ارزیابی پارامترهای موثر بر عمل آوری مخلوط های آسفالت بازیافت شده با کف قیر

سبحان سلیمانی گلسفیدی[۱]، سید علی صحاف[۲]

چکیده

عمل آوری مخلوط های آسفالت بازیافت شده با کف قیر در اثر تغییر در پارامترهای مختلف طرح دستخوش تغییرات زیادی خواهد شد. تاکنون روش استاندارد مشخصی برای عمل آوری این نوع از مخلوط های آسفالتی ارائه نشده است. توجه ویژه به بحث بازیافت سرد آسفالت با روش کف قیر بر اساس مزیت های اقتصادی، فنی و زیست محیطی باعث شده تا به نحوه ساخت و عمل آوری آنها نگاه ویژه ای گردد. از آنجا که نحوه عمل آوری، مشخصات عملکردی متفاوتی را در مخلوط های سرد بازیافت شده با کف قیر ایجاد می نماید لذا بررسی پارامتر عمل آوری به عنوان تاثیرگذارترین پارامتر طرح مخلوط مهم جلوه می نماید. در این پژوهش ابعاد مختلف عمل آوری مخلوط های آسفالت بازیافت شده سرد با کف قیر شامل مکانیزم عمل آوری براساس اصول میکرومکانیک، بررسی عمل آوری میدانی، تغییر شرایط عمل آوری ناشی از تغییرات رطوبت طی زمان، تاثیر فیلرهای فعال بر عمل آوری، ارزیابی همزمان آزمایشگاهی و میدانی نحوه عمل آوری و در نهایت پیشنهاد روش عمل آوری آزمایشگاهی جهت شبیه سازی با حالت میدانی، مورد بحث و بررسی قرار خواهد گرفت.

واژه‌های کلیدی: عمل آوری، مخلوط بازیافت شده سرد، کف قیر.

۱- مقدمه

عمل آوری[۳] فرآیندی است که در آن مقاومت و سختی[۴] مصالح (در این پژوهش مصالح آسفالتی مخلوط شده با کف قیر) با گذشت زمان افزایش می یابد[۱]. مقاومت و سختی مخلوط آسفالت کف قیری بلافاصله پس از اختلاط و تراکم، هم در آزمایشگاه و هم در میدان[۵]، پایین است و سپس از طریق عمل آوری افزایش می یابد[۲]. عمل آوری مخلوط های آسفالتی بازیافت شده سرد با کف قیر، بستگی به شرایط خارجی دارد[۳]. مخلوط های آسفالتی بازیافت شده سرد با کف قیر، مصالح

۱- دانشجوی دکترا، مهندسی عمران، گرایش راه و ترابری، دانشگاه فردوسی مشهد
۲- استادیار راه و ترابری دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد

[3] Curing
[4] Stiffness
[5] In-Field

چند مرحله ای هستند و درک مکانیسم عمل آوری آنها مستلزم بینش در مورد مکانیسم توسعه مقاومت هر فاز، تعامل بین این مراحل و اثرات شرایط خارجی است[۴]. درک مکانیسم عمل آوری مخلوط های آسفالتی بازیافت شده سرد با کف قیر برای موارد زیر ضروری است[۵] :

- توسعه روش های استاندارد عمل آوری آزمایشگاهی برای نشان دادن شرایط میدانی.
- توسعه روش های ساخت میدانی برای تسریع توسعه اولیه مقاومت و در عین حال بهینه سازی عملکرد بلند مدت.

اثرات شرایط مختلف عمل آوری مخلوط های آسفالتی بازیافت شده سرد با کف قیر توسط بسیاری از محققان ثبت شده است[۶ و ۷]. با این حال، این روش های عمل آوری آزمایشگاهی تا حد زیادی استاندارد نشده است[۸]. از طرفی، روش ساخت مخلوط های آسفالتی بازیافت شده سرد با کف قیر تا حد زیادی تجربی است و بر اساس تجربیات سیمان و امولسیون بوده و ممکن است منجر به عملکرد مطلوب برای مصالح کف قیری نگردد[۹و۱۰].

در این پژوهش ابعاد مختلف عمل آوری مخلوط های آسفالت بازیافت شده سرد با کف قیر طبق بندهای ذیل بررسی خواهد شد:

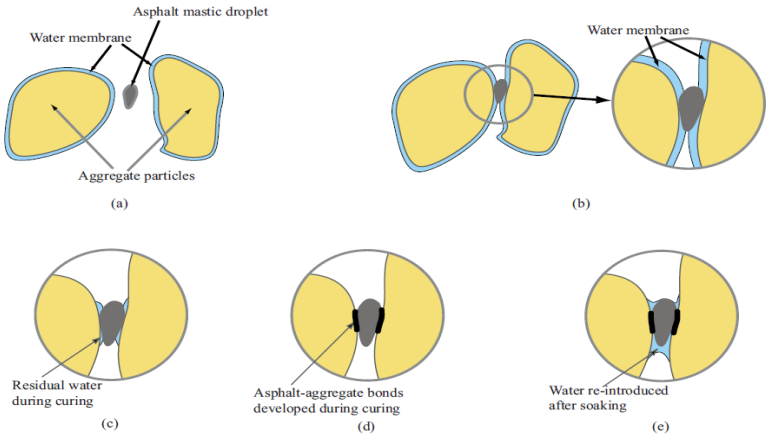
- مکانیزم عمل آوری براساس اصول میکرومکانیک[1]
- بررسی عمل آوری میدانی
- تغییر شرایط عمل آوری ناشی از تغییرات رطوبت طی زمان
- تاثیر فیلرهای فعال بر عمل آوری
- ارزیابی همزمان آزمایشگاهی و میدانی نحوه عمل آوری
- پیشنهاد روش عمل آوری آزمایشگاهی جهت شبیه سازی با حالت میدانی

۲-بررسی مکانیزم عمل آوری مخلوط های آسفالت بازیافت شده با کف قیر بر اساس اصول میکرو مکانیک

سیمان پرتلند با تقویت فاز فیلر معدنی، با مکانیزم عمل آوری سازگار همانند سیمان معمولی، خواص مشخصی از مخلوط های آسفالتی کف قیری را افزایش می دهد. مکانیزم عمل آوری ماستیک قیر کف دار، در درجه اول به تبخیر آب مربوط می شود. پیوند بین ماستیک قیر و ذرات سنگدانه تا زمانی که بیشتر آب موجود تبخیر شود نمی تواند به طور کامل توسعه یابد. این پیوند، پس از تشکیل، فقط در اثر ورود مجدد آب تا حدی آسیب خواهد دید. با مشاهده وجوه شکسته شده نمونه های آزمایشگاهی، مکانیزم ذکر شده تایید می شود. بررسی عمل آوری طولانی مدت، اعتبار این مکانیزم را بدون توجه به مدت زمان عمل آوری تایید نمود. روش های عمل آوری استاندارد برای استفاده جهت طراحی پیشنهاد می شود.

فرآیند عمل آوری ماستیک قیر و فیلرهای فعال به طور مستقل انجام می شود. مدرکی وجود ندارد که قیر کف دار شده با هر نوع فیلر فعالی واکنش شیمیایی نشان دهد. مکانیزم عمل آوری و توسعه مقاومت مربوط به قیر کف دار شده یا ماستیک قیر در مخلوط در شکل ۱ نشان داده شده است.

[1] Micromechanics Principles



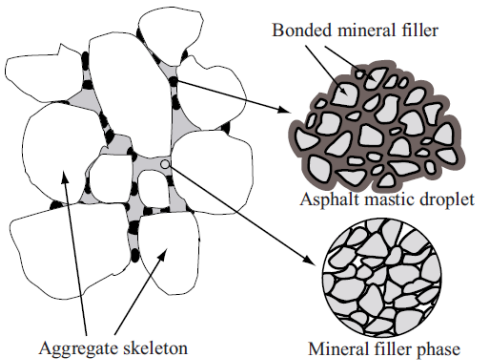
شکل ۱- مکانیزم عمل آوری و توسعه مقاومت مربوط به قیر کف دار شده یا ماستیک قیر در مخلوط[۱۱]

هنگامی که قیر کف دار به سنگدانه مرطوب تزریق می شود، تا حدی ریزدانه ها را به هم می چسباند و یک ماستیک قیر ایجاد می کند. این ماستیک قیر در مخلوط متراکم نشده به صورت قطرات کوچک قابل مشاهده است (شکل a .۱).

ذرات سنگدانه در مخلوط متراکم نشده، بیشتر با یک غشای آب پوشانده می شوند. پس از تراکم، قطرات ماستیک قیر با ذرات سنگدانه در تماس نزدیک هستند(شکل b. ۱) و ممکن است مقداری پیوند ایجاد نمایند. با این وجود به دلیل غشای آب، مقاومت ایجاد شده کم بوده و زمانی افزایش می یابد که بیشتر رطوبت قالب تبخیر شود(شکلc . ۱ وd).

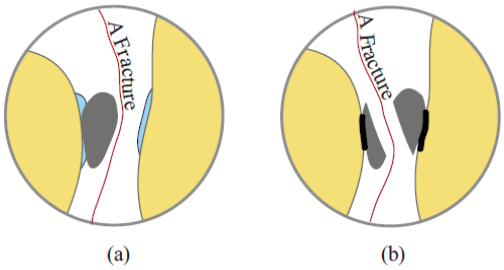
مقاومت کششی ایجاد شده در این مرحله از عمل آوری بسیار پایین و شبیه مقاومت مخلوط های کنترلی است. این مقاومت ناشی از مکش(ساکشن) آب باقی مانده است. طی فرآیند عمل آوری، ابتدا آب موجود در حفره های بزرگتر تبخیر می شود. به علت پتانسیل ترمودینامیکی پایین تر، تبخیر آب از حفره های کوچک به ویژه در نقاط تماس ذرات سنگدانه و ماستیک قیر دشوارتر می باشد. هنگامی که پیوند های بین ذرات سنگدانه و ماستیک قیر تشکیل شد، در صورت ورود مجدد آب به مخلوط، آسیب جزئی به این پیوند ها وارد می شود(شکل e. ۱).

تاثیر فاز فیلر معدنی در بحث فوق در نظر گرفته نشده است. فاز فیلر در مخلوط همراه با فاز ماستیک قیر، حفره های موجود در اسکلت سنگی را تا حدی پر می کند.(شکل۲).



شکل ۲- تصویری مفهومی از میکروساختار مخلوط کف قیری[۱۱]

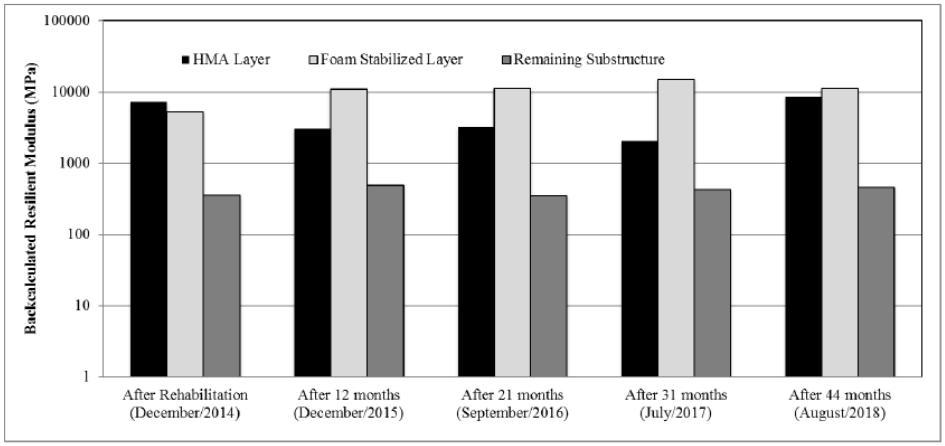
فیلر ها در طی فرآیند عمل آوری باعث استحکام می شوند. اما هنگامی که آب به مخلوط وارد می شود قدرت فاز فیلر معدنی به طور قابل توجهی کاهش می یابد. لذا مشخصات غشای های آب نشان داده شده در شکل ۱ لزوما دقیق نیستند. از آنجایی که سنگدانه های بکر[1] و فیلر های معدنی آب دوست هستند، در حالی که تراشه آسفالتی و قیر آب گریز هستند، به تصویر کشیدن رابطه های آنها با آب پیچیده می باشد. با این وجود شکل های ارائه شده برای توصیف پدیده های اساسی مفید می باشد. ضمن اینکه با مشاهده شواهدی از وجه شکسته شده نمونه های آزمایشگاهی مطالب فوق تایید گردید. هنگامی که یک شکستگی در حالت عمل آوری اشباع منتشر می شود با قطرات ماستیک قیر روبرو شده و در درجه اول از طریق رابط بین قطرات ماستیک قیر و ذرات سنگدانه ای که پیوندها کاملا مستحکم نشده اند حرکت می کند. (شکل a. ۳). با این حال ، در نمونه ای که تحت شرایط عمل آوری غیر اشباع و خیساندن بیشتر قرار گرفته، احتمال شکستگی از طریق قطره ماستیک قیر گسترش می یابد(شکل b. ۳) . همچنین ممکن است رابط ماستیک و سنگدانه شکسته شود، اما احتمال اینکه شکستگی به طور دقیق در قیر و سنگدانه شکافته شود کم است.



شکل ۳- رفتار شکستگی در a) نمونه عمل آوری شده b) نمونه عمل آوری نشده[۱۱]

۳-ارزیابی عمل آوری میدانی مخلوط های آسفالت بازیافت شده با کف قیر

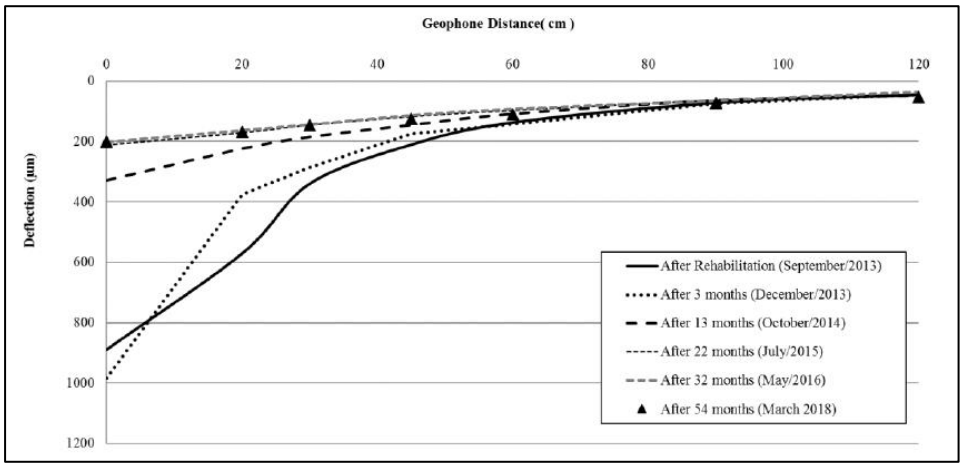
سختی لایه کف قیری با گذشت زمان افزایش می یابد(شکل ۴). علت این پدیده افزایش مقاومت مصالح در برابر از دست دادن رطوبت و عمل آوری قیر می باشد. سختی لایه های کف قیری با فصل تغییر می کند و وجود رطوبت در اثر بارندگی افزایش می یابد.



شکل ۴- افزایش سختی مخلوط بازیافت شده با کف قیر در طی زمان[۱۲]

[1] Virgin Aggregate

تغییرشکل روسازی و سرعت عمل آوری به طور مستقیم بر عمر مفید روسازی تاثیر می گذارد. اساس تثبیت شده کف قیری به عنوان جایگزینی مناسب برای اساس درشت دانه می تواند استفاده شود زیرا در برابر تغییرشکل های دائمی ناشی از ترافیک سنگین مقاوم است(شکل۵).

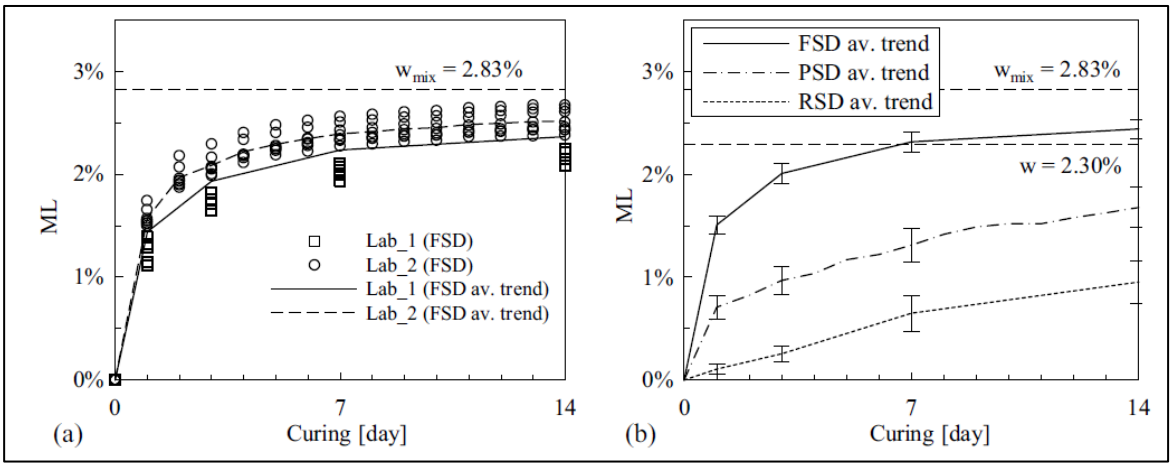


شکل ۵- مقایسه تغییرشکل روسازی بازیافت شده با کف قیر طی زمان های عمل آوری طولانی مدت[۱۲]

۴- روند تغییر شرایط عمل آوری ناشی از تغییرات رطوبت طی زمان

شرایط عمل آوری به شدت بر تکامل افت رطوبت تاثیر می گذارد. هر چه محدودیت های مربوط به تبخیر آب بیشتر باشد، افت رطوبت در طول زمان کمتر است. این اتفاق تا پایان مرحله عمل آوری ثابت رخ می دهد.

نمونه های در حالت کاملا عمل آوری شده، افت رطوبتی برابر با رطوبت مخلوط منهای آب هیدراتاسیون سیمان خواهند داشت که البته قابل اندازه گیری نمی باشد. حداکثر افت رطوبت را می توان پس از عمل آوری ۱۴ روزه در نظر گرفت. از سوی دیگر، مشاهدات نشان می دهد که با وجود تکامل تدریجی افت رطوبت حتی پس از ۱۴ روز عمل آوری نیز رطوبت در نمونه های تثبیت شده باقی مانده است(شکل ۶).



شکل ۶- تغییرات افت رطوبت نمونه های بازیافت شده با کف قیر طوی دوره عمل آوری ۷ روزه[۱۶]

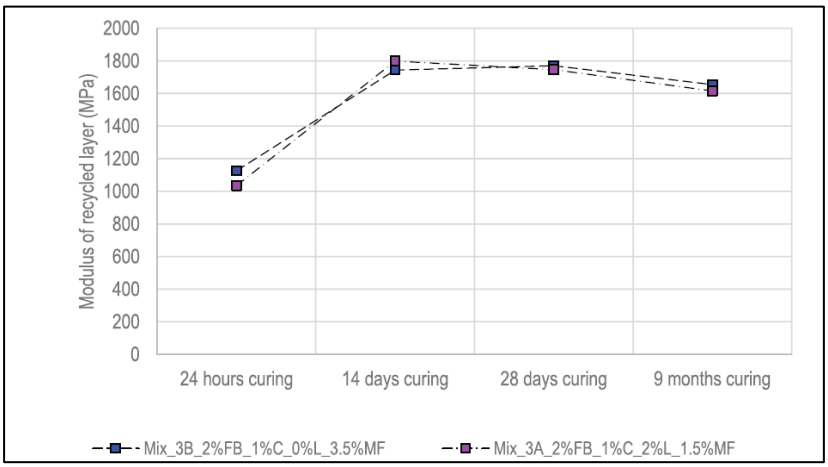
درصد آب بیشتر در شرایطی که تبخیر از سطح محدود می گردد در طی فرآیند عمل آوری باعث می شود هیدراتاسیون سیمان افزایش یافته و سختی نیز افزایش یابد. در همین شرایط چنانچه تبخیر از سطح آزاد باشد باعث هیدراتاسیون ناقص سیمان و اکسیداسیون جزئی قیر می گردد. با این وجود در هر دو شرایط ذکر شده با وجود آب باقی مانده بسیار متفاوت، مقادیر سختی یکسان خواهد بود.

مشاهدات تجربی نشان می دهد که در پایان عمل آوری ۱۴ روزه، سختی همچنان در حال افزایش است که نشان دهنده توسعه ناقص خواص مخلوط نهایی است. همچنین روش های مختلف عمل آوری بر مقاومت کششی خشک بی تاثیر بوده اما مقاومت کششی اشباع را به شدت متاثر می نماید لذا می توان حساسیت رطوبتی متفاوتی را شاهد بود. به علت رطوبت بیشتر ناشی از آب باقی مانده در زمان عمل آوری نمونه هایی که از تبخیر آنها جلوگیری به عمل آمده سبب مقاومت کششی بیشتری می گردد. حالت های عمل آوری مختلف سبب کاهش مقاومت رطوبتی از معیار ۷۰ درصد نخواهد شد. عمل آوری در حالت ممانعت از تبخیر سطح(هنگامی که در حالت اجرای میدانی لایه فوقانی بر لایه کف قیری سریعا اجرا می شود) باعث می شود تا رطوبت بیشتری در مقایسه با حالتی که تبخیر از سطح رخ می دهدوجود داشته باشد. با این وجود تفاوت حاصله از نظر سختی، مقاومت و حساسیت رطوبتی بر خصوصیات مکانیکی تاثیری ندارد.

۵- تأثیر فیلر های فعال بر عملکرد میدانی مخلوط های آسفالت بازیافت شده با کف قیر

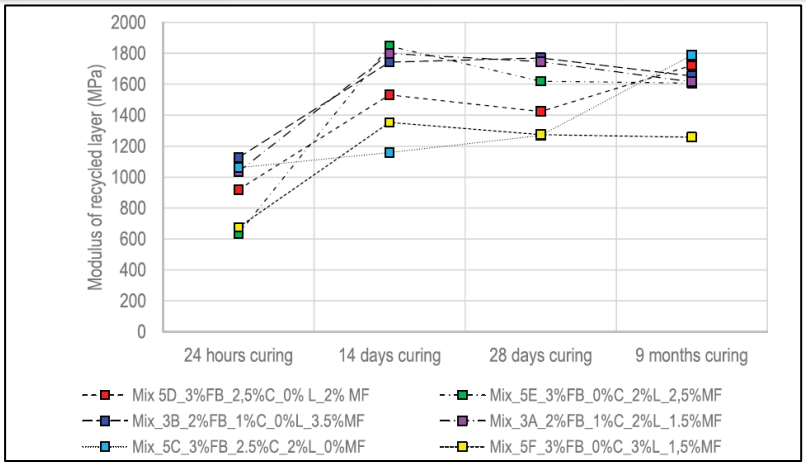
بررسی میدانی مخلوط کف قیری ساخته شده با سیمان و آهک نشان می دهد که درصد بالای تراشه های آسفالتی می تواند منجر به خستگی زودرس در روسازی و همچنین تغییرشکل دائمی شود. تراکم مخلوط ها ممکن است رشد سختی مخلوط های حاوی قیر سیمانی را تحت تاثیر قرار دهد. سختی مخلوط ها در ۱۴ روز اول عمل آوری سریعا افزایش می یابد.

افزایش سختی برای مخلوط های با درصد زیاد سیمان، کمتر است. مخلوط های کف قیری با درصد کم سیمان همانند مصالح چسبنده غیر پیوسته رفتار می کنند. به طوری که در دوره عمل آوری کوتاه مدت (۱۴ روز) سرعت افزایش سختی زیاد بوده و پس از آن این نرخ ثابت می ماند(شکل ۷).



شکل ۷- افزایش سختی مخلوط بازیافت شده با کف قیر حاوی فیلرهای فعال طی دوره عمل آوری[۱۳]

وجود آهک وقتی با مقدار زیادی سیمان مخلوط می شود، میزان افزایش سختی را کاهش می دهد در حالی که بدون سیمان سختی مخلوط ها در دوره عمل آوری، خیلی سریع افزایش می یابد. آهک سرعت رشد سختی را بیشتر کاهش می دهد(شکل ۸).

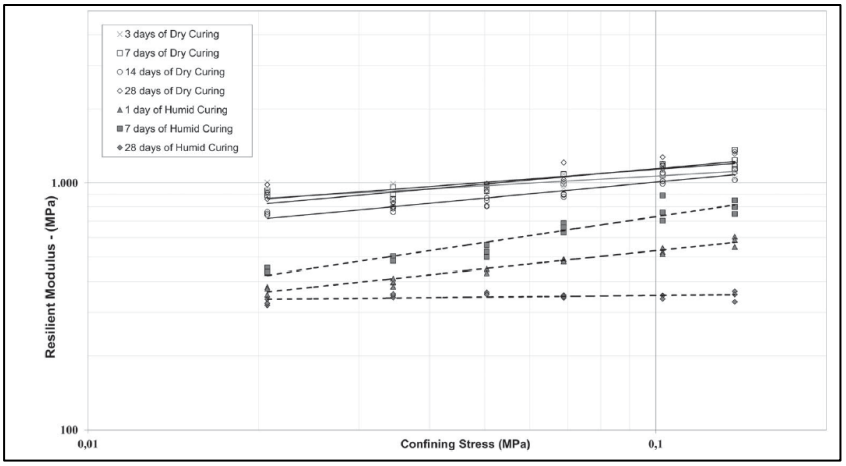


شکل ۸- مقایسه سختی مخلوط های بازیافت شده با کف قیر حاوی فیلرهای فعال مختلف طی دوره عمل آوری طولانی[۱۳]

همچنین در صورت نیاز به کاهش مقدار آب اضافی در مخلوط (در حالت بازیافت کارخانه ای) می توان از آهک استفاده نمود. مخلوط های با درصد بالای سیمان در پایان عمل آوری سختی بیشتری دارند، حتی اگر سرعت رشد سختی کمتری داشته باشند. مخلوط های بازیافتی کف قیری، حساسیت دمایی پایین تری نسبت به مخلوط های آسفالتی معمولی دارند.

۶- ارزیابی همزمان عمل آوری آزمایشگاهی و میدانی مخلوط آسفالت بازیافت شده با کف قیر

برای عمل آوری خشک، افزایش کمی در سختی مصالح برای دوره های عمل آوری بالاتر مشاهده می شود(شکل۹).



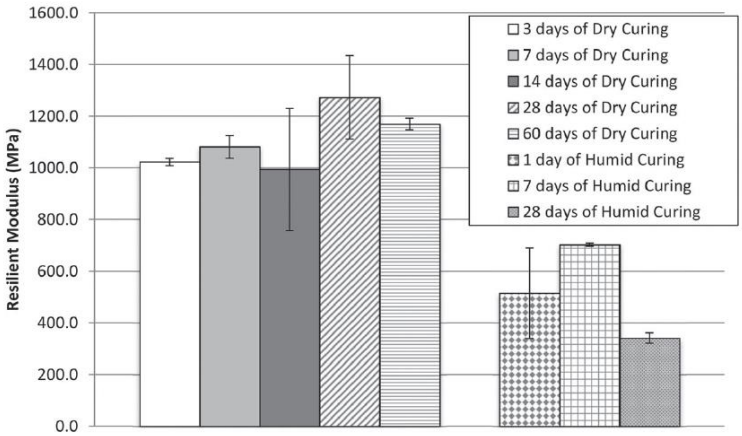
شکل ۹- افزایش سختی مخلوط بازیافت شده با کف قیر طی دوره عمل آوری خشک طولانی مدت و تحت تنش های محصور شده متفاوت[۱۴]

بیشترین میزان رطوبت در طی چند روز اول عمل آوری از بین می رود. پس از ۳ روز کاهش رطوبت به میزان ۴۰ درصد می رسد و پس از آن میزان افت رطوبت کاهش می یابد(جدول ۱).

جدول ۱- درصد رطوبت باقی مانده نمونه های بازیافت شده با کف قیر طی شرایط عمل آوری مختلف[۱۴]

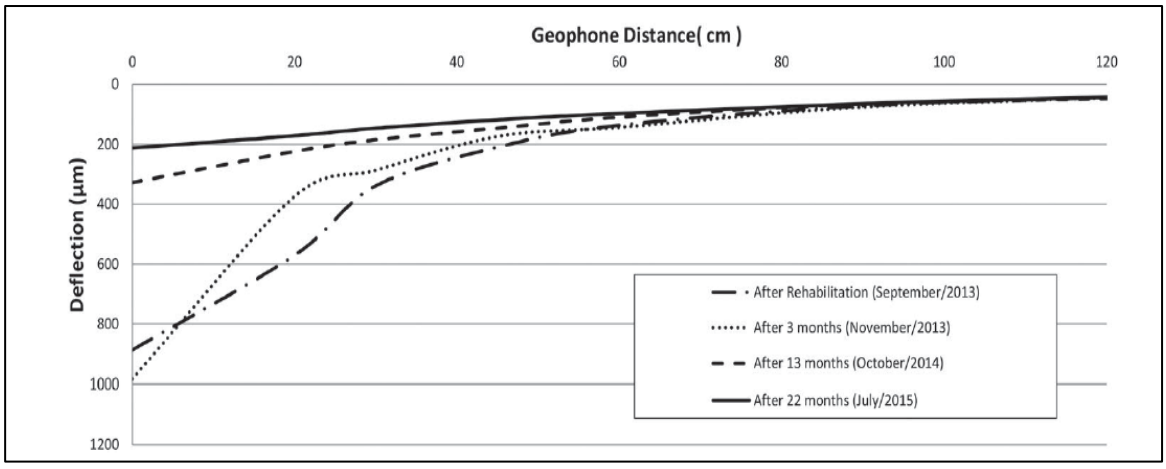
دوره عمل آوری(روز)	روش عمل آوری	متوسط رطوبت باقی مانده(درصد)	انحراف استاندارد(درصد)
۳	خشک	۳۹/۷	۱/۴
۷	خشک	۳۸/۹	۰/۵
۱۴	خشک	۲۴/۶	۴.۱
۲۸	خشک	۱۷/۱	۸/۶
۷	مرطوب	۹۷/۹	۱/۸
۲۸	مرطوب	۹۸/۳	۰/۲

پس از ۲۸ روز عمل آوری مرطوب، آسیب رطوبتی می تواند باعث کاهش سختی مخلوط کف قیری شود. لذا زمان عمل آوری طولانی تر، منجر به از بین رفتن پیوند بین قیر و سنگدانه می شود(شکل ۱۰).



شکل ۱۰- مقایسه سختی مخلوط های بازیافت شده با کف قیر در حالت عمل آوری اشباع و خشک طی دوره ۲۸ روزه[۱۴]

در مراحل اولیه عمر روسازی کف قیری، هنگامی که میزان رطوبت نسبتا بیشتر باشد، مستعد ایجاد تغییرشکل های دائمی است. این مرحله برای ایجاد عملکرد خوب میدانی باید لحاظ شود(شکل ۱۱).



شکل ۱۱- مقایسه تغییرشکل مخلوط بازیافت شده با کف قیر طی دوره زمانی طولانی مدت[۱۴]

عمل آوری به عنوان دوره ای درک می شود که در آن لایه کف قیری مقاومت خود را افزایش داده تا به مرحله ای پایدار برسد. مدت عمل آوری مورد نیاز به مصالح استفاده شده، پیکر بندی روسازی و اثرات فصلی و اقلیمی بستگی دارد.

بر اساس ارزیابی های میدانی، اگر چه دما بر سختی مخلوط کف قیری تاثیر دارد اما به نظر می رسد که کاهش رطوبت و تاثیر عمل آوری از اهمیت بیشتری برخوردار باشد. در طول دوره عمل آوری افزایش سختی تنها از طریق خروج رطوبت صورت نمی گیرد. بلکه تراکم ناشی از بارگذاری ترافیک و تقویت پیوند قیر و سنگدانه نیز سبب افزایش سختی می شود.

۷- پیشنهاد عمل آوری آزمایشگاهی جهت شبیه سازی با حالت میدانی

با افزایش درصد کف قیر، حداکثر وزن مخصوص خشک به تدریج کاهش می یابد که توسط پروژه های درجا اجرا شده تایید می شود.

جدول ۲- تغییرات حداکثر وزن مخصوص خشک با افزایش درصد کف قیر[۱۵]

	درصد تراشه در کل مخلوط	درصد کف قیر			
		۰	۳	۴	۵
حداکثر وزن مخصوص تئوریک(g/cm3)	۱۰۰	۲/۳۱۰	۲/۲۲۱	۲/۱۶۸	۲/۱۶۳
	۷۵	۲/۲۴۸	۲/۱۷۸	۲/۰۶۲	۲/۰۳۴
	۵۰	۲/۰۸۱	۲/۰۹۲	۲/۰۲۱	۱/۹۸۴
	۲۵	۱/۹۸۹	۱/۹۰۲	۱/۹۲۲	۱/۸۹۹

در هنگام اختلاط، ذرات با اندازه بزرگتر بهتر است به جای ترکیب با ریزدانه ها(که توسط اصول تئوری توصیه شده است) با کف قیر اضافی پوشش داده شود تا مقاومت بیشتری حاصل گردد. پوشش کف قیر روی ذرات بزرگ باعث به هم خوردن پیوند ذرات و اختلال در مقاومت فشاری می شود. بر اساس آزمایش کف سازی در آزمایشگاه، ۲/۵ درصد آب به عنوان درصد آب بهینه جهت کف سازی همراه با قیر در دمای $180^{\circ}C$ برای تولید کف قیر که سرعت انبساط آن ۱۵ الی ۱۲۰ برابر مقدار اصلی و نیمه عمر حدود ۲۰ ثانیه می باشد، در فشار هوای ۴ bar و فشار آب ۵ bar در نظر گرفته می شود.

بر اساس نمونه های آزمایشگاهی ساخته شده با ۴ نوع دانه بندی مختلف و ۳ نوع کف قیر متفاوت و ارزیابی آزمایشات عملکردی ، روش تراکم و عمل آوری به شیوه ذیل پیشنهاد می گردد.

۷۵ ضربه تراکم مارشال و پس از آن ۷ روز عمل آوری در دمای اتاق انجام پذیرد. نمونه های اشباع، ۲۴ ساعت دیگر نیز در زیر آب قرار بگیرند.

به طور کلی در هنگام استفاده از کف قیر یا استفاده از سنگ آهک ریز موجود در مخلوط، چگالی به تدریج کاهش می یابد. این پدیده نشان می دهد که کف قیر می تواند به جای مقاومت، انعطاف پذیری مخلوط را فراهم نماید.

لذا درصد رطوبت، دانه بندی و روش های عمل آوری و درصد فیلر فعال از جمله فاکتورهای مهم جهت بررسی و ایجاد یک راهنما در طرح مخلوط کف قیری می باشد.

۸- جمع بندی و نتیجه‌گیری

با توجه به نکات مطرح شده در این مطالعه، موارد زیر مختصرا به عنوان جمع بندی ارائه می گردد:

- هر چه محدودیت های مربوط به تبخیر آب بیشتر باشد، افت رطوبت در طول زمان کمتر است. این اتفاق تا پایان مرحله عمل آوری ثابت رخ می دهد. نمونه های در حالت کاملا عمل آوری شده، افت رطوبتی برابر با رطوبت مخلوط منهای آب هیدراتاسیون سیمان خواهند داشت که البته قابل اندازه گیری نمی باشد.
- عمل آوری در حالت ممانعت از تبخیر سطح(هنگامی که در حالت اجرای میدانی لایه فوقانی بر لایه کف قیری سریعا اجرا می شود) باعث می شود تا رطوبت بیشتری در مقایسه با حالتی که تبخیر از سطح رخ می دهدوجود داشته باشد. با این وجود تفاوت حاصله از نظر سختی، مقاومت و حساسیت رطوبتی بر خصوصیات مکانیکی تاثیری ندارد.
- افزایش سختی برای مخلوط های با درصد زیاد سیمان، کمتر است. مخلوط های کف قیری با درصد کم سیمان همانند مصالح چسبنده غیر پیوسته رفتار می کنند. به طوری که در دوره عمل آوری کوتاه مدت (۱۴ روز) سرعت افزایش سختی زیاد بوده و پس از آن این نرخ ثابت می ماند.
- وجود آهک وقتی با مقدار زیادی سیمان مخلوط می شود، میزان افزایش سختی را کاهش می دهد در حالی که بدون سیمان سختی مخلوط ها در دوره عمل آوری، خیلی سریع افزایش می یابد. آهک سرعت رشد سختی را بیشتر کاهش می دهد.
- بر اساس ارزیابی های میدانی، اگر چه دما بر سختی مخلوط کف قیری تاثیر دارد اما به نظر می رسد که کاهش رطوبت و تاثیر عمل آوری از اهمیت بیشتری برخوردار باشد.
- در طول دوره عمل آوری افزایش سختی تنها از طریق خروج رطوبت صورت نمی گیرد. بلکه تراکم ناشی از بارگذاری ترافیک و تقویت پیوند قیر و سنگدانه نیز سبب افزایش سختی می شود.

مراجع

[1] Asphalt Academy. (2009). Technical guideline: Bitumen stabilised materials. *A guide for the design and construction of bitumen emulsion and foamed bitumen stabilised materials*.
[2] Bocci, M., Canestrari, F., Grilli, A., Pasquini, E., & Lioi, D. (2010). Recycling Techniques and Environmental Issues Relating to the Widening of an High Traffic Volume Italian Motorway. *International Journal of Pavement Research & Technology*, *3*(4).
[3] Fu, P., & Harvey, J. T. (2007). Temperature sensitivity of foamed asphalt mix stiffness: Field and lab study. *International Journal of Pavement Engineering*, *8*(2), 137-145.
[4] Guatimosim, F. V., Vasconcelos, K. L., Bernucci, L. L., & Jenkins, K. J. (2018). Laboratory and field evaluation of cold recycling mixture with foamed asphalt. *Road Materials and Pavement Design*, *19*(2), 385-399.
[5] Guatimosim, F. V. (2015). Mechanical behaviour and structural performance of recycled foamed bitumen stabilized materials. *Thesis (Masters)*.
[6] Khosravifar, S., Schwartz, C. W., & Goulias, D. G. (2015). Mechanistic structural properties of foamed asphalt stabilised base materials. *International Journal of Pavement Engineering*, *16*(1), 27-38.
[7] Kuchiishi, A. K., Santos Antão, C. C. D., Vasconcelos, K., & Bernucci, L. L. B. (2019). Influence of viscoelastic properties of cold recycled asphalt mixtures on pavement response by means of temperature instrumentation. *Road Materials and Pavement Design*, *20*(sup2), S710-S724.
[8] Kuchiishi, A. K., Antão, C. C. D. S., Vasconcelos, K., Pires, J., Araújo, O. M. D. O., Bernucci, L. L. B., & Lopes, R. T. (2019). Investigation of the matric suction role on the curing mechanism of foamed asphalt stabilised mixtures. *Road Materials and Pavement Design*, *20*(sup1), S365-S389.
[9] Stroup-Gardiner, M., Godwin, S. R., & Williams, J. M. (2011). Recycling and Reclamation of Asphalt Pavements Using In-Place Methods. NCHRP Synthesis 421. *Transportation Research Board. Washington*, *82*.

[10] Hsu, D. Z., Chen, Y. W., Chu, P. Y., Periasamy, S., & Liu, M. Y. (2013). Protective effect of 3, 4-methylenedioxyphenol (sesamol) on stress-related mucosal disease in rats. *BioMed research international*, *2013*.
[11] Fu, P., Jones, D., Harvey, J. T., & Halles, F. A. (2010). Investigation of the curing mechanism of foamed asphalt mixes based on micromechanics principles. *Journal of Materials in Civil Engineering*, *22*(1), 29-38.
[12] Guatimosim, F. V., Vasconcelos, K., Kuchiishi, A. K., & Bernucci, L. L. B. (2019). Field evaluation of high level roads with foamed bitumen stabilized base layers. In *Airfield and Highway Pavements 2019: Testing and Characterization of Pavement Materials* (pp. 549-559). Reston, VA: American Society of Civil Engineers.
[13] Betti, G., Airey, G., Jenkins, K., Marradi, A., & Tebaldi, G. (2017). Active fillers' effect on in situ performances of foam bitumen recycled mixtures. *Road Materials and Pavement Design*, *18*(2), 281-296.
[14] Guatimosim, F. V., Vasconcelos, K. L., Bernucci, L. L., & Jenkins, K. J. (2018). Laboratory and field evaluation of cold recycling mixture with foamed asphalt. *Road Materials and Pavement Design*, *19*(2), 385-399.
[15] Huan, Y., Siripun, K., Jitsangiam, P., & Nikraz, H. (2010). A preliminary study on foamed bitumen stabilisation for Western Australian pavements. *Scientific Research and Essays*, *5*(23), 3687-3700.
[16] Pasetto, M., Pasquini, E., Baliello, A., Raschia, S., Rahmanbeiki, A., Carter, A., ... & Dave, E. V. (2020). Influence of curing on the mechanical properties of cement-bitumen treated materials using foamed bitumen: An interlaboratory test program. In *Proceedings of the 9th International Conference on Maintenance and Rehabilitation of Pavements—Mairepav9* (pp. 55-65). Springer, Cham.