌کند. با این



شکل ۶. نتایج TSR نمونه‌ها

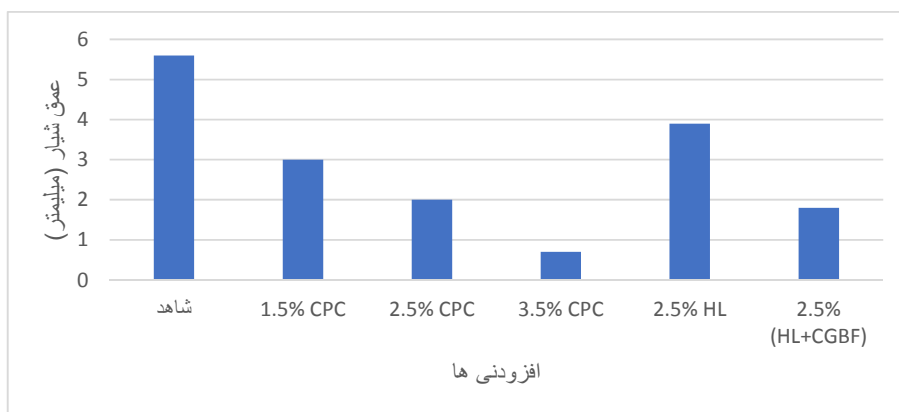
جدول ۴. نتایج حساسیت رطوبتی نمونه‌ها

افزودنی‌ها	خشک ITS	مرطوب ITS	بدون ذوب و یخ ITS	با ذوب و یخ ITS
شاهد	۰.۵۲	۰.۳۷	۰.۲۹	۰.۱۹
۱.۵% CPC	۰.۷۱	۰.۶۱	۰.۵۱	۰.۳۹
۲.۵% CPC	۰.۹۷	۰.۹۳	۰.۸۴	۰.۸۷
۳.۵% CPC	۱.۱۳	۱.۰۸	۰.۹۲	۰.۹۳
۲.۵% HL	۰.۶۱	۰.۴۷	۰.۳۵	۰.۲۵
۲.۵% (HL+CGBF)	۱.۰۴	۱.۰۲	۰.۸۲	۰.۷۷

#### ۴-۳- شیارشدگی

اما بهبود ۲,۵ HL % در مقاومت شیارشدگی همچنان کمتر از ۱,۵ CPC % است. هنگامی که HL و GGBF به صورت ترکیبی استفاده می شوند، عمق شیار تقریباً ۶۷٪ کاهش می‌یابد. بنابراین، مؤثرترین افزودنی برای مقاومت شیاردار CPC یا ترکیبی از HL و GGBF است. نتیجه گیری با نتایج ITS و حساسیت به رطوبت مطابقت دارد.

نتایج آزمایش شیارشدگی در شکل ۷ ارائه شده است. عمق شیار با درصد CPC نسبت معکوس دارد. برای مخلوط با ۲,۵ CPC % عمق شیار در مقایسه با مخلوط شاهد ۴۵٪ کاهش می‌یابد. برای مقایسه CPC با سایر مواد، درصد هر افزودنی شیمیایی ۲,۵ درصد تعیین شده است. هنگامی که HL اتخاذ می شود، عمق شیار مخلوط کنترل ۳۰٪ کاهش می‌یابد.



شکل ۷. عمق شیار نمونه‌ها

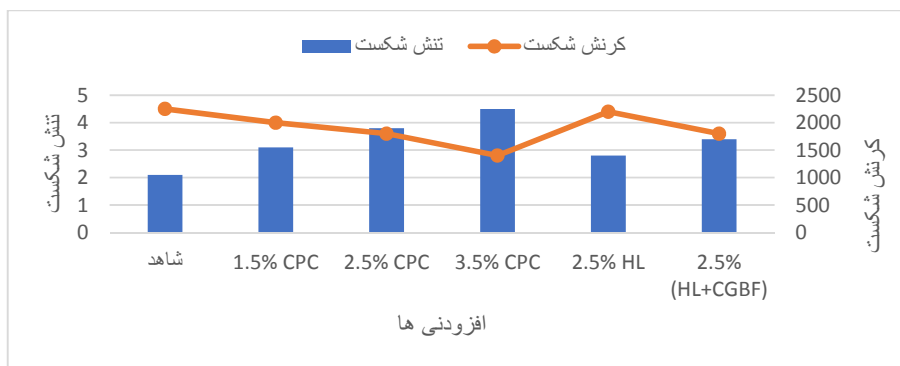
#### ۴-۴- آزمایش خمشی دمای پایین

بنابراین، ارزیابی اثر افزودنی‌های شیمیایی بر مقاومت ترک خوردگی مخلوط بازیافتی امولسیون‌ی تنها بر اساس تنش شکست یا کرنش شکست دشوار است. روند متفاوتی برای نتایج چگالی انرژی شکست در شکل ۵ نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که چگالی انرژی شکست متناسب با محتوای CPC است. حداکثر چگالی انرژی شکست در ۲,۵ CPC %

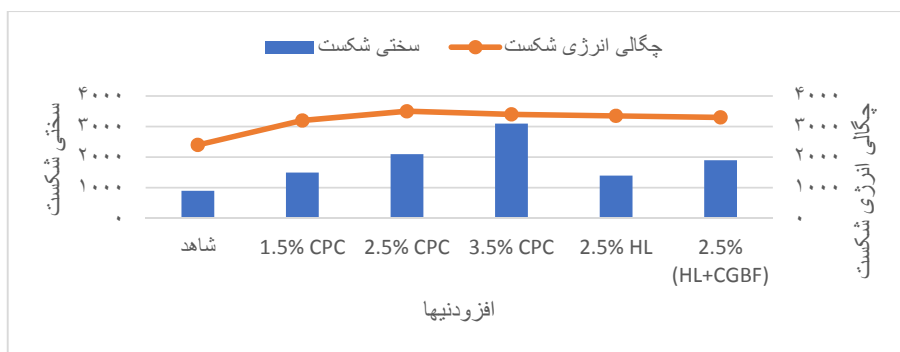
نتایج آزمایش در شکل‌های ۸ و ۹ نشان داده شده است. نتایج در شکل ۸ نشان می‌دهد که تنش شکست مخلوط کنترل بهبود یافته است اما کرنش شکست با افزایش محتوای CPC کاهش می‌یابد. دلیل این است که سفتی مخلوط کنترل در شکل ۹ به وضوح توسط CPC بهبود یافته است. HL یا ترکیبی از HL و GGBF نیز روند مشابه CPC را به همراه دارد.

امولسیون‌ها را بر اساس نتایج چگالی انرژی شکست تغییر دهند. لازم است بررسی مقاومت در برابر ترک خوردگی مخلوط بازیافتی با مفهوم انرژی شکست ادامه یابد.

به دست می‌آید. هنگامی که از افزودنی‌های شیمیایی مختلف استفاده می‌شود، چگالی انرژی شکست مخلوط کنترل نیز به طور قابل توجهی بهبود می‌یابد. بنابراین، افزودنی‌های شیمیایی می‌توانند مقاومت ترک خوردگی مخلوط بازیافتی



شکل ۸. تنش و کرنش شکست



شکل ۹. سختی شکست و چگالی انرژی شکست

## ۵- نتیجه گیری

ویژگی مخلوط کنترل را در سطوح مختلف بهبود بخشید. برای ضد خراشیدگی و آسیب رطوبتی مخلوط کنترل، استفاده از CPC یا ترکیبی از HL و GGBE پیشنهاد می‌شود. این دو افزودنی شیمیایی هر دو بسیار برتر از HL هستند. تنش شکست خمشی در دمای پایین مخلوط کنترل افزایش می‌یابد. اما، با افزایش درصد CPC یا استفاده از سایر افزودنی‌های شیمیایی، کرنش و سفتی شکست کاهش می‌یابد. با این حال، چگالی انرژی شکست مخلوط کنترل حداکثر مقادیر را با ۲,۵٪ CPC نشان می‌دهد. همچنین با افزودن مواد افزودنی شیمیایی بهبود می‌یابد. پیش از این، ارزیابی مقاومت ترک خوردگی مخلوط‌ها با افزودنی‌های شیمیایی با مفهوم انرژی شکست توصیه می‌شود.

بحث و تحلیل نتایج به نتایج زیر منجر می‌شود:  
 - نتایج بهینه مخلوط از مخلوط کنترل توسط درصدهای CPC و انواع افزودنی‌های شیمیایی ایجاد می‌شود. درصد CPC مناسب می‌تواند درصد قیر را کاهش دهد و ITS مخلوط کنترل را به طور قابل توجهی بهبود بخشد. هنگامی که ترکیبی از HL و GGBF با درصد مشابه CPC به مخلوط کنترل اضافه شود، نتیجه می‌توان یافت. پیش از این، نتیجه‌گیری می‌شود که محصولات هیدراتاسیون از CPC یا ترکیبی از HL و GGBF به عنوان ماده چسبنده اضافی در مخلوط بازیافتی قیر امولسیون عمل می‌کنند.  
 - توانایی مقاومت در برابر رطوبت و توانایی مقاومت در برابر شیار شدن مخلوط بازیافت شده امولسیون با درصد CPC متناسب بود. ترکیبی از HL و GGBF می‌تواند این دو

- 1- Composite Portland Cement
- 2- Hydrated Lime
- 3- Ground-Granulated Blast-Furnace Slag
- 4- Reclaimed Asphalt Pavement
- 5- Indirect Tensile Strength
- 6- Optimum Premix Water Content
- 7- Optimum Emulsion Content
- 8- Tensile Strength Ratio

۷-مراجع

- asphalt pavements. Design procedure and improvements achieved. *Materials and Structures*, Vol. 33, No. 229, 324–330.
- Niazi .Y. and M. Jalili, (2009). Effect of Portland cement and lime additives on properties of cold in-place recycled mixtures with asphalt emulsion. *Construction and Building Materials*, Vol. 23, No. 3, 1338–1343.
- Oruc. S., F. Celik, and M.V. Akpınar (2007). Effect of cement on emulsified asphalt mixtures. *Journal of Materials Engineering and Performance*, Vol. 16, No. 5, 578–583.
- Quick. T. and W. S. Guthrie (2011). Early-age structural properties of base material treated with asphalt –emulsion. *Transportation Research Record*, Vol. 2253, 30–40.
- Terrel. R. L. and C. K. Wang (1971). Early curing behavior of cement modified asphalt emulsion mixtures. *Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists*, Vol. 40, 108–125.
- Tomas, A. Kadrmas, and J. Hu man. (2000). Cold in-place recycling on us-283 in Kansas. *Transportation Research Record*, Vol. 1723, 53–56.
- Alkins. A. E., B. Lane, and T. Kazmierowski, (2008). Sustainable pavements: environmental, economic, and social benefits of in situ pavement recycling. *Transportation Research Record*, Vol. 2084, 100–103.
- Brown. S. F. and D. Needham (2000). A study of cement modified bitumen emulsion mixtures in Asphalt Paving Technology. 92–121, usa, March.
- Cross. S., W.Chesner, H.Justus, and E. Kearney (2011). Life-cycle environmental analysis for evaluation of pavement rehabilitation options. *Transportation Research Record*, Vol. 2227, 43–52.
- James. A., Overview of Asphalt Emulsion, (2006). Asphalt Emulsion Technology, Transport Research Circular no. E-C102. *Transportation Research Board*, Washington, DC, USA.
- Kumar. K. C., D. S. N. V. Amar Kumar, R. M. Amaranatha, and R. K. Sudhakar (2008). Investigation of cold-in-place recycled mixes in India. *International Journal of Pavement Engineering*, Vol. 9, No. 4, 265–274.
- Miro. R. Miro Recasens, F. E. Pérez Jimenez, and S. Castillo Aguilar (2000). Mixed recycling with emulsion and cement of

# **Evaluation of Performance Characteristics of Cold Recycled Mix with Emulsion Bitumen and Chemical Additives**

*Azin Chitsazan, Department of Land Use Planning and Assessment, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran.*

*E-mail: Chitsazan.az@gmail.com*

Received: February 2024- Accepted: June 2024

## **ABSTRACT**

Three types of chemical additives were used to modify the recycled mixture with emulsion bitumen. These chemical additives are composite port land cement (CPC), hydrated lime (HL), and a combination of hydrated lime and ballast blast furnace slag (GGBF). The presence of different additives in the performance of the recycled mixture was investigated by volume and strength tests, humidity sensitivity test, rutting test and bending test at low temperature. The test results show that the performance improvement of emulsion recycled mixture depends on the types and percentages of chemical additives. Several recommendations are given for the selection of chemicals.

**Keywords:** Hydrated Lime, Portland Cement, Ballast Slag, Performance, Recycled Mix