

بررسی خصوصیات دوامی مخلوط‌های اساسی تثبیت‌شده با سیمان حاوی تراشه آسفالت در سیکل‌های تر و خشک شدن

مصطفی آدرسی^{۱*}، مصطفی وامق^۲، مهدی ابراهیم‌زاده شیراز^۳

^۱ استادیار دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی، تهران

^۲ استادیار گروه مهندسی عمران، واحد تهران جنوب، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران

^۳ دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران

دریافت: ۹۸/۱۰/۱۰، بازنگری: ۱۴۰۰/۱/۱۳، پذیرش: ۱۴۰۰/۲/۱۳، نشر آنلاین: ۱۴۰۰/۲/۱۳

چکیده

در حال حاضر استفاده از مصالح تراشه آسفالتی به‌عنوان مصالحی ارزشمند در ساخت روسازی‌های آسفالتی جدید و یا استفاده از آن‌ها در لایه‌های مختلف روسازی مانند لایه اساس به‌منظور کاهش هزینه‌های ساخت و همچنین کنترل آلودگی محیط‌زیست مورد توجه است. از طرفی مهم‌ترین مواردی که اکثر محققین حاضر به آن توجه دارند، دوام این‌گونه روسازی‌ها است. اهمیت این موضوع از آنجایی نشئت می‌گیرد که روسازی بادوام منجر به کاهش هزینه‌های ترمیم و نگهداری و در کل کاهش نسبت مخارج روسازی می‌شود. هدف از این مقاله بررسی معیارهای مختلف دوام مخلوط‌های تثبیت‌شده اساس با سیمان حاوی مقادیر مختلف تراشه آسفالت است. در این راستا نمونه‌های مقاومت فشاری و کششی غیرمستقیم در درصد‌های مختلف وزنی تراشه آسفالت شامل ۰٪، ۴۰٪، ۶۰٪ و ۸۰٪ و در درصد‌های مختلف وزنی سیمان شامل ۳٪، ۵٪ و ۷٪ ساخته شد. سپس مقاومت فشاری محدود نشده ۷ و ۲۸ روزه، مقاومت کششی غیرمستقیم ۷ روزه و آزمایش تر و خشک شدن بر روی آن‌ها انجام شد و بر اساس معیارهای مختلف دوامی مانند نسبت مقاومت کششی غیرمستقیم مرطوب به خشک، TSR (Tensile Strength Ratio)، حداکثر مقاومت فشاری به‌منظور کنترل صلبیت لایه تثبیت‌شده، درصد افت وزنی نمونه‌های تثبیت‌شده، درصد تغییرات حجمی نمونه و درصد تغییرات مقاومت فشاری بعد از ۱۲ سیکل تر و خشک شدن نمونه‌ها، سعی شد تا درصد بهینه تراشه آسفالت تعیین گردد. بر این اساس اضافه شدن مقدار پیشنهادی ۴۰ تا ۶۰ درصد تراشه آسفالت به مخلوط اساس تثبیت‌شده با سیمان برای تغییر رفتار لایه تثبیت‌شده از صلب به انعطاف‌پذیر و بهبود عملکرد دوامی این‌گونه مخلوط‌ها توصیه می‌شود.

کلیدواژه‌ها: تراشه آسفالت، مقاومت فشاری، مقاومت کششی، دوام مخلوط.

۱- مقدمه

سطحی روسازی آسفالتی، بازیافت گرم، بازیافت گرم درجا، بازیافت سرد، بازیافت عمقی روسازی تعریف می‌گردد (Basic Asphalt Recycling Manual، ۲۰۰۱). عملیات تراش دادن قشر رویه روسازی‌های آسفالتی، بسته به نظر طراح، در ضخامت‌های متفاوتی انجام می‌گیرد.

استفاده از تراشه‌های بازیافتی آسفالت نه تنها در فرایند تثبیت عمقی روسازی مضمحل شده که در بهبود خواص خاک بستر (Adresi و Ghafarpur Jahromi، ۲۰۲۲) و همچنین تهیه رویه آسفالتی (Ahmadi و همکاران، ۲۰۱۷) یا حتی بتنی (Adresi و

از جمله مواردی که در چند دهه اخیر در عملیات ساخت و بهسازی روسازی‌ها مورد توجه قرار گرفته است، استفاده از مصالح بازیافتی قشر رویه در ساخت و بهسازی روسازی‌های می‌باشد (Hot Recycling of Yesterday، ۱۹۷۷). این کار از طریق خردایش قشر رویه مضمحل‌شده انجام می‌گیرد. در روسازی‌های آسفالتی، عملیات یادشده از طریق ماشین‌آلات آسفالت تراش صورت می‌گیرد. بر همین اساس مؤسسه راه‌های ایالتی (FHWA)^۱، پنج نوع عملیات بازیافت روسازی شامل تراش کنترل‌شده و

1. Federal Highway Administration

* نویسنده مسئول؛ شماره تماس: ۰۲۱-۲۲۹۷۰۰۲۱

Luو همکاران (۲۰۲۱) دریافتند استفاده از مصالح بازیافتی با توجه به این که این گونه مصالح از جذب آب بالایی برخوردار می باشد، خصوصیات دوامی مخلوط های سیمانی را کاهش می دهد. Adresi و همکاران (۲۰۱۷) با بررسی رفتار اساس تثبیت شده با مقادیر متفاوت سیمان حاوی مقادیر متفاوت تراشه آسفالت و در نظر گرفتن اثرات دما و رطوبت بر رفتار مکانیکی مخلوط های تثبیت شده دریافتند که با افزایش تراشه آسفالت چگالی خشک مخلوط به صورت خطی کاهش می یابد. همچنین مطالعات نشان داد که با افزایش درصد تراشه آسفالت در مخلوط با شرایط بحرانی مرطوب ۲۵ درجه سانتی گراد و خشک ۵۰ درجه سانتی گراد، مقاومت فشاری محدود نشده و مقاومت کششی غیرمستقیم مخلوط های تثبیت شده کاهش می یابد (Adresi و همکاران، ۲۰۱۷؛ Adresi، Zini و Adresi، ۲۰۱۷، ۲۰۲۱).

در این راستا، محدوده مجاز مقاومت فشاری محدود نشده بین ۳۰۰ (۲/۱MPa) تا ۵۰۰ (۳/۵MPa) PSI در بین مراجع مختلف پیشنهاد شده است (PCA، ۲۰۰۵؛ Abdo، ۲۰۰۹؛ Yuan و همکاران، ۲۰۱۰) بر این اساس حداکثر ۵۰۰ (۳/۵MPa) PSI به منظور کنترل صلیبیت لایه تثبیت شده و جلوگیری از بروز ترک در لایه تثبیت شده و کاهش ریسک ترک انعکاسی در لایه رویه تعیین شده است (Little و همکاران، ۱۹۹۵؛ Wen و همکاران، ۲۰۱۴). همچنین اداره حمل و نقل ایالتی نگزاس این مقدار را بین ۳۰۰ (۲/۱MPa) تا ۴۰۰ (۲/۸MPa) PSI بیان نموده است (Miller و همکاران، ۲۰۰۶؛ Brown، ۲۰۰۶). برای کنترل دوام این لایه های تثبیت شده، روش های مختلفی از قبیل آزمایش های تر و خشک شدن، ذوب و یخ، حساسیت رطوبتی و فرسایش پذیری پیشنهاد شده است (Luو همکاران، ۲۰۲۱).

Guthrie و همکاران، (۲۰۰۱) مقدار سیمان مناسب در طرح مخلوط اساس تثبیت شده حاوی سیمان را بر اساس مقاومت فشاری محدود نشده به دست آوردند و مقدار سیمانی که حداقل دوام قابل قبول را تأمین می نمود را به عنوان سیمان نهایی انتخاب کردند. همچنین از نسبت نتایج آزمایش های مقاومت کششی غیر-مستقیم در دو وضعیت خشک و مرطوب به عنوان یک شاخص که نشان دهنده حساسیت رطوبتی (TSR)^۴ و دوام مخلوط ها می باشد، می توان بهره جست (Xiao و همکاران، ۲۰۱۸). این شاخص نشان-دهنده میزان کاهش مقاومت مخلوط های تثبیت شده بر اساس جذب آب موئینه است. بر این اساس Niazی و همکاران (۲۰۰۹) نشان دادن که برای نیل به یک طرح اختلاط مناسب عملکرد شاخص دوامی (TSR) باید بیشتر از ۵۰ درصد و همچنین مقاومت کششی غیرمستقیم در حالت خشک نباید بیشتر از ۴۰۰ کیلوپاسکال باشد (Xiao، Jalili و Niazی، ۲۰۰۹) و همکاران،

همکاران ۲۰۲۲؛ Ahmadi و همکاران ۲۰۲۰؛ Adresi و Lacidogna، ۲۰۲۱؛ Adresi و همکاران ۲۰۲۲؛ Adresi، ۲۰۲۱) نیز کاربرد دارد.

یکی از مهم ترین موضوعات مورد توجه مهندسی راه، طرح ضخامت روسازی های حاوی تراشه آسفالت بازیافتی، می باشد. هرچه سیمان بیشتری برای تثبیت مخلوط اساس استفاده شود مقاومت لایه تثبیت شده بیشتر شده و ضخامت رویه راه کاهش می یابد از طرفی هرچه تراشه آسفالت (RAP)^۲ بیشتری در لایه اساس تثبیت شده استفاده گردد، ضمن به صرفه تر شدن اجرای لایه اساس از نظر منابع طبیعی مصرفی و حمل آن، به محیط زیست هم کمتر آسیب وارد می شود ولی در این حالت رفتار روسازی متفاوت شده و مقاومت فشاری لایه تثبیت شده با سیمان به دلیل کاهش چسبندگی سنگ دانه پوشیده شده با قیر به سیمان کاهش می یابد (Brown، ۲۰۰۶). از این رو ضخامت لایه رویه افزایش می یابد که نکته مهم در اینجا مقاومت بهینه لایه تثبیت شده است که بر این اساس مقاومت بهینه در درصدهای مختلف تراشه آسفالت و سیمان مختلف قابل محاسبه است. توجه شود که در انتخاب درصد بهینه سیمان و تراشه آسفالت جدای از بحث اقتصادی می-بایست مسئله دوام روسازی را نیز مدنظر قرار داد تا هزینه ساخت و تعمیر و نگهداری در طول عمر طرح حداقل گردد. لذا توجه به الزامات دوام در طرح لایه تثبیت شده امری بسیار ضروری است. البته باید توجه داشت که اضافه نمودن تراشه آسفالت به مصالح سنگی بدون حضور سیمان باعث افزایش چسبندگی مصالح سنگی به هم به واسطه چسبندگی قیر می باشد.

Taha و همکاران (۱۹۹۹) به بررسی تأثیر تراشه آسفالت از صفر درصد تا ۱۰۰ درصد در کیفیت لایه های اساس و زیراساس پرداختند. آن ها دریافتند که با افزایش تراشه آسفالت به مخلوط های اساس و زیراساس تثبیت شده، چگالی خشک مخلوط به-صورت خطی کاهش می یابد. همچنین با بررسی CBR دریافتند که در لایه زیر اساس با افزایش ۱۰۰ درصدی تراشه آسفالت به عنوان سنگ دانه های لایه زیر اساس، باز هم حداقل CBR مورد نظر قابل تأمین هست. این مقدار برای لایه اساس به ۱۰ درصد استفاده از تراشه آسفالت برای نیل به CBR ۸۰ درصد محدود شد. همچنین در تحقیق دیگری با اضافه کردن CKD^۳ بر اساس حاوی تراشه آسفالت به این نتیجه رسیدند که تا ۱۰۰ درصد تراشه آسفالت را می توان به مخلوط اساس اضافه کرد (Taha، ۲۰۰۳). با این کار هزینه لایه اساس به شدت کاهش خواهد یافت (Taha، ۲۰۰۲) و لایه اساس جدید از تراوایی بیشتری نسبت به لایه اساس متداول بدون تراشه آسفالت برخوردار است (Benson و Trzebiatowski، ۲۰۰۵).

تراشه آسفالت می‌پردازد. هدف از این تحقیق بررسی معیارهای مختلف دوامی برای مخلوط‌های تثبیت‌شده با سیمان حاوی تراشه آسفالت است و تعیین مقادیر بهینه تراشه آسفالت و سیمان از منظر دوام این‌گونه مخلوط‌ها هدف این تحقیق است.

۲- مواد و مصالح مصرفی و روش انجام آزمایش

۲-۱- مواد و مصالح مصرفی

در این تحقیق از مصالح اساس و تراشه آسفالت با مشخصات درج‌شده در جدول (۱) و نمودار دانه‌بندی درج‌شده در شکل (۱)، استفاده شد به‌منظور این‌که طرح اختلاط مصالح مختلف در محدوده مجاز قرار گیرد از ماسه و فیلر هم در صورت لزوم با مشخصات درج‌شده در جدول (۱) و شکل (۱) استفاده شد. به‌منظور اختلاط صحیح و مطابق استاندارد (ASTM-2940)، مصالح اساس حاوی مقادیر متفاوت تراشه آسفالت، مصالح مختلف همانند جدول (۲) با هم مخلوط شدند. بر این اساس چهار طرح اختلاط با درصد‌های تراشه آسفالت ۰، ۴۰، ۶۰ و ۸۰ مطابق شکل (۲) در محدوده مجاز آیین‌نامه قرار گرفتند.

۲۰۱۸). بر اساس تحقیقات اداره راه‌های ایالات متحده AASHTO^۵ و آیین‌نامه ایالتی نگزاس، مقدار حداقل ۸۰ درصد برای شاخص رطوبتی TSR برای مخلوط‌های آسفالتی تعریف شده است که برای مخلوط‌های اساس تثبیت‌شده با کف قیر حاوی تراشه آسفالت نیز از این شاخص استفاده شده (Yuan و همکاران، ۲۰۱۱؛ AASHTO T 283، ۲۰۱۴). تحقیقات تکمیلی در این رابطه نشان دادند که مراجع مختلف مقدار حداقل TSR را بین ۷۰ تا ۸۵ درصد بیان کرده‌اند که توصیه می‌شود برای مخلوط‌های حاوی RAP از مقدار ۷۰ درصد استفاده شود. این تحقیقات نشان دادند که مقدار TSR به‌تنهایی شاخص مناسبی برای بررسی بحث دوام این‌گونه مخلوط‌ها نیست و باید از آزمایش‌های تکمیلی مانند ذوب و یخ یا تر و خشک شدن نیز برای کنترل عملکرد دوام استفاده نمود (Hajj و همکاران، ۲۰۰۸؛ Kaseer و همکاران، ۲۰۲۰).

با توجه به مطالعات گذشته عموم معیارهای موردپذیرش برای طرح سازه‌ای روسازی حاوی اساس تثبیت‌شده، بر اساس مقادیر و محدود مجاز مقاومت فشاری محدود نشده استوار می‌باشد و عموماً مخلوط نهایی بر اساس معیارهای دوامی کنترل می‌گردند. نکته‌ای که در اینجا باید بدان توجه کرد مطالعات محدودی است که به بررسی مسئله دوام و تأثیر آن بر طرح اختلاط و تعیین مقدار بهینه

جدول ۱- مشخصات فیزیکی مصالح سنگ‌دانه‌ای و تراشه آسفالت

مصالح	حداکثر اندازه دانه (mm)	چگالی ظاهری (kg/m ³)	درصد عبوری از 150 μm (%)	درصد جذب آب 24 h (%)	درصد قیر
تراشه آسفالت	۳۷/۵	۲/۵۴	۰/۱	۰/۴	۴/۵
اساس	۳۷/۵	۲/۶۷	۰/۱	۱/۷۳	-
ماسه درشت	۹/۵	۲/۷۲	۱۶	۲/۷۵	-
فیلر	۴/۲۵	۲/۸۱	۲۷	۳/۸۳	-

جدول ۲- طرح مخلوط مصالح سنگی به‌همراه کدگذاری مخلوط

شماره	کد	سیمان (%)	اساس (%)	RAP (%)	ماسه (%)	فیلر (%)
۱	R0C3		۶۵	۰	۳۰	۵
۲	R40C3	۳	۲۰	۴۰	۴۰	۰
۳	R60C3		۰	۶۰	۴۰	۰
۴	R80C3		۰	۸۰	۰	۲۰
۵	R0C5			۶۵	۰	۳۰
۶	R40C5	۵	۲۰	۴۰	۴۰	۰
۷	R60C5		۰	۶۰	۴۰	۰
۸	R80C5		۰	۸۰	۰	۲۰
۹	R0C7			۶۵	۰	۳۰
۱۰	R40C7	۷	۲۰	۴۰	۴۰	۰
۱۱	R60C7		۰	۶۰	۴۰	۰
۱۲	R80C7		۰	۸۰	۰	۲۰

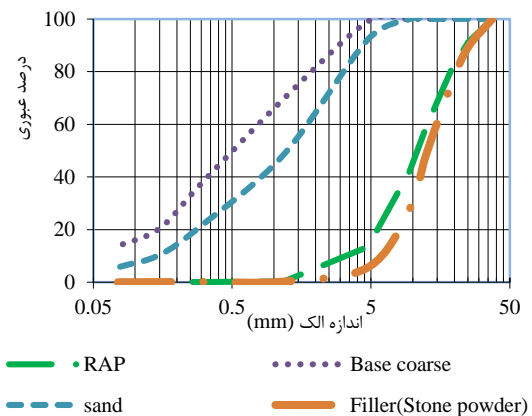
(AASHTOT22-03, ۲۰۱۴) و برای نمونه‌های مقاومت کشش غیرمستقیم به صورت کنترل کرنش با نرخ بارگذاری ۵۰ mm/min انجام شد (ASTM D6931-12, ۲۰۰۷).

در انتها، آزمایش تر و خشک شدن بر روی دو نمونه دیگر برای هر طرح اختلاط مطابق استاندارد ASTM D 559 انجام شد (ASTM D559/D559M-15, ۲۰۱۵). طبقه انجام آزمایش دوام تر و خشک شدن به این قرار است که بعد از قرارگیری ۵ ساعته نمونه‌ها در استخر آب، نمونه‌های بیرون آورده شده و ابعاد و وزنشان اندازه‌گیری می‌شوند. بعد از آن نمونه‌ها به مدت ۴۸ ساعت در آن در دمای ۵۰ درجه سانتی‌گراد قرار داده می‌شوند تا آب موجود در آن‌ها تبخیر شود. بعد از بیرون آوردن نمونه‌ها از آن، نمونه ابعادی اندازه‌گیری شده و هر دو نمونه وزن می‌شوند. در ادامه نمونه دیگر با عمل برس زدن فرسایش داده شده و دوام نمونه مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. بعد از برس زدن نیز نمونه مجدداً وزن می‌شود. طبقه برس زدن، ۲۸ مرتبه عبور رفت و برگشتی یک برس سیمی سالم با احتساب یک نیروی معمولی به برس بر روی ابعاد مختلف نمونه انجام می‌شود (۲۰ مرتبه طرفین، ۴ مرتبه سطح بالایی و ۴ مرتبه سطح زیرین). تفاوت وزن نمونه قبل و بعد از مرحله برس زدن میزان افت وزنی نمونه است که مجموع تمام افت وزنی نمونه در ۱۲ مرحله به‌عنوان یک معیار از این آزمایش استخراج می‌شود (شکل (۳)).

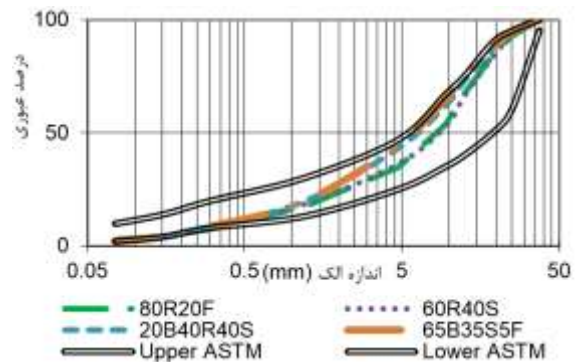


شکل ۳- برس زدن نمونه‌ها در آزمایش دوام- تر و خشک شدن

با اندازه‌گیری ابعادی هر یک از نمونه‌ها بعد از حمام آب و همچنین بعد از قرار گرفتن در آن میزان تغییرات حجمی نمونه در هر سیکل محاسبه می‌شود که بعد از ۱۲ سیکل آزمایش تر و خشک شدن مقدار حداکثر تغییرات حجمی در هر مرحله به‌عنوان تغییرات حجمی بیشینه معرفی می‌شود. همچنین به‌منظور بررسی رفتار دوامی مخلوط‌های ساخته‌شده، مقاومت فشاری دو نمونه‌ای که تحت آزمایش تر و خشک شدن قرار گرفته‌اند اندازه‌گیری شده و تأثیر تنش‌های درونی ناشی از تر و خشک شدن بر روی این نمونه‌های فشاری در مقایسه با نمونه‌های فشاری دیگر که تحت این تنش‌ها قرار نگرفته‌اند مورد بررسی قرار گرفت. در مورد آزمایش تر و خشک شدن باید توجه داشت که منابع مختلف این آزمایش



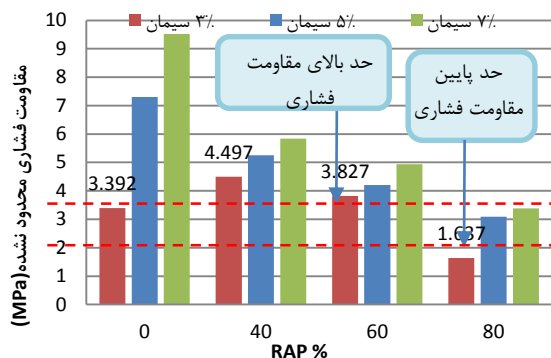
شکل ۱- دانه‌بندی مصالح سنگ‌دانه‌ای و تراشه آسفالت



شکل ۲- دانه‌بندی مخلوط‌های نهایی به‌همراه دوک دانه‌بندی استاندارد (B=اساس، R=تراشه آسفالت، S=ماسه و F=فیلر)

۲-۲- روش انجام تحقیق

در این مقاله ابتدا با در نظر گرفتن مخلوط‌های حاوی مقادیر مختلف تراشه آسفالت شامل ۰٪، ۴۰٪، ۶۰٪ و ۸۰٪ و همچنین مقادیر مختلف ۳٪، ۵٪ و ۷٪ سیمان و رطوبت بهینه تعیین‌شده بر اساس آزمایش پروکتور^۷ استاندارد اصلاح‌شده (ASTM D1557-12e1, ۲۰۱۲) اقدام به ساخت ۸ نمونه اساس تثبیت‌شده با سیمان حاوی مقادیر متفاوت تراشه آسفالت در قالب‌های استوانه‌ای به قطر ۱۰ سانتی‌متر و ارتفاع ۲۰ سانتی‌متر برای هر طرح اختلاط گردید. سپس نمونه‌های ساخته‌شده بعد از ۲۴ ساعت از قالب خارج شده و به مدت ۷ روز در شرایط رطوبت اشباع ۱۰۰ درصد عمل‌آوری شد (ASTM C496/C496M-11, ۲۰۰۴). در ادامه مقاومت فشاری ۷ و ۲۸ روزه و مقاومت کششی غیرمستقیم نمونه‌های ۷ روزه (هرکدام دو نمونه) تعیین گردید (ASTM C496/C496M-11, 2004; ASTM C496/C496M-11, 2004). بارگذاری وارده به نمونه‌ها فشاری به صورت کرنش کنترل با نرخ ۰/۲۵ مگاپاسکال بر ثانیه



شکل ۳- مقاومت فشاری برحسب درصد تراشه آسفالت بعد از عمل آوری نمونه‌های ۷ روزه

باید توجه داشت که مقاومت نمونه تثبیت‌شده با ۳ درصد سیمان با افزایش تراشه آسفالت به‌صورت کاهشی نبوده و با افزایش تراشه آسفالت در محدوده ۳۰ تا ۵۰ درصد به‌دلیل وارد شدن چسبندگی قیر به مقاومت مجموعه تثبیت‌شده همراه با چسبندگی سیمان باعث ارتقاء مقاومت فشاری شده است. با بررسی شاخص دوامی پیشنهادشده برای مقاومت فشاری در مراجع مختلف برای مخلوط‌های اساس تثبیت‌شده با سیمان حاوی تراشه آسفالت (مقاومت فشاری بین ۳۰۰ تا ۵۰۰ PSI یا ۲/۱ تا ۳/۵ مگاپاسکال)، مشاهده می‌شود که حداقل مقاومت فشاری بر اساس دوام مخلوط در برابر تر و خشک شدن یا ذوب یخ زدن و همچنین کربناته شدن برابر ۲/۱ MPa در نظر گرفته شده است. همچنین حداکثر مقدار مقاومت فشاری نمونه‌های ۷ روزه، برای جلوگیری از ترد شدن بیش از اندازه لایه تثبیت‌شده و جلوگیری از افزایش پتانسیل ایجاد ترک انعکاسی در لایه رویه به ۳/۵ MPa محدود شده است. که در شکل (۴) به‌طور شماتیک نشان داده شده است (Tang و Labuz، ۲۰۱۲؛ Xiao و همکاران، ۲۰۱۸).



شکل ۴- رابطه بین مقدار سیمان، مقاومت فشاری و عملکرد مخلوط تثبیت‌شده (Tang و Labuz، ۲۰۱۲)

را نیازمند تصحیح می‌دانند اداره راه آفریقای جنوبی که بخش اعظم راه‌های کشور خود را تثبیت می‌کند با ارتباط بین نتایج تجربی به‌دست‌آمده از دوام مخلوط‌های اجراشده با نتایج آزمایش تر و خشک شدن، این آزمایش را در موارد ذیل نیازمند تصحیح می‌داند.

۱- این آزمایش از تکرارپذیری و روند یکسانی در برس زدن برخوردار نیست.

۲- مقدار ضربات توصیه‌شده در کوبیدن مخلوط در قالب ۱۰ در ۲۰ سانتی‌متر، چگالی بیشتر و درصد رطوبت بهینه کمتری نسبت به نمونه‌های اجراشده که تحت شرایط پروتکتور اصلاح‌شده استاندارد کوبیده شده‌اند را ایجاد می‌کند.

۳- برس زنی بسیار کیفی و با خطای انسانی روبرو است.

۴- استفاده از قالب ۱۰ در ۲۰ سانتی‌متر با محدودیت ابعاد سنگ‌دانه اساس روبرو است (Ventura، ۲۰۰۳).

از این رو، اداره راه کالیفرنیا روش‌های تصحیحی آزمایش تر و خشک شدن را پیشنهاد نموده است و بر این اساس مقدار درصد مجاز افت وزنی بعد از برس زنی در طول ۱۲ سیکل تر و خشک شدن مطابق مقادیر زیر مجاز می‌داند.

- اگر بر روی اساس تثبیت‌شده رویه بتنی اجرا شود، $< 0.5\%$
- اساس تثبیت‌شده $< 0.8\%$
- زیر اساس تثبیت‌شده $< 0.13\%$

همچنین انجمن سیمان پرتلند برای انواع خاک‌های مختلف، مقادیر کاهش وزنی متفاوتی بین حداکثر ۱۴٪ برای خاک‌های درشت‌دانه و ۷ درصد برای خاک‌های ریزدانه را مجاز دانسته است (Ventura، ۲۰۰۳).

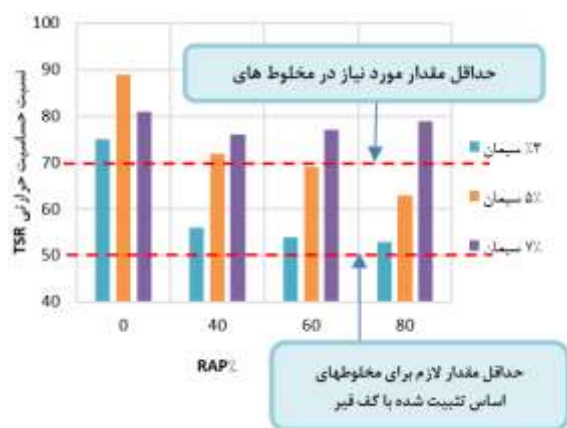
۳- تحلیل و تفسیر نتایج آزمایش

۳-۱- مقاومت فشاری

از جمله مهم‌ترین خصوصیت مخلوط‌های اساس تثبیت‌شده با سیمان، مقاومت فشاری آن‌ها می‌باشد. در ادامه در شکل (۳) نتایج آزمایش‌های مقاومت فشاری ۷ روزه نمونه‌های عادی عمل‌آوری شده، نشان داده شده است. مطابق با نمودارهای ترسیم‌شده ملاحظه می‌گردد که با افزایش درصد تراشه آسفالت مقاومت فشاری محدود نشده نمونه‌ها کاهش می‌یابد. همچنین با افزایش درصد سیمان مقاومت فشاری محدود نشده، افزایش می‌یابد. این روند با مطالعات انجام‌شده توسط پژوهشگران مختلف هم‌خوانی دارد (Yuan و همکاران، ۲۰۱۱؛ Ghanizadeh و همکاران، ۲۰۱۸؛ Suddepong و همکاران، ۲۰۱۸).

تثبیت شده با کف قیر در حدود ۵۰ درصد بیان شده است (Xiao و همکاران، ۲۰۱۸).

با توجه به شکل (۵) می توان مشاهده نمود که اگر حداقل TSR مخلوط های آسفالتی (۷۰ درصد) برای مخلوط های تثبیت شده با سیمان حاوی تراشه آسفالت را در نظر بگیریم خیلی از طرح های اختلاط جوابگو نخواهند بود و اساساً مقادیر زیاد سیمان (۷ درصد) برای مخلوط های حاوی تراشه آسفالت، تأمین کننده الزامات دوامی خواهد بود که این یافته با نتیجه به دست آمده از مقدار حداکثر مقاومت فشاری هم خوانی ندارد. همچنین بر اساس معیارهای آشتو^۸ و آیین نامه ایالتی تگزاس اگر معیار TSR را ۸۰ انتخاب نماییم مشاهده می شود که هیچ کدام از مخلوط های حاوی تراشه آسفالت نمی تواند این معیار را برآورده کند همچنین فقط دو طرح اختلاط ROC5, ROC7 شرایط قابل قبولی خواهند داشت که در مقایسه با معیار حداکثر مقاومت فشاری که برای جلوگیری از صلبیت بیش از حد لایه تثبیت شده و جلوگیری از بروز ترک خوردگی لایه تثبیت شده در نظر گرفته شده بود نیز مقایسه شود، این دو طرح اختلاط نیز نمی توانند مورد پذیرش قرار گیرند در واقع این دو معیار با هم تأمین نخواهند شد. شاید یکی از راهکارهای مناسب انتخاب درصد زیاد سیمان و پذیرش شاخص TSR بیش از ۸۰ درصد باشد و مسئله ترک خوردگی با بررسی تمهیدات دیگری مانند استفاده از لایه جاذب تنش یا استفاده از الیاف در مخلوط تثبیت شده کنترل گردد. در صورتی که شاخص دوامی ۵۰ درصد را قبول نماییم مشاهده می شود که تمام مخلوط های ساخته شده از عملکرد دوامی مناسبی برخوردارند. که مجدداً با مقایسه با یافته های پیشین به نظر می رسد این یافته اندکی دور از واقعیت باشد.



شکل ۵- تغییرات شاخص حساسیت رطوبتی در مقابل درصد های مختلف تراشه آسفالت به منظور بررسی مخلوط های با کیفیت از لحاظ دوام

بر اساس مطالب فوق می توان نتیجه گرفت که در صورتی که در لایه اساس از تراشه آسفالت استفاده نکنیم مقدار ۳ درصد سیمان برای تثبیت لایه اساس مقدار مناسبی خواهد بود. همچنین اگر از درصد های بیش از ۷۰ درصد تراشه آسفالت استفاده کنیم مقدار سیمان مناسب در حدود ۴ تا ۸ درصد برآورد می گردد. مابین این محدوده تقریباً بین ۲ تا ۳ درصد سیمان می تواند مناسب باشد زیرا وجود قیر همراه با تراشه آسفالت به چسبندگی بیشتر مصالح به هم کمک می کند لذا برای ثابت بودن مقاومت فشاری حداکثر، سیمان کمتری مورد نیاز خواهد بود. البته باید توجه داشت که مقدار قیر تراشه آسفالت، میزان پیرشدگی قیر و کیفیت دانه بندی مخلوط های اساس و تراشه آسفالت نیز در تعیین مقدار سیمان مصرفی در این محدوده بسیار تأثیرگذار است. بر اساس نتایج به دست آمده می توان جمع بندی نمود که فقط در طرح اختلاط R80C3 حداقل مورد نظر آیین نامه رعایت نشده است و امکان بروز مشکلات دوامی پیش بینی می شود و در کل عمده مشکل تمامی طرح های اختلاط تجاوز از حداکثر مقاومت فشاری است که ریسک بروز ترک انقباضی در لایه تثبیت شده را افزایش داده که به تبع آن تمهیدات لازم برای جلوگیری از ایجاد ترک انعکاسی مورد نیاز خواهد بود.

۳-۲- نتایج آزمایش های مقاومت کششی غیرمستقیم

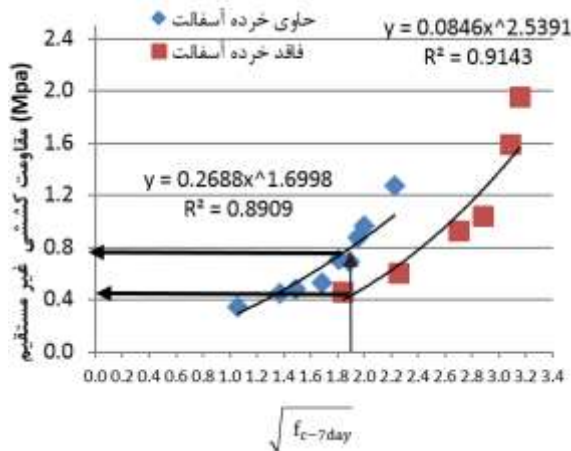
از دیگر خصوصیات مهم لایه های تثبیت شده با سیمان مقاومت کششی غیرمستقیم (ITS یا IDT) و شاخص حساسیت رطوبتی آن ها (TSR) می باشد. از این آزمایش برای تخمین مقدار بهینه تراشه آسفالت، مقاومت کششی مخلوط تثبیت شده و برآورد پتانسیل مقاومت یک لایه در برابر ترک های حرارتی، تخمین زمان عمل آوری و ارزیابی حساسیت رطوبتی مخلوط های تثبیت شده استفاده می شود (Xiao و همکاران، ۲۰۱۸).

از تقسیم مقاومت کششی غیرمستقیم در وضعیت مرطوب نسبت به حالت خشک می توان به شاخص نسبی دوام مخلوط ها دست یافت. با ضرب نمودن عدد فوق در ۱۰۰، عدد شاخص رطوبتی که به نوعی شاخص دوامی است به دست می آید. بسیار واضح است که مخلوطی که با مرطوب شدن، بخش عمده از مقاومتش کاهش یابد نمی تواند عملکرد مناسبی به عنوان یک مصالح بادوام در برابر عوامل محیطی به حساب آید. این نسبت برای طرح های مختلف اختلاط در این تحقیق در شکل (۵) نشان داده شده است. مقدار بحرانی قابل قبول شاخص حساسیت رطوبتی برای مخلوط های آسفالتی از بین ۷۰ تا ۸۵ درصد در مراجع مختلف ذکر شده است. این مقدار برای مخلوط های اساس

افزایش مقاومت کششی مخلوط می‌شود. یا به عبارتی، با وجود این- که از مقاومت فشاری مخلوط کاسته شده ولی به مقاومت کششی غیرمستقیم آن افزوده شده است که می‌توان نتیجه گرفت رفتار مخلوط از ترد به انعطاف‌پذیر سوق پیدا کرده است.

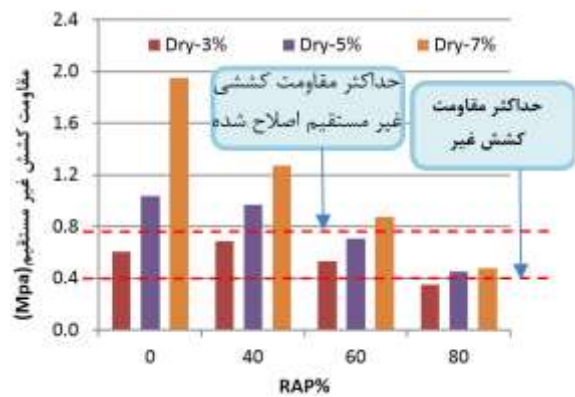
همچنین در صورتی که مقدار حداکثر مقاومت فشاری مجاز $3/5 \text{ MPa}$ را که برای جلوگیری از ترد شدن بیش از اندازه لایه تثبیت‌شده با سیمان تعریف شده است (Tang و همکاران، ۲۰۱۲)، در نظر بگیریم و بر اساس روابط نشان داده‌شده در شکل (۷) به مقاومت کششی غیرمستقیم تبدیل کنیم خواهیم دید که به عدد ۴۱۵ کیلوپاسکال برای مخلوط‌های فاقد تراشه آسفالت خواهیم رسید که تقریباً با مقادیر پیشنهادی مراجع قبلی (۴۰۰ کیلوپاسکال) هم‌خوانی دارد (Xiao و همکاران، ۲۰۱۸).

در صورتی که در شکل (۷) متناظر با مقاومت فشاری $3/5$ مگاپاسکال مقاومت کششی غیرمستقیم را برای مخلوط فاقد تراشه آسفالت به دست آوریم به مقاومت کششی غیرمستقیم $0/4 \text{ MPa}$ می‌رسیم همچنین این مقدار برای مخلوط تثبیت‌شده حاوی تراشه آسفالت برابر $0/78 \text{ MPa}$ است. این بدین معنی است که با اضافه شدن تراشه آسفالت و افزوده شدن مقاومت چسبندگی قیر به مقاومت چسبندگی سیمان، مقاومت کششی افزایش می‌یابد و لذا به نظر می‌رسد با افزایش مقاومت کششی پتانسیل ترک‌خوردگی کاهش می‌یابد از این رو می‌توان نتیجه گرفت که برای این‌گونه مخلوط‌ها حداکثر مقاومت کششی غیرمستقیم مجاز برای جلوگیری از صلیبیت لایه تثبیت‌شده باید اصلاح گردد. همان‌طور که در شکل (۷) نشان داده می‌شود در صورتی که مقاومت کششی غیرمستقیم اصلاح‌شده را 780 کیلوپاسکال برای مخلوط‌های حاوی تراشه آسفالت در نظر بگیریم، مخلوط‌های R80C3 تا R80C7، R60C3 تا R60C5 و R40C3 مورد پذیرش قرار می‌گیرند.



شکل ۷- ارتباط بین مقاومت فشاری $(f_c^{0.5})$ و کششی غیرمستقیم

در این خصوص تحقیقات بیشتری در این زمینه باید انجام گیرد و به‌عنوان پیشنهاد شاید عددی بین این دو شاخص یک تقریب مناسب برای سنجش حساسیت رطوبتی این‌گونه مخلوط‌ها باشد. مطالعات گذشته توصیه نموده‌اند که مقدار ITS-مخلوط-های تثبیت‌شده به 400 KPa محدود شود (Xiao و همکاران، ۲۰۱۸). با بررسی شکل (۶) که مقاومت کششی غیرمستقیم نمونه‌های تثبیت‌شده در حالت خشک را نشان می‌دهد مشخص هست که فقط مخلوط R80C3 دارای این شرایط می‌باشد. و بقیه مخلوط‌ها عملاً از این مقدار عدول نموده‌اند.



شکل ۶- مقاومت کششی غیرمستقیم یا برزیلی مخلوط‌های تثبیت‌شده و بررسی حداکثر مقدار $\text{ITS-dry} = 400 \text{ PSI}$ به‌عنوان شاخص دوامی

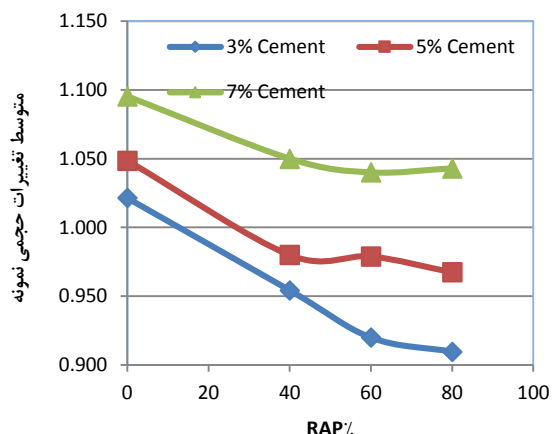
یکی دیگر از مسائل مهمی که در این قسمت می‌توان بدان اشاره نمود ارتباط بین مقاومت فشاری و مقاومت کششی غیرمستقیم است. ارتباط بین مقاومت کششی غیرمستقیم و مقاومت فشاری برای بتن معمولی به صورت $(T=0.55F_c^{0.5})$ تعریف می‌شود (Choo و Newman، ۲۰۰۳). در این تحقیق با توجه به تفاوت ماهوی در مقدار سیمان مصرفی و همچنین وجود تراشه آسفالت در بین مصالح تثبیتی، لازم بود تا فرمول‌بندی جدیدی در این زمینه ارائه شود. با توجه به اشکال مختلف فرمول-بندی، استفاده از تابع توانی بهترین برازش را نسبت به بقیه داده‌ها دارد. همان‌طور که در شکل (۷) نشان داده شده است با توجه به تفاوت نمونه‌های دارای تراشه آسفالت با نمونه‌های بدون تراشه آسفالت، فرمول جداگانه‌ای برای هر یک از ترکیبات فوق‌الذکر ارائه شده است.

با توجه به شکل (۷) می‌توان مشاهده نمود که در یک مقدار مشخص مقاومت فشاری، در نمونه تثبیت‌شده حاوی تراشه آسفالت، مقاومت کششی بیشتری نسبت به نمونه فاقد تراشه آسفالت حاصل می‌شود. این بدان معنی است که وجود فاز قیری در مخلوط‌های تثبیت‌شده سیمانی حاوی تراشه آسفالت باعث

۳-۳- آزمایش تر و خشک شدن

در این تحقیق از آزمایش دوامی تر و خشک شدن برای سنجش عملکرد مخلوط‌های تثبیت‌شده بهره گرفته شد. اولین معیاری که برای این آزمایش ذکر شده است محدود شدن مقدار افت وزنی مخلوط‌های تثبیت‌شده به ۷ درصد وزن اولیه نمونه است (Tao و Zhang، ۲۰۰۸). البته راهنمای تثبیت راه‌های ایران رواداری‌های قابل قبول را تا حداکثر ۱۲٪ تا ۱۴٪ مقبول می‌داند. همان‌طور که در شکل (۸) نشان داده شده است مقدار افت وزنی تجمعی مخلوط‌های مختلف تثبیت‌شده با سیمان حاوی تراشه آسفالت در ۱۲ سیکل تر و خشک شدن نشان می‌دهد که با افزایش تراشه آسفالت و افزایش سیمان با کاهش چشمگیر مقدار افت وزنی تجمعی روبه‌رو هستیم. این آزمایش ثابت می‌کند افزایش تراشه آسفالت به مخلوط اساس تثبیت‌شده با سیمان باعث افزایش چسبندگی بیشتر مصالح به هم شده و پتانسیل ساییده شدن و جدا شدن ذرات تحت برس کشی کاهش می‌یابد. البته شاید فلسفه این آزمایش باید برای مخلوط‌هایی که حاوی تراشه آسفالت هستند تغییر یابد از این جهت که برس کشی دقیقاً بعد از بیرون آوردن نمونه از آون با دمای ۵۰ درجه بعد از ۴۸ ساعت انجام می‌شود که باعث می‌شود قیر اطراف سنگ‌دانه‌ها نرم شده و ترک‌ها را پر نموده ذرات را به هم بچسباند و لذا برس زدن در این شرایط شاید منطقی به نظر نرسد و لازم باشد برای این‌گونه مخلوط‌ها اصلاحاتی در روند استاندارد اعمال گردد. باین‌وجود با مقایسه حداکثر افت وزنی با مقادیر مجاز آیین‌نامه‌ای، این معیار در مورد طرح‌های ساخته‌شده در این تحقیق محدودکننده نمی‌باشد. در ادامه، نمودار تغییرات حجمی نمونه در آزمایش تر و خشک شدن در شکل (۹) نشان داده می‌شود. باید توجه داشت که ورود نمونه به وان آب و اشباع شدن باعث افزایش حجم نمونه می‌شود و از طرفی خشک شدن نمونه در آون و از دست رفتن آب واردشده به نمونه، باعث کاهش حجم نمونه خواهد شد که این روند برای تمامی طرح‌های اختلاط در هر سیکل مشاهده شد.

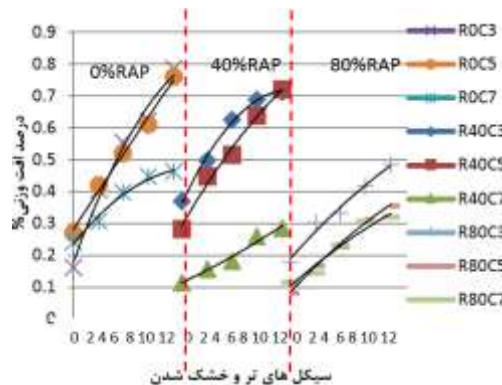
در شکل (۹) متوسط تغییر حجم مثبت (انبساط) و منفی (انقباض) با حفظ علامت در ۱۲ سیکل پیاپی به‌صورت معیاری برای هر طرح اختلاط ذکر شده است. بدین معنی که در طرح اختلاط R80C30 میزان انقباض نمونه بعد از خشک شدن در آون بیشتر از مقدار انبساط نمونه در آب بوده که در نهایت متوسط تغییرات حجمی در یک سیکل تر و خشک شدن مقدار ۰.۹٪ را نشان می‌دهد.



شکل ۹- متوسط تغییرات حجمی نمونه در مقابل درصد تراشه آسفالت

نتایج آزمایش تر و خشک شدن با عنوان درصد متوسط تغییرات حجمی بعد از طی ۱۲ سیکل در برابر تغییرات تراشه آسفالت و سیمان، نشان می‌دهد که افزایش تراشه آسفالت به‌همراه کاهش مقدار سیمان، باعث تغییرات حجمی منفی (انقباض) شده است. می‌توان نتیجه گرفت با افزایش درصد سیمان در مخلوط تغییرات حجمی افزایش می‌یابد و از جنس مثبت (انبساطی) خواهد بود همچنین با افزایش تراشه آسفالت شرایط کاملاً برعکس می‌شود. بر این اساس نتایج نشان داد که با استفاده از ۵ درصد سیمان به‌همراه مقادیر متفاوت تراشه آسفالت، کم‌ترین درصد تغییرات حجمی مشاهده شد.

می‌توان نتیجه گرفت با افزایش هرکدام از متغیرهای تراشه آسفالت و سیمان به‌تنهایی، تغییرات حجمی نمونه افزایش می‌یابد. مشخص است که هر چه تغییرات حجمی نمونه بیشتر باشد باعث افزایش تنش‌های داخلی در داخل نمونه شده و باعث اضمحلال سریع‌تر نمونه می‌شود. همچنین تغییرات حجمی بیشتر نمونه‌های تثبیت‌شده، پتانسیل ترک‌خوردگی و اعوجاج لایه تثبیت‌شده تحت سیکل‌های تر و خشک شدن را نیز افزایش خواهد داد. با توجه به مطالب فوق می‌توان طرح‌های منتخب R80C5 و R60C5 را به‌عنوان طرح‌هایی که کم‌ترین تغییرات حجمی را دارند انتخاب نمود.



شکل ۸- افت وزنی مخلوط تثبیت‌شده در مقابل تعداد سیکل‌های آزمایش تر و خشک شدن

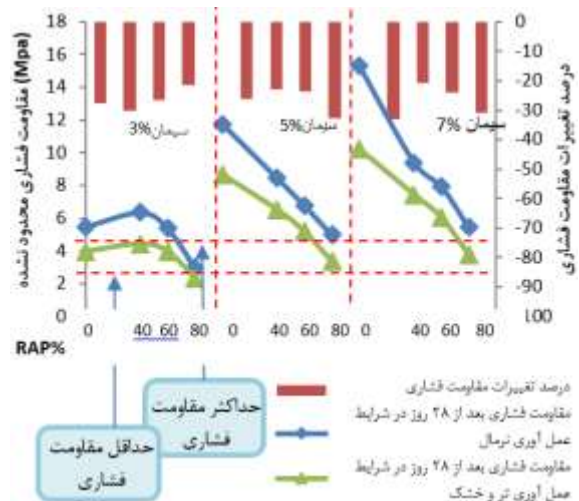
و خشک شدن باید در محدوده حداکثر ۳ و حداقل ۱/۵ مگاپاسکال باشد (Ventura, ۲۰۰۳). البته باید با ضریب تبدیل که از آیین نامه بتن ایران استخراج شد (۱/۶۱) مقاومت ۷ روزه را به ۲۸ روزه تبدیل نمود که در شکل (۱۰) مقادیر تبدیل شده به عنوان دو حد حداکثر و حداقل نشان داده شده است. بر این اساس طرح‌های اختلاط ROC3, R40C3, R60C3, R80C5 و R80C7 را می‌توان طرح‌های منتخب انتخاب نمود.

۴- نتیجه‌گیری

هدف از این مقاله به دست آوردن درصد تراشه آسفالت بهینه مخلوط‌های اساس تثبیت شده با سیمان با توجه به معیارهای دوام و بررسی آزمایش‌های مختلف دوامی و مقایسه معیارهای مختلف باهم بود. بر این اساس مهم‌ترین نتایج این تحقیق به قرار ذیل است: با توجه به نتایج به دست آمده مشخص شد که معیار حداکثر مقاومت فشاری که از سوی مراجع مختلف به عنوان شاخصی برای کنترل وقوع ترک در لایه اساس تثبیت شده با سیمان و در ادامه کاهش پتانسیل وقوع ترک انعکاسی در لایه رویه آسفالتی، بین ۳۰۰ تا ۵۰۰ PSI (۲/۱ تا ۳/۵ مگاپاسکال) تعیین شده است، باید برای مخلوط‌های اساس تثبیت شده با سیمان حاوی تراشه آسفالت مورد بازبینی قرار گیرد. وجود تراشه آسفالت در مخلوط تثبیت شده با سیمان باعث تغییر رفتار مخلوط از ترد به انعطاف پذیر می‌شود. در این راستا، می‌توان محدوده‌های جدیدی بین حداکثر مقاومت فشاری اصلاح شده برابر MPa۵/۷۵ و حداقل آن MPa۳/۵ برای مخلوط‌های اساس تثبیت شده با سیمان حاوی تراشه آسفالت تعریف نمود.

مشاهده شد که افزودن مقادیر تراشه آسفالت بین ۴۰ تا ۶۰ درصد به مخلوط اساس تثبیت شده با سیمان می‌تواند رفتار مخلوط را از ترد به انعطاف پذیر تغییر دهد و با افزوده شدن مقاومت چسبندگی قیر موجود در تراشه‌های آسفالتی به مقاومت چسبندگی سیمان، پتانسیل ترک خوردگی این نوع مخلوط‌ها در مقایسه با مخلوط اساس تثبیت شده با سیمان فاقد تراشه آسفالت بهبود یابد. پیشنهاد می‌شود معیار جدیدی در انتخاب حداقل TSR برای بررسی مخلوط‌های اساس تثبیت شده با سیمان حاوی تراشه آسفالت (بین ۵۰ تا ۷۰ درصد) برای تخمین دوام این گونه مخلوط‌ها در نظر گرفته شود. تحقیقات بیشتری در این زمینه لازم است. با توجه به نتایج به دست آمده از آزمایش تر و خشک شدن، به نظر می‌رسد اصلاحاتی در مورد روش انجام این آزمایش برای مخلوط‌های تثبیت شده حاوی تراشه سفلت، باید در نظر گرفته شود. تحقیقات تکمیلی در این زمینه لازم است.

در ادامه مقاومت فشاری نمونه‌های ۲۸ روزه بعد از تحمل ۱۲ سیکل تر و خشک شدن در مقایسه با مقاومت فشاری نمونه‌هایی که در شرایط عادی برای مدت ۲۸ روز عمل‌آوری شده بودند در کنار هم در شکل (۱۰) ترسیم شدند. مشاهده می‌شود که نمونه‌هایی که شرایط تر و خشک شدن را تجربه کرده‌اند از مقاومت فشاری محدود نشده کم‌تری در مقایسه با نمونه‌های عمل‌آوری شده در شرایط استاندارد برخوردارند. کاملاً واضح است که تر و خشک شدن‌های متوالی و تغییر حجم‌های سیکلی باعث ایجاد نقص‌های مختلف در مخلوط تثبیتی شده است. نکته با اهمیت کاهش بیشتر مقاومت فشاری در نمونه‌های بدون تراشه آسفالت و ۸۰ درصد تراشه آسفالت در مقایسه با درصد تراشه آسفالت ۴۰ و ۶۰ درصد برای طرح‌های اختلاط ۵ و ۷ درصد سیمان می‌باشد. این روند در طرح اختلاط نمونه‌ها با ۳ درصد سیمان همانند روند مقاومت فشاری متفاوت آن‌ها، متفاوت است.



شکل ۱۰- مقایسه مقاومت فشاری برحسب درصد تراشه آسفالت- در نمونه‌های معمولی ۲۸ روزه و نمونه‌های دوامی ۲۸ روزه بعد از سیکل تر و خشک شدن

با توجه به نتایج به دست آمده، اگر تعادلی بین مؤلفه‌هایی که در چسباندن سنگ‌دانه‌های به هم نقش دارند از قبیل سیمان و قیر موجود در تراشه آسفالت، وجود داشته باشد، می‌توان استدلال نمود که مخلوط نهایی از دوام بیشتری برخوردار می‌باشد. بر این اساس مشاهده می‌شود در صورتی که از مقدار سیمان بین ۵ تا ۷ درصد استفاده شود و مقدار تراشه آسفالت بین ۴۰ تا ۶۰ درصد انتخاب گردد، می‌توان انتظار داشت مخلوط نهایی از نظر دوامی گزینه مناسبی خواهد بود.

همچنین کمیته حمل و نقل جاده‌ای در TRH4 (توصیه‌های فنی برای بزرگراه‌ها) توصیه می‌کند که مقاومت فشاری ۷ روزه نمونه‌های تثبیت شده اساس با سیمان بعد از تحمل سیکل‌های تر

۵- تشکر و قدردانی

این پژوهش با حمایت مالی دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی طبق ابلاغ گزنت شماره ۴۹۳۵ انجام گردیده است.

۶- مراجع

- ASTM C496/C496M-11, "Standard test method for splitting tensile strength of cylindrical concrete specimens", American Society for Testing and Materials, 2017.
- ASTM D559/D559M-15, Standard Test Methods for Wetting and Drying Compacted Soil-Cement Mixtures, 2015.
- ASTM D6931-12, Standard Test Method for Indirect Tensile (IDT) Strength of Bituminous Mixtures, ASTM International, 2007.
- ASTMD-2940, Standard Specification for Graded Aggregate Material for Bases or Subbases for Highways or Airports, ASTM Committee D04 on Road and Paving Materials, 2003.
- ASTMD1557-12e1, "Tandard test methods for laboratory compaction characteristics of soil using modified effort (56,000 ft-lbf/ft³ (2,700 kN-m/m³))", American Society for Testing and Materials, 2012.
- ASTMD1633-00, Standard Test Methods for Compressive Strength of Molded Soil-Cement Cylinders, American Society for Testing and Materials, 2007.
- Brown AV, Cement Stabilization of Aggregate Base Materials Blended with Reclaimed Asphalt Pavement, 2006.
- Basic Asphalt Recycling Manual 2001, "Asphalt Recycling and Reclaiming Association", PUB: NHI 01-022, Annapolis, Maryland.
- Ghanizadeh AR, Rahrovan M, Bafghi KB, "The effect of cement and reclaimed asphalt pavement on the mechanical properties of stabilized base via full-depth reclamation", Construction and Building Materials, 2018, 161, 165-174.
- Guthrie WS, Sebesta S, Scullion T, "Selecting optimum cement contents for stabilizing aggregate base materials", Report, 2001, 7-4920-2.
- Hajj EY, Peter E, Sebaaly Kandiah P, Use of Reclaimed Asphalt Pavements (Rap) in Airfields Hma Pavements, 2008.
- Hot Recycling of Yesterday, Recycling Report, National Asphalt Pavement Association, Lanham, Maryland, September, 1977, 1 (2).
- Kaseer F, Arámbula-Mercado E, Epps Jon M, Amy E, Ceccovilli R, "Full-depth reclamation (FDR) mix design: Proposed revisions to the indirect tensile strength thresholds", Construction and Building Materials, 2020, 254.
- Little DN, Scullion T, Kota P, Bhuiyan J, "Guidelines for mixture design and thickness design for stabilized bases and subgrades", 1995, FHW A/TX-95/1287-3F.
- Luo X, Liu G, Zhang Y, Meng T, Zhan L, "Estimation of resilient modulus of cement-treated construction and demolition waste with performance-related properties construction and building materials", 2021, 283, 122107.
- Miller HJ, Guthrie WS, Crane R, Smith B, "Evaluation of cement-stabilized full-depth-recycled base materials for frost and early traffic conditions", 1998.
- Newman J, Choo BS, "Advanced concrete technology", Advanced Concrete Technology, 2003, 1-1433.
- Aashto T 283, Resistance of Compacted Asphalt Mixtures to Moisture-Induced Damage, 2014.
- AASHTOT22-03, American Association of State Highway and Transportation Officials Standard Method of Test for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens, 2014.
- Abdo FY, Cement-stabilized base courses-concrete airport pavement workshop, 2009.
- Adresi M, "The effect of mineralogy and grain size of fine aggregate and different macro textures on the durability of the RCCP surface under abrasion conditions", Amirkabir Journal of Civil Engineering, 2022, 54 (1), 343-362. doi: 10.22060/ceej.2021.18816.6967.
- Adresi M, Hassani A, Khishdari A, Zeini M, "Determination of optimum mix design for cement treated base containing high volume of reclaimed asphalt pavement", Transportation Infrastructures Engineering Journal, 2017, 3 (1), 53-68. doi: (DOI): 10.22075/JTIE.2017.1145.1069.
- Adresi M, "Economic and durability optimization of asphalt pavement with cement stabilized base mixtures ardakan-naeen case study", Journal of Ferdowsi Civil Engineering, 2021, 34 (2), 17-34.
- Adresi M, Ahmadi A, Rooholamini H, "Influence of high content of reclaimed asphalt on the mechanical properties of cement-treated base under critical environmental conditions", International Journal of Pavement Engineering, Taylor and Francis, 8436 (October), 2017, 1-8.
- Adresi M, Ghanbari MA, Omidi A, "Investigation of the effect of various mixing designs and macro textures on the skid resistance of roller compacted concrete pavement surface", Civil Infrastructure Research, 2021, 1 (12), 111-128.
- Adresi M, Lacidogna G, "Investigating the micro/macro-texture performance of roller-compacted concrete pavement under simulated traffic abrasion", Applied Sciences, 2021, 11 (12).
- Adresi M, Shirgir B, (30AD) "Porous concrete pavement", Road, 111.
- Adresi M, Hasani A, Zini M, "Determining the appropriate mixing plan of cement-stabilized base mixtures containing large amounts of asphalt chips (In Persian)", Transportation Infrastructure Engineering, 2017, (9), 53-67.
- Ahmadi A, Fakhri, M, Ameli, A, Adresi, M, "Evaluation of long-term behavior of warm mix asphalt containing steel slag aggregates and reclaimed asphalt pavement", Journal of Transportation Research, 2017, 4 (3), 23-38..
- Ahmadi A, Gogheri Mohammad K, Adresi M, Amoosoltani E, "Laboratory evaluation of roller compacted concrete containing RAP", Advances in Concrete Construction, 2020, 10 (6), 489-498.

- Niazi Y, Jalili M, "Effect of portland cement and lime additives on properties of cold in-place recycled mixtures with asphalt emulsion", *Construction and Building Materials*, 2009, 23 (3), 1338-1343.
- PCA Full-depth reclamation: Recycling Roads Saves Money and Natural Resources, 2005.
- Ghafarpur Jahromi S, Adresi M, "A review of the use of crumb rubber in improving the behavioral properties of soil", *Road*, 2022, 30 (112).
- Suddepong A, Intra A, Horpibulsuk S, Suksiripattanapong C, "Durability against wetting-drying cycles for cement-stabilized reclaimed asphalt pavement blended with crushed rock", *Soils and Foundations*, Elsevier B.V., 2018, 58 (2), 333-343.
- Taha R, Al-Harthy A, Al-Shamsi K, Al-Zubeidi M, "Cement stabilization of reclaimed asphalt pavement aggregate for road bases and subbases", *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2002, 14 (3), 239-245.
- Taha R, Ali G, Basma A, Al-Turk O, "Evaluation of reclaimed asphalt pavement aggregate in road bases and subbases", In *Transportation Research Records*, 1999, 1652, 264-269.
- Taha R, "Evaluation of cement kiln dust-stabilized reclaimed asphalt pavement aggregate systems in road bases", In *Transportation Research Records*, 2003, 1819, 11-17.
- Tang S, Cao Y, Labuz JF, *Structural Evaluation of Asphalt Pavements with Full-Depth Reclaimed Base*, 2012.
- Trzebiatowski BD, Benson CH, "Saturated hydraulic conductivity of compacted recycled asphalt pavement", *Geotechnical Testing Journal*, 2005, 28 (5), 1-6.
- Ventura D, *Durability Testing of LCB and CTB Materials Supplied by Caltrans*, 2003.
- Xiao F, Yao S, Wang J, Li X, Amirkhanian S, "A literature review on cold recycling technology of asphalt pavement", *Construction and Building Materials*, 2018, 180, 579-604.
- Yuan D, Nazarian S, Hoyos LR, Puppala AJ, *Cement Treated RAP Mixes for Roadway Bases*, 2010.
- Yuan D, Nazarian S, Hoyos LR, Puppala AJ, "Evaluation and mix design of cement-treated base materials with high RAP", In *Annual TRB Meeting*, 2011.
- Zhang Z, Tao M, "Durability of cement stabilized low plasticity soils durability of cement stabilized low plasticity soils", 0241 (February), 2008.

EXTENDED ABSTRACT

Evaluation of Durability Properties of Cement Stabilized Base Mixtures Contains Different Amounts of RAP during Wet and Dry Cycles

Mostafa Adresi^{a,*}, Mostafa Vamegh^b, Mehdi Ebrahimzadeh Shiraz^c

^a Department of Civil Engineering, Shahid Rajaee Teacher Training University, Tehran, Iran

^b Department of Civil Engineering, South Tehran Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

^c Faculty of Civil Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran

Received: 31 December 2019; **Review:** 02 April 2021; **Accepted:** 03 May 2021

Keywords:

RAP, Compressive strength, Indirect tensile strength, Durability.

1. Introduction

Recently, the focus in the construction and improvement of pavements has been on using recycled materials to make them more sustainable. The use of recycled asphalt pavement (RAP) has gained interest among agencies and policy makers as a way to recycle waste materials and reuse valuable aggregate coating with bitumen. However, there are limited studies on the issue of durability and its impact on the mixing design and optimal amount of RAP. This study aims to investigate different durability criteria for cement-stabilized mixtures containing RAP and determine the optimal amount of RAP and cement to ensure durability.

2. Methodology

2.1. Experimental study

To investigate the durability of CTB mixture comparison strength 7, 28 days is considered. In addition, an indirect tensile strength in dry and wet conditions is performed. The TSR is calculated as the proportion of ITS wet by dry. Other durability criteria in wet and dry cycles test method such as percentage of weight loss of stabilized samples, percentage of volume changes of the sample in wet and dry conditions, and percentage of changes in compressive strength after 12 wet and drying cycles.

3. Results and discussion

The compressive strength of cement-stabilized base mixtures is an important characteristic, and as shown in Fig. 1, increasing the percentage of recycled asphalt pavement (RAP) in the mixture decreases the unconfined compressive strength, while increasing the percentage of cement increases it (Yuan D et.al., 2010, Ghanizadeh et. al., 2018, Suddepong et. al., 2018). However, the minimum tensile strength ratio (TSR) of 70% for asphalt mixtures may not work for cement-stabilized mixtures containing RAPs, and large amounts of cement may be required to meet durability requirements. None of the mixtures containing RAPs meet the TSR criterion of 80, except for two mixing schemes (R0C5 and R0C7), which cannot be accepted based on the criterion of maximum compressive strength. To control cracking, other solutions such as using a stress-absorbing material interlayer

* Corresponding Author

E-mail addresses: adresi@sru.ac.ir (Mostafa Adresi), mostafa_vamegh@yahoo.com (Mostafa Vamegh), mehdi_ebrahimzadeh@civileng.iust.ac.ir (Mehdi Ebrahimzadeh Shiraz).

(SAMI) or adding fibers to the mixture can be examined. If we accept a TSR durability index of 50%, all mixtures perform well, but this finding may not be completely accurate compared to previous studies.

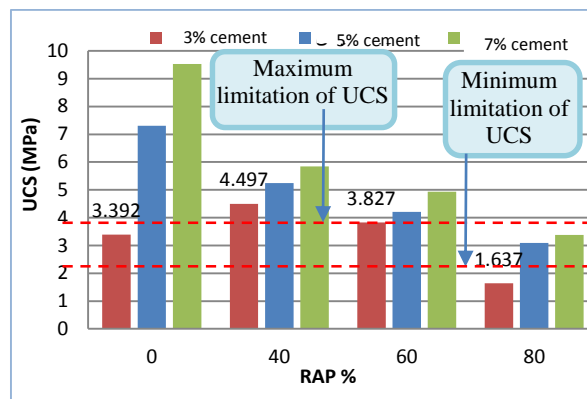


Fig. 1. Seven days UCS results-versus RAP%

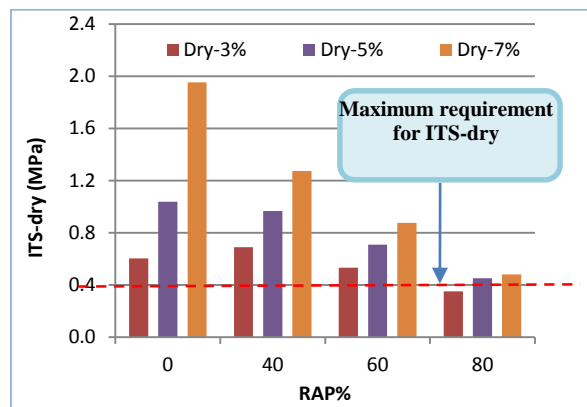


Fig. 2. Indirect tensile strength of stabilized mixtures versus RAP% to investigation of maximum ITS-dry=400 (2.8) PSI as a durability criterion

Previous studies have recommended limiting the ITS value of stabilized mixtures to 400 KPa (Xiao et. al., 2018). Fig. 2 shows that only the R80C3 mixture meets this condition, while the rest of the mixtures deviate from it. The presence of the bitumen phase in stabilized cement mixtures containing RAPs increases the mixture's tensile strength, which can lead to a shift from brittle to flexible behavior. Moreover, the rest of the mixtures have practically deviated from this value. Another important issue that can be mentioned in this section is the relationship between compressive strength and indirect tensile strength. The relationship between indirect tensile strength and compressive strength for ordinary concrete is defined as $(T=0.55F_c^{.5})$, (Newman et. al., 2003). According to Fig. 3, it can be seen that at a certain amount of compressive strength, in the stabilized sample containing RAPs, more tensile strength is observed than the sample without RAPs. This means that the presence of the bitumen phase in stabilized cement mixtures containing RAPs increases the tensile strength of the mixture. In other words, although the compressive strength of the mixture has been reduced its indirect tensile strength has been increased, it can be concluded that the behavior of the mixture has shifted from brittle to flexible. Also, if we consider the maximum allowable compressive strength of 3.5MPa, which is defined to prevent excessive brittleness of the cement-stabilized layer (Tang et. al., 2012). If the maximum allowable compressive strength is converted to ITS based on the relationship shown in Fig. 3, it is consistent with the values suggested by previous authorities. The addition of RAPs and increased adhesion of bitumen to cement in concrete media increases the tensile strength and reduces the cracking potential. As shown in Fig. 5, based on a modified ITS of 780 KPa for mixtures containing RAPs, some mixing schemes are accepted, including R80C3 to R80C7, R60C3 to R60C5, and R40C3.

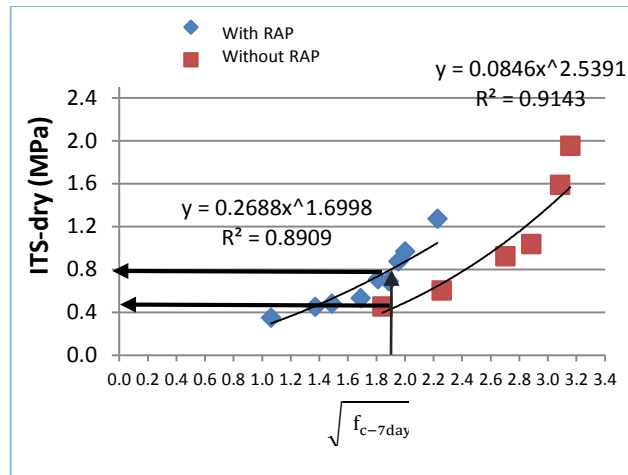


Fig. 3. The relation between compression strength ($f_{c-7day}^{0.5}$) and indirect tensile strength

As shown in Fig. 4, the cumulative weight loss of various cement-stabilized mixtures containing RAPs in 12 wet and dry cycles shows that with increasing RAPs and increasing cement, the weight loss decreases significantly. This experiment proves that increasing the RAPs to the cement-stabilized base mixture increases the adhesion of the materials to each other and reduces the wear potential of the particles to be brushed. perhaps the philosophy of this test method should be changed for mixtures containing RAPs, because brushing is done just after removing the sample from the oven at a temperature of 50 degree after 48 hours, which causes the aggregate bitumen soften and fill the cracks and the particles stick together (healing action), so brushing in these conditions may not seem logical and it is necessary to apply modifications in the standard process for such mixtures. However, by comparing the maximum weight loss with the allowable values of the regulations (12%), this criterion is not restrictive for the designs made in this research.

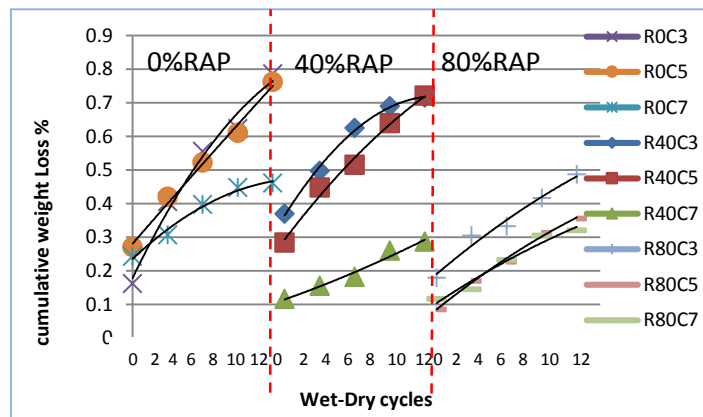


Fig. 4. Cumulative weight Loss versus wet-dry cycles

The following diagram, Fig. 5, is the volumetric changes of the sample in wet and drying experiments. It should be noted that the sample enters the water bath and saturation experienced increasing the volume, and on the other hand, the drying of the sample in the oven and the loss of water will reduce the sample volume, which was observed in each cycle. Fig. 5 shows the average positive volume change (expansion) and negative volume (contraction) in 12 consecutive cycles as a standard for each mixing design. This means that in the R80C30, the shrinkage of the sample after drying in the oven is greater than the amount of expansion of the sample in water, which ultimately shows the average volume changes in a wet cycle and drying of 9%.

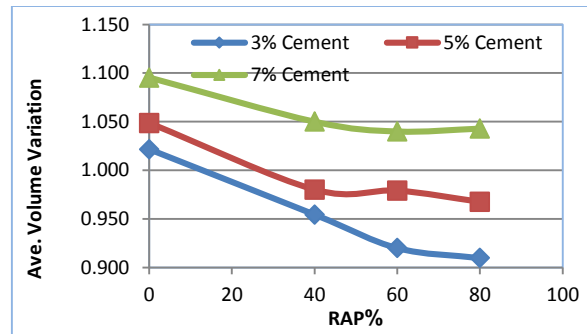


Fig. 5. Average of volume variation versus rap percent

Fig. 6 shows that samples subjected to 12 wet and dry cycles have lower compressive strength compared to samples processed under standard curing conditions for 28 days. This is likely due to the defects caused by successive wetting and drying and changing cyclic volumes in the stabilizing mixture. Samples without RAPs and with 80% RAPs have lower compressive strength compared to samples with 40% and 60% RAPs for mixing designs with 5% and 7% cement, which is different from samples with 3% cement and their different compressive strength.

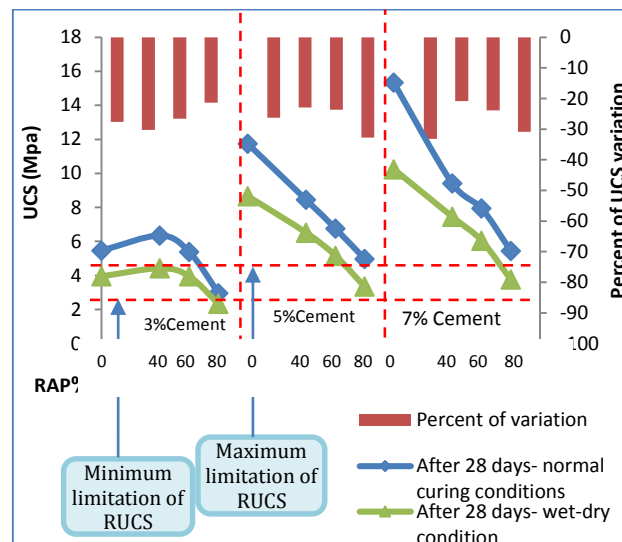


Fig. 6. Comparison of compressive strength in terms of percentage of RAPs- in normal 28- day samples curing and after 28- day under durability wet and drying condition

4. Conclusions

The purpose of this paper was to obtain the percentage of optimal RAP in cement-stabilized base mixtures according to durability criteria and to evaluate different durability tests and compare different criteria. Accordingly, the most important results of this research are as follows:

According to the results, it was found that the criterion of maximum compressive strength issue by various authorities as an indicator to control the occurrence of cracks in the cement-stabilized base layer and further reduce the potential for reflecting cracks in the asphalt surface layer, between 300 and 500PSI (2.1 to 3.5MPa) should be reviewed for base mixtures stabilized with cement containing RAPs.

The presence of RAPs in the cement- stabilized mixture changes the behavior of the mixture from brittle to flexible. In this regard, new limits can be defined between the maximum modified compressive strength of 5.75MPa and the minimum of 3.5MPa for cement-stabilized base mixtures containing RAPs.

It was observed that adding amounts of RAPs between 40 to 60% to the cement-stabilized base mixture can change the behavior of the mixture from brittle to flexible, and by increasing the adhesion resistance of bitumen in RAPs to the adhesion resistance of cement, The cracking potential of this type of mix is improved compared to the base mix stabilized with cement without RAPs.

It is suggested that a new criterion be selected in the selection of the minimum TSR for the examination of base mixtures stabilized with cement containing RAPs (between 50 and 70%) to estimate the durability of such mixtures. In this regard, the author is suggested more research.

According to the wet and dry test results, it seems that modifications should be made to the method of this test for stabilized mixtures containing RAPs. Further research is needed in this area.

5. References

- Yuan D, Nazarian S, Hoyos LR, Puppala AJ, "Cement Treated RAP Mixes for Roadway Bases", 2010.
- Ghanizadeh AR, Rahrovan M, Bafghi KB, "The effect of cement and reclaimed asphalt pavement on the mechanical properties of stabilized base via full-depth reclamation", *Construction and Building Materials*, 2018, 161, 165-174.
- Suddeepong A, Intra A, Horpibulsuk S, Suksiripattanapong C, "Science direct durability against wetting-drying cycles for cement-stabilized reclaimed asphalt pavement blended with crushed rock", *Soils Foundations*, 2018, 58 (2), 333-343.
- Xiao F, Yao S, Wang J, Li X, Amirhanian S, "A literature review on cold recycling technology of asphalt pavement", *Construction and Building Materials*, 2018, 180, 579-604.
- Newman J, Choo BS, "Advanced concrete technology", *Advanced Concrete Technology*, 2003, 1-1433.
- Tang S, Cao Y, Labuz JF, "Structural evaluation of asphalt pavements with full-depth reclaimed base", 2012.