

مروری بر ارتقای عملکرد خودترمیمی مخلوط آسفالتی با استفاده از کپسول‌های حاوی جوانساز

مقاله علمی - پژوهشی

محمود عامری، استاد، گروه راه و ترابری، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت، تهران، ایران
محمد امین حسین زاد درخشان*، دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت، تهران، ایران
*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: amin.derakhshan96@gmail.com

دریافت: ۱۴۰۳/۰۱/۲۰ - پذیرش: ۱۴۰۳/۰۵/۲۵

صفحه ۹۷-۱۲۰

چکیده

امروزه حمل‌ونقل زمینی بیشترین نقش را در جابه‌جایی افراد و کالاها دارد؛ در نتیجه پژوهشگران حوزه راهسازی تلاش می‌کنند که آلودگی محیط‌زیست و هزینه‌های مرتبط با تعمیر و نگهداری راه‌ها و همچنین استفاده از منابع اولیه طبیعی را با ارائه راهکارهای کاهش دهند. یکی از موضوعات برجسته در این حوزه بحث خودترمیمی آسفالت بوده که می‌تواند راه‌حلی ایده‌آل برای کاهش مشکلات مطرح‌شده باشد. تاکنون روش‌های مختلفی مانند گرمایش القایی، گرمایش ماکروویو و استفاده از نانو مواد و پلیمرها توسط متخصصین حوزه روسازی جهت بهبود عملکرد خودترمیمی روسازی آسفالتی پیشنهاد شده است که هرکدام از این روش‌ها مشکلاتی همچون هزینه بالا و آلودگی محیط‌زیست را دارند. هدف این مطالعه بررسی مکانیسم خودترمیمی و ارتقای عملکرد خودترمیمی مخلوط آسفالتی با استفاده از کپسول‌های حاوی جوانساز و مطالعه روش‌های ارزیابی عملکرد این کپسول‌ها در مخلوط آسفالتی است. این کپسول‌ها به علت عدم آلودگی محیط‌زیست و عدم اختلال در جریان ترافیک و همچنین هزینه کم، گزینه مناسبی جهت ارتقای عملکرد خودترمیمی روسازی آسفالتی می‌باشند.

واژه‌های کلیدی: خودترمیمی، کپسول‌های حاوی جوانساز، مخلوط آسفالتی

۱- مقدمه

شدت راحتی سواری و عمر سرویس‌دهی روسازی را کاهش می‌دهند. روش‌های تعمیر ترک‌خوردگی که شامل فوگ سیل^۱، اسلاری سیل^۲، آسفالت حفاظتی^۳ و غیره، روش‌هایی هستند که پس از وقوع ترک‌های قابل‌مشاهده اتخاذ می‌شوند که طی مدتی مانع جریان ترافیک شده و منابع و مصالح زیادی در این روش‌ها مصرف می‌کنند، علاوه بر این تعیین زمان تعمیر بهینه معمولاً دشوار است (Burningham & Stankevich, 2005). اگر شرایط محیطی مناسب فراهم باشد، ترک‌های ریز ایجادشده در آسفالت می‌توانند به‌خودی‌خود ترمیم شوند که نشان‌دهنده این است که مخلوط آسفالتی یک ماده خودترمیم است (Bazin & Saunier, 1967; Lee & Kim, 1998; D. N. Little

مخلوط آسفالتی عمدتاً شامل قیر و مصالح سنگی است که به‌طور گسترده‌ای در ساخت روسازی راه، تأمین راحتی سواری، کاهش صدا و بهبود ایمنی رانندگی مورد استفاده قرار گرفته و به‌طور اجتناب‌ناپذیری تحت تأثیر عوامل نامطلوبی، مانند بار ترافیکی، تغییرات دما و تابش اشعه فرابنفش قرار می‌گیرد که این عوامل باعث پیرشدگی قیر (Saoula, Soudani, Haddadi, Munoz, & Santamaria, 2013) و وقوع ریزترک‌ها (Tscheegg, Jamek, & Lugmayr, 2011; Wang, Zhang, Castorena, Zhang, & Kim, 2016; Wu et al., 2008) می‌شوند. اگر تعمیر مناسب و به‌موقع انجام نشود، ریزترک‌ها به ترک‌های بزرگ قابل‌مشاهده گسترش می‌یابند و به

آزمایشی را معرفی نمایند تا بتوان رفتار خودترمیمی مخلوط آسفالتی را پیش‌بینی کرد و سپس به درک کامل و صحیحی از رفتار مخلوط‌های آسفالتی در برابر تغییرات دما و بارگذاری ترافیکی رسید. در ادامه در این پژوهش به بررسی پدیده خودترمیمی و نظریه‌های مطرح‌شده در رابطه با آن و همچنین استفاده از کپسول‌های حاوی جوانساز برای ارتقای عملکرد خودترمیمی مخلوط آسفالتی پرداخته‌شده و روش‌های ارزیابی عملکرد کپسول‌ها شرح داده می‌شود.

۲- پدیده خود ترمیمی آسفالت

با الهام از خودترمیمی مواد پلیمری، خودترمیمی در آسفالت به‌عنوان بسته شدن فصل مشترک ترک تعریف می‌شود که به دلیل نفوذ مولکولی داخلی ترک بسته‌شده و عملکرد قسمت ترک‌خورده به حالت اولیه خود برگردد (Agzenai, Pozuelo, Sanz, Perez, & Baselga, 2015; Sun, Yu, Li, Lin, & Zhu, 2017). ماسد و همکاران دریافته‌اند که فرایند رشد ترک مرتبط با پیوستگی داخلی قیر^۱ مکانیسم غالب ترک‌خوردگی در مخلوط‌های آسفالتی تحت بار دینامیکی است. همچنین نشان دادند که خودترمیمی ترک تنها در ترک مرتبط با پیوستگی داخلی قیر اتفاق می‌افتد؛ یعنی مالتن قیر به‌راحتی انتشار پیدا می‌کند و باعث امکان بسته شدن مجدد ریزترک‌ها می‌شود. ولیکن ترک‌های مرتبط با چسبندگی بین قیر و سنگ‌دانه^۲ اصولاً ترمیم نمی‌شوند (Branco & Franco, 2008). آزمایش‌های مختلفی مانند خمشی^۳ نقطه‌ای و ۴ نقطه‌ای بر روی تیرچه و همچنین آزمایش کشش غیرمستقیم و خمشی نیم‌دایره^۵، برای بررسی توانایی خودترمیمی مخلوط‌های آسفالتی به‌کار رفته‌اند. رفتار خودترمیمی آسفالت توسعه ترک را به تأخیر می‌اندازد و عمر خستگی آسفالت را بیشتر می‌کند. در همین حال، این یک مسئله کاملاً پیچیده تحت تأثیر عوامل مختلفی مانند ترکیب شیمیایی قیر، میزان پیرشدگی، درجه خرابی، رطوبت، دمای ترمیم زمان و غیره است. مولکول‌های قیر با ساختار بلند و نازک و وزن مولکولی پایین، توانایی نفوذ و عملکرد ترمیم زیادی دارند (Bhasin & Motamed, 2011). سطح پیرشدگی بالاتر، عرض ترک گسترده‌تر و رطوبت همگی تأثیرات کم بر عملکرد خودترمیمی دارند (Lv, Huang, Zhu, & Xiao, 2017; Sun, Sun, Zhu, Ye, & Xu, 2018; G. Xu & Wang, 2017). می‌تواند سطح ترمیم ترک در آسفالت را بهبود بخشد.

(Bhasin, 2007) علت این امر وجود ویژگی خودترمیمی در قیر بوده که توسط بررسی‌های آزمایشگاهی ثابت‌شده است (Y. R. Kim, Little, & Lytton, 2003). همچنین خودترمیمی ذاتی مخلوط آسفالتی، باعث افزایش چشمگیر عمر روسازی در نتیجه امکان بهره‌برداری طولانی‌مدت از آن می‌گردد که خود باعث افزایش توجیه اقتصادی آن می‌گردد. با این حال، با توجه به عمر آسفالت و بار ترافیکی مکرر در طول عمر سرویس‌دهی، ظرفیت ذاتی خودترمیمی مخلوط آسفالتی به‌شدت محدود می‌شود که در عمل ترمیم خودکار ترک را دشوار می‌سازد (Qiu, 2008)؛ چنانچه بتوان راهکاری ارائه داد که باعث افزایش خودترمیمی و در نتیجه افزایش عمر بهره‌برداری از روسازی آسفالتی گردد، گامی مؤثر در بهره‌وری اقتصادی روسازی و کاهش نیاز به تعمیر و نگهداری، برداشته‌شده است. چندین راهکار جدید برای سرعت بخشیدن به فرآیند ترمیم پیشنهادشده است که عمدتاً شامل روش گرمایش القایی (A. García, Bueno, Norambuena-Contreras, & Partl, 2013) و روش کپسوله کردن جوان ساز (Á. García, Schlagen, van de Ven, & Sierra-Beltrán, 2010) است. روش گرمایش القایی با گرم کردن مواد رسانا و در نتیجه افزایش دمای آسفالت برای بهبود تحرک مولکول‌های موجود در قیر به کار می‌رود و در نهایت منجر به ترمیم ترک‌ها می‌شود. این روش به مواد رسانا مخلوط شده مخلوط آسفالتی و مداخلات انسانی در طول عمر سرویس نیاز دارد، همچنین گازهای مضر تولید کرده و روند پیرشدگی قیر را به دلیل فرآیند گرمایش افزایش دما شتاب می‌بخشد (Liu, García, Schlagen, & van de Ven, 2011; J Norambuena-Contreras & García, 2016). در مقایسه، روش کپسوله کردن جوان ساز به هیچ کمک خارجی نیاز ندارد، این کپسول‌ها باید در برابر شرایط مکانیکی و حرارتی در طول ساخت مقاوم بوده و به‌اندازه کافی حساس باشند تا به‌طور خودکار به ترک‌های ایجادشده در آسفالت پاسخ دهند که در توسعه روسازی هوشمند بسیار امیدوارکننده هستند (Á. García et al., 2010; Karlsson, 2006). در بررسی‌هایی که بر روی پدیده خودترمیمی در مخلوط آسفالتی انجام‌شده، تلاش اصلی محققان این بوده که در ابتدا بتوان بعد از درک روند بروز خرابی، نحوه عملکرد خودترمیمی شناسایی شود و سپس روندی برای شناخت پدیده‌ی خودترمیمی مخلوط آسفالتی تعریف گردد و برای اندازه‌گیری خودترمیمی شاخص خودترمیمی و روش

Schmets, Pauli, & Scarpas, 2009; Lv et al., 2017) نظریه انرژی سطحی بر اساس مکانیک شکست بنانهاده شده است که در آن کاهش انرژی سطحی به عنوان نیروی محرک رفتار خودترمیمی در نظر گرفته می‌شود. نظریه انتشار مولکولی، پدیده خودترمیمی را در مقیاس مولکولی توصیف می‌کند و در نتیجه نمی‌تواند به طور مستقیم ترمیم ترک‌های بزرگ‌تر را شرح دهد. نظریه میدان فازی با استفاده از میکروسکوپ نیروی اتمی (AFM)، پدیده خودترمیمی آسفالت را با تغییر ریزساختار مرتبط می‌سازد، اما هنوز ابهاماتی در مورد ویژگی‌های چند فازی قیر وجود دارد. نظریه جریان موینگی در مقیاس ماکرو پیشنهاد شده است که فرض اصلی این نظریه این است که قیر، یک سیال نیوتنی می‌باشد؛ بنابراین فرض آن این است که دما بالاتر از دمای گذار سیال نیوتنی می‌باشد که نمی‌تواند فرآیند خودترمیمی در دماهای پایین توصیف کند. در یک کلمه، توضیح کامل مکانیسم خودترمیمی قیر تنها با یک نظریه دشوار است. یک ترکیب مناسب از نظریه‌ها یک راه ممکن برای ارائه یک تفسیر کامل و قابل اعتماد از مکانیسم خود خودترمیمی قیر در مراحل و مقیاس‌های ترمیم است.

۳-۱- نظریه انرژی سطحی^۸

کیم و همکاران دریافتند که رابطه‌ای بین خودترمیمی و ساختار مولکولی قیر وجود دارد به طوری که هر چه تراکم زنجیره‌های هیدروکربنی طویل بیشتر باشد، عملکرد خودترمیمی ارتقاء می‌یابد زیرا این زنجیره‌های هیدروکربنی طولانی امکان داخل شدن به دو سطح ترک را دارند (B. Kim & Roque, 2006). در ادامه سایر محققین دریافتند که خودترمیمی ترک، ناشی از روندی شبیه خیس شدگی در سطح ترک و انتشار مولکولی قیر بین دو سطح ترک و در نتیجه بسته شدن و جوش خوردن ترک می‌باشد (Bhasin, Narayan, & Little, 2009). در ضمن کیم و همکاران دریافتند که پارامتر CH₂/CH₃ (نسبت متیلن به متیل) بیانگر طول زنجیره‌های هیدروکربنی بوده و هر چه این نسبت بیشتر باشد، قیر حاوی درصد بیشتری از زنجیره‌های هیدروکربنی طویل است. متیلن (CH₂) گروه پیوند کربنی- هیدروژن بوده و هر چه تعداد این پیوند در قیر بیشتر باشد، معرف وجود زنجیره‌های هیدروکربنی طویل بیشتر می‌باشد. زنجیره‌های کربنی طویل به راحتی در سطح ترک جایجا می‌شوند و هر چه مقدار زنجیره‌های کربنی طویل، بیشتر باشد خودترمیمی بیشتر است (B. Kim & Roque, 2009).

اما سرعت ترمیم وقتی که زمان ترمیم از مقدار خاصی فراتر رود، کمتر می‌شود (Lv et al., 2017).

یک محدوده دمایی بهینه وجود دارد که در آن عملکرد خودترمیمی به حداکثر مقدار خود می‌رسد (Á. García, 2012; Lv et al., 2017; Sun, Sun, et al., 2018). توجه به پیچیدگی عملکرد این عوامل، بررسی عملکرد خودترمیمی مخلوط آسفالتی برای درک عمیق از این موضوع ضروری است. جدول ۱ تأثیر عوامل مختلف بر روی خاصیت خودترمیمی مخلوط آسفالتی را نشان می‌دهد (Qiu, 2008).

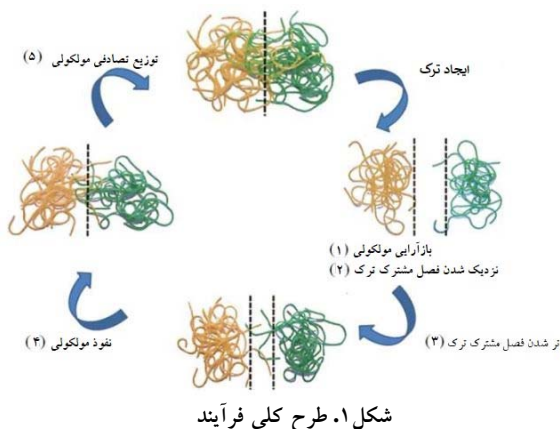
جدول ۱. تأثیر عوامل خارجی بر روی خاصیت خودترمیمی

پارامتر	خصوصیات	مقدار/نوع	قابلیت ترمیم
دوره‌های استراحت	کوتاه مدت/بلند مدت	افزایش	افزایش
درجه حرارت	تابستان‌های گرم	افزایش	افزایش
شیوه بارگذاری	تنش ثابت- کرنش ثابت	تنش ثابت	افزایش
سطح بارگذاری	سطح تنش/کرنش	افزایش	کاهش
سطح خرابی	ترک ماکرو	افزایش	کاهش
تنش‌های فشاری	اعمال تنش فشاری در طول دوره باربرداری	افزایش	افزایش
پیرشدگی	رفتار استراحت تنش	افزایش	کاهش
رطوبت	آب و رطوبت	افزایش	کاهش

۳- مکانیسم خودترمیمی آسفالت

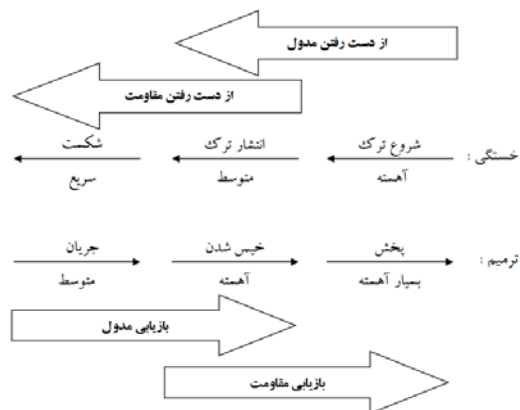
تجزیه و تحلیل جامع مکانیسم خودترمیمی، ارزش نظری مهمی برای توصیف دقیق و درک خواص خودترمیمی روسازی آسفالتی دارد. همان‌طور که قبلاً اشاره شد خودترمیمی مخلوط آسفالتی ناشی از وجود ویژگی خودترمیمی در قیر می‌باشد. در نتیجه در ادامه به بررسی دیدگاه‌های مختلف درباره تفسیر مکانیسم خودترمیمی در قیر پرداخته می‌شود که شامل نظریه انرژی سطحی، نظریه انتشار مولکولی، نظریه میدان فازی و نظریه جریان موینگی می‌باشد. تفسیر مکانیسم خودترمیمی در قیر از دیدگاه‌های مختلف (Á. García, 2012; Kringos, 2008).

۱ نشان داده شده، فرآیند ترمیم پنج مرحله‌ای مواد پلیمری، یعنی مرحله بازآرایی مولکولی، مرحله نزدیک شدن فصل مشترک ترک، مرحله تر شدن فصل مشترک ترک، مرحله نفوذ مولکولی و مرحله توزیع تصادفی مولکولی پیشنهاد شده است (R. Wool & O'connor, 1981).



ترمیم ترک در نظریه انتشار مولکولی

همان‌طور که در شکل ۲ نشان داده شده است، بر اساس نتایج بررسی رفتار خودترمیمی پلیمر، فیلیپس یک نظریه ترمیم سه مرحله‌ای ترک در قیر را پیشنهاد کرد: (۱) بسته شدن ماکرو ترک در اثر تنش و جریان قیر (۲) بسته شدن میکرو ترک با مرطوب شدن و چسبندگی ترک ناشی از انرژی سطحی (۳) بازیابی خواص مکانیکی به علت نفوذ مولکولی در فصل مشترک ترک (Phillips, 1998; Qiu, 2012). در این مدل، مرحله اول در کوتاه‌ترین زمان رخ می‌دهد، درحالی‌که دو مرحله آخر بسیار آهسته توسعه می‌یابند.



(2006 لیتل و همکاران دریافتند که اگر شرایط بارگذاری و خودترمیمی به شکلی باشد که انرژی اعمال شده به حد آستانه خرابی نرسد، آنگاه صرف‌نظر از تعداد تکرار بار، هیچ‌گاه ترک پیش‌رونده اتفاق نمی‌افتد (D. Little, Lytton, Williams, & Chen, 2001). با توجه به تحقیق مذکور اگر انرژی سطحی کمتر از انرژی مستهلک شده باشد، پتانسیل شیمیایی پتانسیل خودترمیمی منفی بوده، لذا ماده تمایل به افزایش انرژی سطحی دارد در نتیجه سطح جدیدی ایجاد می‌شود (ماده بیشتر ترک می‌خورد) در عین حال اگر مقدار انرژی مستهلک شده خیلی کم باشد و پتانسیل خودترمیمی مثبت باشد، تعادل انرژی به سمت کاهش انرژی سطحی می‌رود، با توجه به این بررسی، ایده روسازی‌های ماندگار^۹ شکل گرفت. در روسازی‌های ماندگار، آستانه تحمل خستگی^{۱۰} تعریف می‌شود یعنی در این شرایط انرژی مستهلک شده^{۱۱} به قدری کم است که پتانسیل خودترمیمی از پتانسیل خرابی در هر سیکل بارگذاری-استراحت بیشتر است و لذا هیچ‌گاه خرابی پیشرفت نمی‌کند. بر این اساس متغیر RDEC^{۱۲} (نسبت انرژی مستهلک شده در هر سیکل نسبت به سیکل قبلی) پیشنهاد شده است. تا بتوان سطح کرنش متناظر با آستانه تحمل خستگی را بررسی نمود. روح و همکاران بیان کردند که در دو حالت هیچ‌گاه ترک پیش‌رونده اتفاق نمی‌افتد (Roque, Simms, Chen, Koh, & Lopp, 2012):

(الف) در مخلوط‌هایی که آستانه شروع خرابی دارای انرژی بالا است و نرخ ایجاد ریزترک کم است (ضخامت آسفالت زیاد بوده و در نتیجه کرنش کم است).
 (ب) در شرایطی که نرخ خودترمیمی زیاد است. مثلاً دمای محیط زیاد است و یا نوع و مشخصات قیر و مخلوط آسفالتی به گونه‌ای است که نرخ خودترمیمی مخلوط زیاد است. این مفهوم با تئوری خستگی (که فرض می‌شود ترک خوردگی به صورت ممتد ادامه پیدا می‌کند و با تعداد تکرار بار کافی، ترک گسترش می‌یابد) در تضاد کامل است. به عبارت دیگر تنها اگر نرخ خرابی تجمعی از نرخ خودترمیمی تجاوز کند ترک خوردگی پیش‌رونده اتفاق می‌افتد.

۲-۳- نظریه انتشار مولکولی

نظریه انتشار مولکولی که از مکانیسم خودترمیمی پلیمر اقتباس شده است، برای بررسی مکانیسم خودترمیمی قیر در مقیاس مولکولی پذیرفته شده است. همان‌طور که در شکل

$R_h(t)$: تابع ترمیم ذاتی

R_0 : مقاومت در لحظه بسته شدن فصل مشترک ترک

$p(1 - e^{-qt^r})$: نشان‌دهنده مقاومت بازیابی شده ناشی از

نفوذ مولکولی و توزیع تصادفی در میان فصل مشترک ترک τ, q پارامترهای مرتبط با جنس ماده (مرتبط با وزن مولکولی و انرژی فعال‌سازی)

چو و همکاران، آزمایش ترمیم دو نمونهی رئومتر برشی دینامیکی^{۱۴} را که توسط لیتل و همکارانش برای شبیه‌سازی مستقیم فرآیند ترمیم ترک در قیر طراحی شده بود، اتخاذ کردند و با موفقیت ویژگی‌های مرحله خیس شدن و مرحله ترمیم درونی را شرح دادند (Bhasin et al., 2008). بر اساس نظریه انتشار مولکولی سان و همکارانش یک مدل ترمیم ترک برای قیر معرفی کردند. این مدل اثرات هم‌زمان زمان ترمیم و دما را بر عملکرد ترمیم ترک در نظر گرفته است که با معادله ۳ محاسبه می‌شود (Su, Qiu, Schlangen, & Wang, 2015a).

$$HI(t, T) = HI_0(T) + D(T) \times t \cdot 25 \quad (3)$$

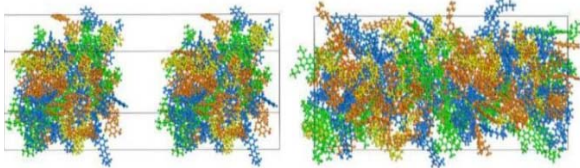
که در آن؛

$HI(t, T)$: شاخص ترمیم در زمان t و دما T

$HI_0(T)$: مقاومت در لحظه بسته شدن فصل مشترک ترک

$D(T)$: نرخ رشد مقاومت ناشی از نفوذ مولکولی در میان فصل مشترک ترک

در سال‌های اخیر، فن‌آوری شبیه‌سازی به‌عنوان ابزاری برای شبیه‌سازی مستقیم و توضیح مکانیسم خودترمیمی قیر و مخلوط آسفالتی استفاده شده است. همان‌طور که در شکل ۴ نشان داده شده است، مدل خودترمیمی ترک در قیر معمولاً با معرفی دو لایه از مدل‌های مولکولی قیر معرفی می‌شود.



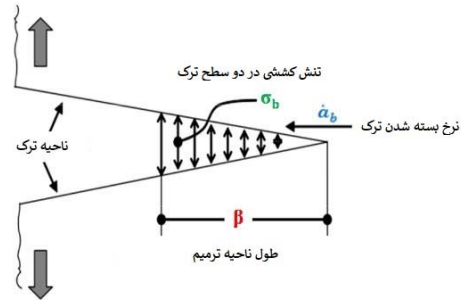
(۱)

(۲)

شکل ۴. فرآیند خودترمیمی ترک در قیر: (۱) مدل آسفالت دو لایه با ترک قبل از ترمیم؛ (۲) بستن ترک پس از ترمیم

در سال ۲۰۱۹، لو و همکاران با شبیه‌سازی‌های مولکولی، مکانیسم خودترمیمی قیر بازیافت شده را نشان دادند و بیان کردند که فرآیند خودترمیمی با جریان ویسکوز در دماهای

همان‌طور که در شکل ۳ نشان داده شده است، در سال ۲۰۰۸، بهسین و همکاران مفهوم ناحیه شکست / ترمیم را مطرح کردند (Bhasin, Little, Bommaravaram, & Vasconcelos, 2008). فرآیند ترمیم قیر در دو مرحله خیس شدن و ترمیم ذاتی تعریف شد (D. N. Bhasin & Motamed, 2011; Little & Bhasin, 2007). مرحله خیس شدن فصل مشترک ترک به وسیله تابع توزیع مرطوب شونده $\phi(t, X)$ تحت شرایط یک‌بعدی تعریف شد. در این مرحله، فصل مشترک ترک به تدریج تر شده و توسط برهم‌کنش بین مولکولی به یکدیگر نزدیک می‌شود و در نهایت ترک‌ها کاملاً بسته می‌شوند. بر اساس رابطه بین کار چسبندگی و پارامترهای ماده ارائه شده توسط اسچارپی، نرخ بسته شدن فصل مشترک ترک با معادله ۲ محاسبه شد.



شکل ۳. فرآیند شکست / ترمیم

$$\frac{d\phi(t, X)}{dt} = \dot{a}_b \quad (1)$$

$$= \beta \left[\frac{1}{D_1 k_m} \left\{ \frac{\pi W_c}{\xi (1 - \nu^2) \sigma_b \beta} \right. \right. \\ \left. \left. - D_1 \right\} \right]^{-1/m}$$

که در آن؛

$\phi(t, X)$: تابع توزیع خیس شدن

\dot{a}_b : نرخ بسته شدن ترک

β : طول ناحیه فرآیند ترمیم

W_c : کار چسبندگی

ν : ضریب پواسون

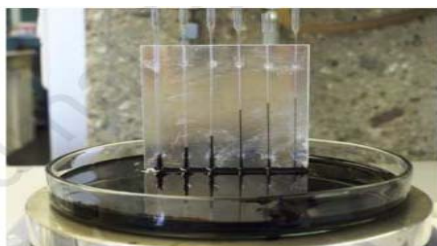
σ_b : مقاومت کششی بین فصل مشترک ترک

D_1, D_2 : پارامترهای مربوط به نرمی خزشی^{۱۵}

$$R_h(t) = R_0 + p(1 - e^{-qt^r}) \quad (2)$$

۳-۴- نظریه جریان موینگی

گارسیا و همکارانش مدل ترمیم ترک را برای قیر بر اساس نظریه جریان موینگی ارائه کردند (Á. García, 2012). آزمایش جریان موینگی در شکل ۵ نشان داده شده است که در آن ترک به موینگی عمودی شبیه‌سازی شده است. شش لوله موینه با طول ۱۰۰ میلی‌متر و قطر ۱,۵ میلی‌متر بریده شدند و به‌صورت موازی بر روی یک صفحه نازک شفاف ثابت شدند. سپس آن‌ها به‌صورت عمودی در یک ظرف شیشه‌ای با قطر ۱۰۰ میلی‌متر حاوی ۳۰ گرم قیر قرار داده شدند. نتایج نشان دادند که خودترمیمی با افزایش دما تسریع می‌شود و ترک‌های پایینی سرعت ترمیم بالاتری دارند. با استفاده از معادلات تعادل نیرو، ناحیه ترمیم ترک با استفاده از معادله ۴ به دست می‌آید. در سال ۲۰۱۹، گروه تحقیقاتی García از آزمایش جریان مویرگی استفاده کرد و دریافت که عملکرد خودترمیمی قیر در دمای بالاتر افزایش یافت که به فشار اضافی ناشی از انبساط حرارتی قیر و کاهش ویسکوزیته قیر نسبت داده شد (Grossegger & García, 2019).



شکل ۵. آزمایش جریان موینگی

$$A_E(\tau) = C \times e^{-D\tau} \left(-1 + e^{\frac{D\tau}{\gamma}} \right)^2 \quad (4)$$

$$C = \pi n \left(h_p + \frac{\gamma}{\rho g r} \right)^2 \quad (5)$$

$$D = \frac{\rho g r}{\beta} \quad (6)$$

γ : شعاع مویرگی (نصف پهنای ترک)

γ : کشش سطحی مایع

θ : زاویه تماس قسمت خیس شده

p : وزن مخصوص قیر

h_p : ارتفاع از بالای نمونه تا پایین ناحیه ترمیم

$h(\tau)$: ارتفاع ناحیه ترمیم

β : پارامتر انرژی تلف شده

بالاتر و بازیابی الاستیک در دماهای پایین‌تر، کنترل می‌شود. بررسی مکانیسم خودترمیمی با روش شبیه‌سازی مولکولی به‌وضوح حرکت مولکولی قیر در مدل ساخته‌شده را نشان می‌دهد و رفتار انتشار مولکولی نقش حیاتی در فرآیند خودترمیمی قیر دارد (Gao & Liu, 2019).

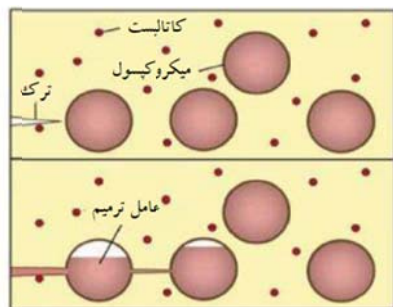
۳-۳- نظریه میدان فاز

ماهیت چند فاز قیر توسط لوپر و همکارانش با استفاده از میکروسکوپ نیروی اتمی معرفی شد (Loeber, Muller, Morel, & Sutton, 1998) که به تولید، انتشار و ترمیم ترک‌های ریز در قیر مرتبط بود (Pauli, 2014; Stangl, Jäger, & Lackner, 2006). کرینگوس و همکاران یک مدل ترمیم را بر اساس ویژگی چند فاز قیر پیشنهاد کردند (Kringos et al., 2009). آن‌ها همچنین فرآیند جداسازی فاز قیر ۳ نوع قیر شبیه‌سازی کردند (Kringos, Schmets, Scarpas, & Pauli, 2011). نهار با تحلیل نتایج میکروسکوپ نیروی اتمی گزارش داد که سطح تنش بر فرآیند گسترش ترک قیر تأثیر دارد به‌طوری‌که تحت شرایط تنش کم، هیچ ترک کوچکی در قیر رخ نداد. تحت سطح تنش متوسط، ترک‌های ریز به تدریج در فصل مشترک بین دو فاز رخ داده و به فاز ساختاری زنبوری گسترش می‌یابند. تحت شرایط تنش بالا، ترک‌های ریز به تدریج نفوذ کرده و در نهایت منجر به ایجاد ترک‌های بزرگ‌تر در فاز ساختاری زنبوری می‌شوند (Nahar, 2016). هو و همکاران یک مدل میدان فاز قیر چند مؤلفه‌ای را مطرح کردند، به‌طوری‌که متغیر میدان فاز قیر برای تشخیص و تمایز فاز سالم و فاز ترک‌خورده معرفی شد و فرآیند گسترش و ترمیم ترک در قیر مورد مطالعه قرار گرفت (Hou et al., 2016; Hou, Wang, Pauli, & Sun, 2015). بر اساس نظریه میدان فاز قیر، تغییر میکرو ساختار قیر در طول ترک و فرآیند ترمیم مورد بررسی قرار گرفته و برای توضیح انتشار و فرآیند ترمیم ترک اتخاذ شده است. با این حال، هنوز هم بحث‌هایی در مورد مکانیسم شکل‌گیری و ترکیب ساختار زنبوری در قیر وجود دارد، که مانع از کاربرد نظریه میدان فاز در توضیح جامع رفتار خودترمیمی قیر می‌شود (Das, Kringos, Wallqvist, & Birgisson, 2013).

خودترمیمی افزایش می‌یابد، مفید است. در ادامه به معرفی روش ارتقای عملکرد خودترمیمی به وسیله کپسول های جوانساز پرداخته می‌شود.

استفاده از کپسول‌های حاوی چسباندنده ریزترک‌ها

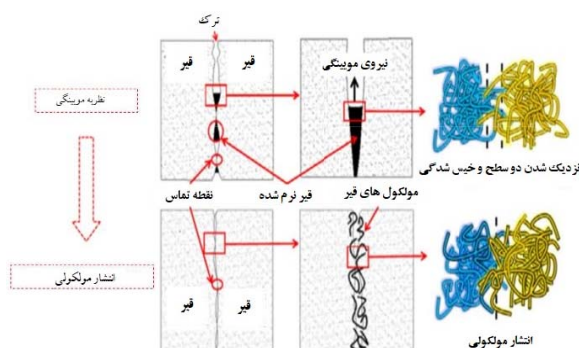
در شکل ۷ مفهوم خودترمیمی به روش میکروکپسول‌ها شرح داده شده است (R. P. Wool, 2008). در این روش در محیط، میکروکپسول‌هایی حاوی چسباندنده پلیمری مونومریورتان قرار داده می‌شود. این میکروکپسول‌ها پوسته نازکی دارند و هرگاه در محیط، ریزترک رشد پیدا کند و از این میکروکپسول‌ها عبور کند، پوسته میکروکپسول شکافته می‌شود و مونومر پلیمر چسباندنده یورتان در ریزترک جاری می‌شود و ریزترک را پر می‌کند سپس مونومر پلیمر (عامل ترمیم‌کننده) در حضور کاتالیست موجود در محیط واکنش می‌دهد و تبدیل به پلی یورتان شده و سخت می‌شود و ترک را می‌چسباند.



شکل ۷. خودترمیمی خودکار با استفاده از میکروکپسول، مونومر و کاتالیزور

مکانیسم کار روش کپسوله کردن جوانساز در شکل ۸ نشان داده شده است. جوان ساز به‌عنوان ماده هسته کپسوله شده توسط مواد مختلف پوسته برای تهیه کپسول‌هایی که با آسفالت مخلوط شده استفاده می‌شود. در طول عمر سرویس، سختی آسفالت به تدریج به دلیل پیرشدگی قیر افزایش می‌یابد که منجر به کاهش ظرفیت تنش استراحت و افزایش تنش اعمال‌شده بر روی پوسته کپسول می‌شود. در نتیجه، ترک اتفاق می‌افتد و کپسول‌ها را در همان نزدیکی سوراخ کرده و سپس جوان ساز به درون ترک جریان می‌یابد تا فرآیند ترمیم را با نفوذ به ترک‌ها، نفوذ قیر پیر در طول سطح ترک‌خورده و تشکیل مجدد ترکیب شیمیایی قیر پیر تسریع کند (Aguirre, Hassan, Shirzad, Daly, & Mohammad, 2016; Chiu & Lee, 2006; Shen,

دو پیش‌نیاز برای نظریه جریان مویرگی وجود دارد. اول، باید برخی نقاط تماس بین دو فصل ترک وجود داشته باشد که در آن جریان مویرگی به‌طور مداوم در امتداد ترک شروع و توسعه یابد. با توجه به تحلیل تنش، ترک‌های با موقعیت نقاط تماس پایین‌تر سرعت ترمیم بیشتری دارند. دوم اینکه این نظریه وقتی که دما به زیر دمای گذار سیال نیوتنی کاهش می‌یابد، قابل‌اعمال نیست (Sun, Sun, et al., 2017). نحوه فرآیند ترمیم ترک در نظریه مویرگی در شکل ۶ نشان داده شده است.



شکل ۶. فرآیند ترمیم ترک در نظریه مویرگی

۴- راهکارهای افزایش عملکرد عملکرد خودترمیمی در مخلوط آسفالتی

خاصیت خودترمیمی مخلوط‌های آسفالتی توسط مکانیسم فیزیکی - شیمیایی قابل‌تعریف است. همان‌طور که در قسمت بررسی انرژی سطحی عنوان شد، خودترمیمی عمدتاً تحت تأثیر انرژی سطحی حاصل از نیروهای لیفشیتز و اندروالسی^{۱۶} و پیوند هیدروژنی بین مولکول‌ها می‌باشد. این موضوع با روند انتشار مولکول‌ها و پیوندهای متقابل مولکول‌ها با سیستم (جامد-ژل) قیر (طبیعت کلئیدی قیر) ارتباط داده شده است (D. N. Little, Lytton, Williams, & Kim, 1999). در ضمن خودترمیمی مخلوط آسفالتی شدیداً تحت تأثیر شرایط بیرونی نظیر انتشار ریزترک‌ها است که خود تحت تأثیر نوع بارگذاری، میزان بار، تعداد تکرار بار، پیرشدگی و دما و رطوبت و میزان خرابی است (Y. R. Kim et al., 2002; Song, Little, & Masad, & Lytton, 2005). اگرچه پدیده خود ترمیمی واقعاً طول عمر چسباندنده‌های قیری را بهبود می‌بخشد، عوامل دیگری نظیر پیرشدگی این اثر مثبت را کاهش می‌دهند. لذا به دست آوردن اطلاعاتی در جهت اینکه چگونه قابلیت

مواد عمدتاً به منظور ممانعت از وقوع واکنش شیمیایی بین ماده فعال و محیط (پرتو فرابنفش، اکسیژن و رطوبت)، جلوگیری از عوارض جانبی ماده فعال، طولانی شدن مدت زمان ذخیره سازی ماده فعال، سهولت به کارگیری از طریق جامد کردن هسته مایع و انتشار کنترل شده مواد انجام می گیرد. به عنوان مثال، انتشار کنترل شده یک عامل دارویی فعال می تواند میانگینی از دارو را در مدت زمانی طولانی تر فراهم آورد. این ویژگی را می توان در عملیات کشاورزی و صنایع رنگ نیز به کار برد. مثلاً انتشار آفت کش ممکن است به زمانی معادل چند ماه نیاز داشته باشد. برای کپسوله کردن مواد هسته می توان از ترکیبات مختلف به عنوان پوسته کپسول بهره گرفت. مهم ترین عواملی که در انتخاب جنس پوسته کپسول در نظر گرفته می شوند، نوع ماده هسته و کاربرد آن پس از کپسوله شدن می باشند. از جمله ترکیبات پلیمری و معدنی که به عنوان پوسته در تهیه کپسول ها به کار می روند. می توان پلی استایرن، پلی یورتان ها، دی اکسید تیتانیوم، سیلیکا، پلی متیل متاکریلات ها، پلی اوره-فرمالید، پلی ملامین فرمالید و بسیاری ترکیبات دیگر را برشمرد.

معیارهای مهم در انتخاب پوسته کپسول ها

الف- سازگاری با ماتریس اصلی: میکروکپسول می بایست بیشترین قابلیت برقراری پیوند و یا سازگار با ماتریس پلیمری پیرامون خود داشته باشد تا بستری برای بروز نقص و ترک جدید ایجاد نکند.

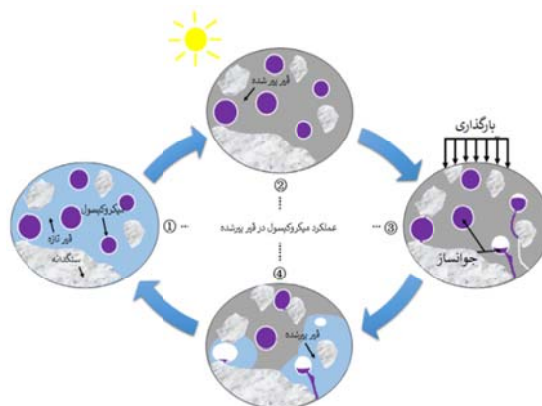
ب- سازگاری شیمیایی: از نظر شیمیایی پوسته باید نسبت به هسته و محیط اطراف بی اثر باشد.

ج- خواص مکانیکی: به منظور آسانی شکست در هنگام القای فرآیند ترمیم، استحکام جداره میکروکپسول باید کمتر از ماتریس در هنگام شکست باشد، اما از سوی دیگر به اندازه کافی بالا باشد تا در طی فرآیند تهیه آسیب نبیند.

د- ممانعت از نفوذ و پخش: پوسته میکروکپسول ها باید مانع از نفوذ و پخش عامل ترمیم کننده در ماتریس شود.

ه- پایداری حرارتی: عامل ترمیم کننده باید از نقطه نظر خواص حرارتی، در محدوده وسیعی از دما برای شرایط مختلف کاربری پایدار بماند. با توجه به خواص ذکر شده، اغلب از مواد اوره فرمالدهید، ملامین فرمالدهید، پلی یورتان یا آکریلات ها برای تهیه پوسته میکروکپسول استفاده می شود.

(Amirkhanian, & Aune Miller, 2007). مسائل اولیه این روش، یکپارچگی کپسول ها تحت شرایط حرارتی و مکانیکی در طول ساخت جاده و آزاد شدن به موقع جوان ساز وقتی ترک در طول عمر خدمت رخ می دهد، می باشد (Ghosh, 2009). علاوه بر این، توانایی انتشار جوان ساز نیز برای عملکرد خودترمیمی آسفالت از اهمیت زیادی برخوردار است (Su, Wang, Han, Yang, & Han, 2016). در یک وضعیت ایده آل، این روش می تواند به طور هوشمندانه ترک ها را در مرحله اولیه بدون کمک اضافی شناسایی و تعمیر کند که تأثیر مثبتی در کاهش هزینه نگهداری و انتشار آلاینده ها نشان می دهد؛ بنابراین، در ارتقای توسعه روسازی های هوشمند بسیار امیدوارکننده است.



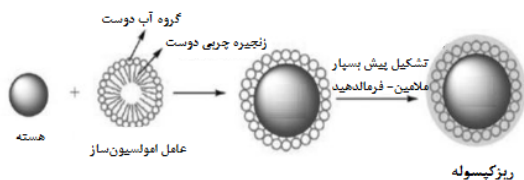
شکل ۸. مکانیسم روش کپسوله کردن جوان ساز

روش های کپسوله کردن جوان ساز

میکروکپسول ها ذرات کوچکی با یک پوسته جامد از جنس پلیمر یا مواد معدنی حاوی قطره ای از مایع یا گاز به عنوان ماده هسته هستند. پژوهش در زمینه ی میکرو و نانو کپسول ها در حدود سال ۱۹۵۰ میلادی آغاز شده است و در سال های ۱۹۷۰ میلادی شتابان گسترش یافته است. طی سال های اخیر، مطالعات گسترده ای در زمینه کپسوله کردن مواد، در زمینه علوم زیستی، شیمی، زیست فناوری، داروسازی و مهندسی انجام شده است. اصطلاح نانو کپسول برای تأکید بر کپسول هایی با ابعاد 10nm تا 1000nm می باشند، به کار می رود (Arshady & George, 1993). همچنین، میکروکپسول های تجاری عموماً دارای قطری در محدوده $3\mu\text{m}$ تا $800\mu\text{m}$ و محتوی ماده هسته به میزان ۹۰-۱۰ درصد وزنی است. میکروکپسوله کردن

روش‌های کپسوله کردن مواد

گسترده به‌عنوان مواد تشکیل‌دهنده پوسته کپسول با روش پلیمرش درجا به کار روند.

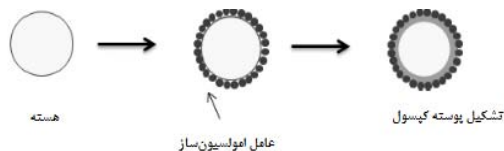


شکل ۱۰. مراحل تشکیل پوسته کپسول در روش بسیارش درجا

روش پلیمرش امولسیون^{۱۹}

بسیاری از کپسول‌ها از طریق پلیمرش واحدهای تکپار در فصل مشترک فاز آبی/آلی قطرات موجود در امولسیون تهیه می‌شوند (Karlsson & Isacsson, 2003). فاز پراکنده شده امولسیون به‌صورت قطرات ریز در داخل فاز پوسته پراکنده می‌شوند و یک مخلوط ناهمگن از قطرات نیز پراکنده شده تشکیل می‌شود که این قطرات هسته کپسول‌ها را تشکیل می‌دهند. تشکیل پلیمر در فصل مشترک فاز آبی/آلی پیوسته کپسول را ایجاد می‌کند.

در این روش ممکن است پلیمرها از واکنش‌های تراکمی مانند واکنش آمین‌ها با آلدهیدها، کلرید اسیدها، یا ایزوسیانات‌ها یا واکنش‌های پلیمرش تکپارهایی مانند مشتقات استایرن به‌صورت درجا تشکیل شوند. امولسیون‌ها بر اساس پایداری و اندازه قطرات به ماکرو، میکرو و مینی امولسیون‌ها دسته‌بندی می‌شوند. حتماً دست‌یافت می‌شوند. پایداری امولسیون‌ها به‌شدت تابع امتزاج‌پذیری ماد آلی و آبی و کشش سطحی مایع هسته است.



شکل ۱۱. مراحل تشکیل پوسته کپسول در روش بسیارش امولسیونی

روش تجمع لایه - لایه^{۲۰}

تهیه کپسول‌هایی با پوسته خارجی متشکل از بس الکترولیت، از طریق روش تجمع لایه‌لایه امکان‌پذیر است (Shenoy, Antipov, Sukhorukov, & Möhwald, 2003).

کپسوله کردن مواد را می‌توان به روش‌های مختلفی انجام داد و انتخاب روش به توانایی مشارکت دادن مواد در کپسول‌ها بستگی دارد. مواد هسته ممکن است دارای فاز آبی، آلی و یا معدنی باشند و روش کپسوله کردن این هسته‌ها از شکل کروی یا بیضوی کپسول‌ها متأثر است (Khavari, 2010). شکل نهایی کپسول ناشی از شکل قطرات مایع موجود در امولسیون است که شکل قطرات نیز به‌نوبه خود به گرانروی، کشش سطحی مایع هسته و نوع عامل امولسیون ساز به‌کاررفته برای پایدارسازی قطرات بستگی دارد. روش‌های فیزیکی-شیمیایی مختلفی برای میکروکپسوله کردن مواد در دسترس است که می‌توان به روش‌های پلیمرش درجا، پلیمرش امولسیونی، تجمع لایه-لایه چند الکترولیتی، توده‌ای و جدایش فاز درونی اشاره کرد. علاوه بر روش‌های تهیه میکروکپسول، برخی روش‌های دیگر به‌طور خاص برای تهیه نانو کپسول به کار می‌روند که می‌توان روش امولسیون-نفوذ، نانو رسوب‌دهی، امولسیون دوتابی، امولسیون-توده، پلیمر-پوشش، تجمع لایه-لایه و تبخیر حلال را نام برد (Sarier & Onder, 2007). در ادامه، به‌اختصار برخی از روش‌های کپسوله کردن مواد هسته را شرح داده می‌شود.

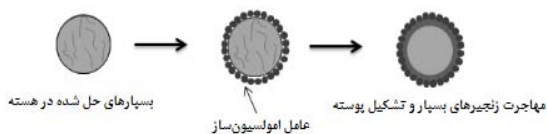
روش پلیمرش درجا^{۱۷}

در این روش، دو مایع امتزاج‌ناپذیر^{۱۸} مانند آب و حلال‌های آلی به کار می‌روند و تمامی مواد تشکیل‌دهنده پوسته در یک‌فاز (فاز پیوسته یا فاز پراکنده‌کننده) حضور دارند که با پیشرفت واکنش الیگومرها و زنجیره‌های بلندتر پلیمری در فصل مشترک روغن - آب رسوب می‌کنند و به تشکیل پوسته می‌انجامند (Caruso et al., 2009).

روش پلیمرش درجا به روش پلیمرش بین سطحی بسیار شبیه است. از مشخصه‌های مهم روش پلیمرش درجا این است که هیچ واکنش‌گری در ماده هسته وجود ندارد و تمام واکنش‌های پلیمرش در فاز پیوسته رخ می‌دهند. درحالی‌که در روش پلیمرش بین سطحی دو فاز پیوسته و پراکنده شده در واکنش‌های پلیمرش و تشکیل پوسته مشارکت دارند (Caruso et al., 2009). پایداری شیمیایی و استحکام خوب اوره-فرمالدهید و ملامین-فرمالدهید موجب شده است این ترکیبات به‌طور

روش جدایش فاز داخلی^{۲۲}

در این روش، یک پلیمر در مخلوطی حاوی حلال‌های فرار و غیر فرار حل می‌شود. قطرات حلال حاصل در یک لایه آبی معلق می‌شوند، به طوری که با اختلاط مداوم و به کارگیری عامل امولسیون ساز پایدار می‌شود. هنگامی که حلال فرار تبخیر شود، رسوب کردن پلیمر آغاز می‌شود و پلیمر به فصل مشترک فاز آبی/آلی مهاجرت می‌کند. زمانی که حلال به طور کامل تبخیر شد، پلیمرها برای تشکیل پوسته منعقد می‌شوند.



شکل ۱۴. مراحل تشکیل پوسته کپسول در روش جدایش

فاز داخلی

این روش برای تهیه کپسول‌هایی با جنس دیواره پلی استایرن، پلی متیل متاکریلات، پلی تتراهیدروفوران، مناسب است. این روش در حالتی که پلیمر مورد نظر در هسته قابل حل باشد یا این که در حلال فرار نامحلول باشد، عملی نیست. در جدول ۲ روش‌های میکروکپسوله کردن مواد باهم مقایسه شده‌اند.

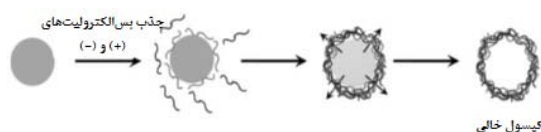
روش‌های استفاده شده کپسوله کردن جوان ساز برای

ارتقای خودترمیمی مخلوط آسفالتی

کپسول‌های حاوی جوان ساز از دو جزء اصلی تشکیل می‌شوند: (۱) مصالح هسته که شامل جوان ساز می‌باشد (۲) مصالح پوسته یا غشاء که مصالح هسته را پوشانده و از آن حفاظت می‌کند. برخی از انواع کپسول‌ها یک ساختار ماتریسی نیز دارند که به صورت هسته جامد با شبکه‌های حاوی جوان ساز می‌باشند (Jyothi et al., 2010). با توجه به اندازه کپسول‌ها آن‌ها را می‌توان به سه گروه نانو کپسول با اندازه کمتر از یک میکرومتر، میکرو کپسول با اندازه یک تا هزار میکرومتر و ماکرو کپسول با اندازه بزرگ‌تر از هزار میکرومتر تقسیم‌بندی کرد (Whelehan & Marison, 2011). بر اساس مورفولوژی و شکل کپسول‌ها نیز می‌توان سه دسته مختلف برای کپسول‌ها در نظر گرفت: (۱) کپسول‌های هسته‌ای-غشائی (۲) کپسول‌های مشبک حفره‌ای (۳) کپسول‌های به شکل لیاف فیبری. شماتیک کلی این کپسول‌ها در شکل ۱۵ نشان داده شده است (Gonzalez-Torre & Norambuena-Contreras, 2020).

این روش بر اساس خود تجمعی بس الکتروولیت‌های دارای بار منفی است که به تشکیل لایه‌های متوالی بس آنیون‌ها و بس کاتیون‌های جذب شده منجر می‌شود. از آنجایی که نفوذپذیری دیواره پیوسته تشکیل شده بالا است، هسته کپسول به راحتی می‌تواند با محلول خارجی مبادله شود.

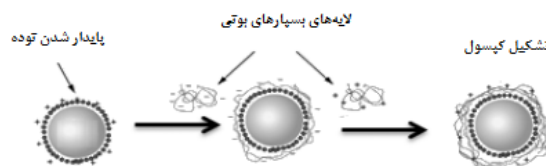
ترکیباتی از جمله پلی استایرن، سیلیکا، یا ملامین - فرمالدهید، به عنوان هسته‌های فدا شوند به کار گرفته شده‌اند. پلی دی آلایل دی متیل آمونیوم کلراید یا پلی آلایل آمین هیدرو کلراید به عنوان اجزای کاتیونی نمک سدیم پلی آکریلیک اسید با نمک سدیم پلی استایرن سولفات به عنوان اجزای آنیونی عمل می‌کند که به عنوان بس الکتروولیت قابل استفاده است (Shenoy et al., 2003).



شکل ۱۲. مراحل تشکیل پوسته کپسول در روش تجمع لایه لایه

روش توده‌ای^{۲۱}

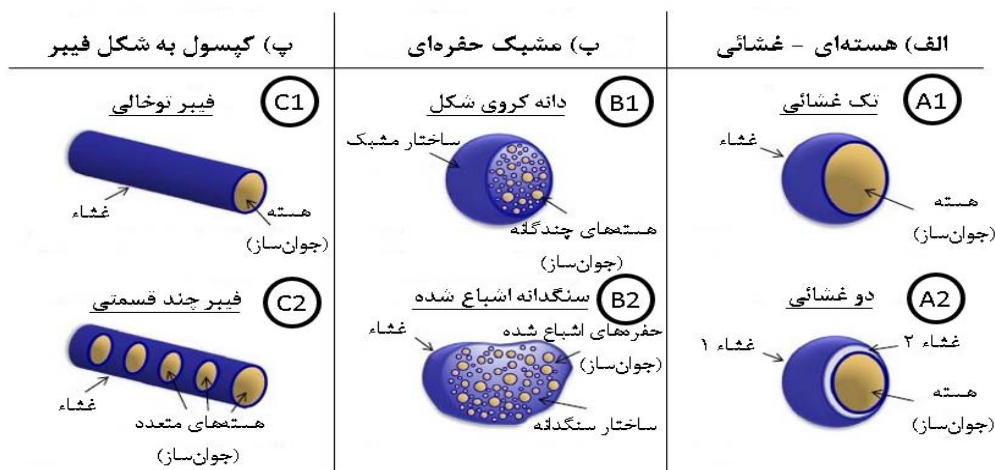
در این روش ماده هسته را که معمولاً ماده‌ای روغنی است، در یک محلول پلیمری (محلول آبی پلیمر کاتیونی مانند ژلاتین) پراکنده می‌کنند. سپس در حضور پلیمر دوم (محلول آبی پلیمر آنیونی مانند صمغ عربی) پوسته اطراف هسته از ته نشینی توده کمپلکسی، شامل دو پلیمر با بار مخالف خنثی شده در یک محلول آبی، تشکیل می‌شود (Esser-Kahn, Odom, Sottos, White, & Moore, 2011). فاز روغنی شامل یک پلیمر و فاز آبی شامل یک پلیمر با بار مخالف است. جذب یک پلیمر توسط پلیمر دیگر موجب تشکیل توده می‌شود، به طوری که توده به فصل مشترک فاز آبی/آلی مهاجرت می‌کند و پوسته تشکیل می‌شود. روش توده‌ای برای کپسوله کردن روغن‌های معطر، بلورهای مایع، رنگ‌ها یا جوهرها به کار می‌رود.



شکل ۱۳. مراحل تشکیل پوسته کپسول به روش توده‌ای

جدول ۲. مقایسه روش‌های میکروکپسوله کردن مواد (Esser-Kahn et al., 2011)

معایب	مزایا	روش
۱- امکان کپسوله کردن هسته‌ای خاص به دلیل حساسیت شدید فرایند به قطبیت ماده هسته و پوسته	۱- ایجاد دیواره‌های محکم، فشرده و ترد ۲- سهولت تهیه میکروکپسول‌ها	بسپارش درجا
۱- دشوار بودن کپسوله کردن هسته‌های آبی ۲- عامل امولسیون ساز و بسپارش خاص ۳- گستره توزیع اندازه وسیع ۴- توانایی یک‌بار بارگیری هسته	۱- ایجاد دیواره‌هایی با استحکام بالا ۲- ایجاد دیواره‌های ضخیم ۳- گستره توزیع اندازه کپسول محدود ۴- مقادیر تهیه بزرگ	بسپارش امولسیون
۱- دشواری تهیه کپسول‌ها ۲- استحکام ساختاری ضعیف دیواره ۳- دشوار بودن جداسازی کپسول‌ها در هنگام خشک شدن ۴- نیازمند برخی هسته‌ها به اسید قوی در مراحل تهیه میکروکپسول	۱- سازگار با دسته‌های آبی با آلی ۲- امکان بارگیری مجدد هسته ۳- گستره توزیع اندازه کپسول محدود	تجمع لایه‌لایه
۱- نیاز به هسته چربی دوست ۲- استحکام کم دیواره هسته ۳- کند بودن سرعت تشکیل دیواره ۴- امکان یک‌بار بارگیری هسته	۱- تهیه آسان کپسول‌ها ۲- سهولت استفاده در رهاسازی حرارتی	توده‌ای
۱- نیاز به هسته چربی دوست ۲- گستره توزیع اندازه وسیع ۳- امکان یک‌بار بارگیری هسته	۱- دیواره‌های دارای استحکام بالا ۲- قابل استفاده برای بسپاری‌ای غنی از کربن ۳- مناسب برای رهاسازی حرارتی	جدایش فاز داخلی



شکل ۱۵. تقسیم‌بندی انواع کپسول‌های حاوی جوان‌ساز بر اساس شکل آن‌ها

در یک دهه اخیر انواع مختلفی از کپسول‌های حاوی جوان‌ساز مورد استفاده واقع شده است و هم‌اکنون نیز محققان مطالعات گسترده‌ای برای تکامل فرایند خودترمیمی مصالح قیری با استفاده از کپسول‌های حاوی جوان‌ساز انجام می‌دهند.

سیر تکامل کپسول‌های حاوی جوان‌ساز استفاده‌شده در و مخلوط‌های آسفالتی
 جداول ۳ خلاصه‌ای از انواع و مشخصات کپسول‌های حاوی جوان‌ساز استفاده‌شده در مخلوط‌های آسفالتی را نشان می‌دهد.

جدول ۳. مشخصات کپسول‌های حاوی جوان‌ساز استفاده‌شده در مخلوط‌های آسفالتی

اندازه (μm)	مصالح استفاده‌شده در کپسول‌ها			روش کپسوله کردن	سال	منبع
	ساختار ماتریس	غشاء	هسته			
۱۱-۲۷	-	MMF	روغن آروماتیک صنعتی	پلیمریزاسیون درجا + انعقاد دومرحله‌ای	۲۰۱۲	(Su & Schlangen, 2012)
۵-۳۰	-	MMF	روغن صنعتی	"	۲۰۱۳	(Su, Schlangen, & Qiu, 2013)
۱۰-۲۰	-	MMF	جوان‌ساز صنعتی	"	۲۰۱۳	(Su, Qiu, & Schlangen, 2013)
۵-۵۵	-	MMF	پسماند روغن آشپزی	"	۲۰۱۵	Su, Qiu, Schlangen, & Wang,) (2015b)
۱۰-۳۰	-	MMF	روغن آروماتیک صنعتی	"	۲۰۱۵	(Su, Qiu, et al., 2015a)
۱۶(avg)	-	MMF	روغن آروماتیک صنعتی	"	۲۰۱۵	(Su, Schlangen, & Wang, 2015)
۱۰-۳۰	-	MMF	روغن آروماتیک صنعتی	"	۲۰۱۶	J.-F. Su, Y.-Y. Wang, et al.,) (2016)
۱۰-۳۰	-	MMF	دی‌فنیل‌سیلان	"	۲۰۱۶	105(J. Su et al., 2016)
۲۰-۴۰	-	MMF+ CaCO ₃ پودر	روغن آروماتیک صنعتی	"	۲۰۱۶	(Y.-Y. Wang et al., 2016)
۱۰-۳۰	-	MMF	روغن آروماتیک صنعتی	"	۲۰۱۶	(J.-F. Su, P. Yang, et al., 2016)
۴۰۰- ۶۰۰	ساختار پلیمری کلسیم آلزینات	-	جوان‌ساز صنعتی	قطرات میکروسیال +ژله‌ای شدن یونی	۲۰۱۸	(Shu, Wu, Dong, Wang, & Liu, 2018)
۹۰۰- ۱۳۰۰	-	PVDF	جوان‌ساز صنعتی	ریسندگی تر-خشک	۲۰۱۸	(X.-L. Zhang et al., 2018)
۱۰-۲۵۰	-	MUF	جوان‌ساز صنعتی	پلیمریزاسیون درجا	۲۰۱۹	(Sun et al., 2019)
φ :۵۰۰ L:۱cm	-	ساختار پلیمری کلسیم آلزینات	جوان‌ساز صنعتی	دستگاه میکروسیال +ژله‌ای شدن یونی	۲۰۱۹	(Shu, Wu, Dong, Li, et al., 2019)
"	-	"	جوان‌ساز صنعتی	"	۲۰۱۹	Shu, Wu, Dong, Norambuena-) (Contreras, et al., 2019)
۳-۱۰	-	MF + رزین	ماده ترموکرومیک قرمز	-	۲۰۱۹	(Du, Chen, & Zhang, 2019)
۷-۲۱	-	MF	PCM(تترادکان)	پلیمریزاسیون درجا	۲۰۱۹	(Li et al., 2018)

ارزیابی اثر کپسول‌ها در خودترمیمی مخلوط آسفالتی

اثر کپسول بر عملکرد خودترمیمی آسفالت باید با روش‌های منطقی ارزیابی شود. روش‌های ارزیابی خود ترمیمی آزمایشگاهی را می‌توان به آزمایش‌های خستگی - ترمیم و آزمایش‌های شکست - ترمیم با توجه به سطح آسیب طبقه‌بندی کرد. آزمایش‌های شکست-ترمیم بر روی بهبود دو سطح شکست متمرکز شده‌اند که در آن نمونه آزمایش با تغییر شکل بزرگ، شکست کامل را تحمل می‌کند و باعث ایجاد مشکلاتی در آزمایش‌های بعدی می‌شود (Sun, Lu, Zhu, Li, & Tian, 2018). آزمایش‌های خستگی - ترمیم به منظور بررسی ترمیم ریزترک‌ها در نمونه‌های آسیب‌دیده در طول دوره بارگذاری خستگی دوره‌ای انجام می‌شود که شبیه‌سازی خوبی از آسفالت در شرایط ترافیک واقعی فراهم می‌کند، اما در اصل و زمان‌بر و نسبتاً پیچیده می‌باشند. شاخص‌های ارزیابی را می‌توان به شاخص‌های عملکردی، شاخص ساختاری و سازه‌ای و

شاخص شبیه‌سازی کامپیوتری طبقه‌بندی کرد. شاخص عملکردی با در نظر گرفتن دوره‌های ترمیم در آزمایش‌های مکانیکی سستی و تجزیه و تحلیل تغییرات شاخص‌ها قبل و بعد از ترمیم به دست می‌آید که رفتار خودترمیمی از نظر عملکرد مواد ارزیابی می‌کند اما نمی‌تواند اصل و روند ترمیم را توضیح دهد. شاخص ساختاری می‌تواند به‌طور مستقیم فرآیند بسته شدن ترک را با کمک FM^۳، CT^۲ و نرم‌افزارهای مربوط به پردازش تصویر نشان دهد. با این حال، نتایج نشان می‌دهد که با اعمال نفوذ مولکولی ذاتی پس از تماس کامل فصل مشترک ترک‌ها با یکدیگر، نمی‌توان ارزیابی مقاومت مکانیکی را مشخص نمود. روش شبیه‌سازی کامپیوتری برای ارزیابی رفتار خودترمیمی در مقیاس مولکولی استفاده می‌شود، اما ارتباط آن با عملکرد ترمیم در مقیاس بزرگ نیاز به تأیید دارد. روش‌های ارزیابی برای بهبود ترمیم ترک در آسفالت در جدول ۴ شده است.

جدول ۴. خلاصه‌ای از روش‌های ارزیابی برای اثر خودترمیمی مخلوط آسفالتی

شاخص	نوع نمونه	حالت شکست - ترمیم	حالت خستگی - ترمیم
شاخص عملکردی	مخلوط آسفالتی	3PB-SCB-BOEF	4PB-IDT
شاخص ساختاری	مخلوط آسفالتی	روش اولتراسونیک-CT	
مدل کامپیوتری	شبیه‌سازی مولکولی، شبیه‌سازی به روش امان محدود		

آزمایش‌های شکست - ترمیم

آزمایش خمش سه‌نقطه‌ای

همان‌طور که در جدول ۵ نشان داده شده است، آزمایش خمش سه‌نقطه‌ای نیز برای تعیین اثر ترمیم ترک مخلوط آسفالتی استفاده شده است (Al-Mansoori, Micaelo, Artamendi, Norambuena-Contreras, & Garcia, 2017; Á. García, 2012; L. Zhang et al., 2019) تا با کوپچ و همکارانش آزمایش خمش سه‌نقطه‌ای را به ترتیب در دمای ۵ - درجه سانتی‌گراد و ۲۰ درجه سانتی‌گراد برای نشان دادن تأثیر فیبر کلسیم آلژینات بر عملکرد خودترمیمی ترک‌هایی با ابعاد ماکرو و میکرو انجام دادند (Tabaković et al., 2016) ثابت شد که فیبر کلسیم آلژینات قادر به ترمیم ترک‌های ریز است، اما تنها زمانی می‌تواند ترمیم باقی‌مانده را بهبود بخشد که ترک‌های بزرگ‌تر رخ دهند. گروه تحقیق Garcia به بررسی عملکرد خودترمیمی مخلوط آسفالتی حاوی کپسول‌های آلژینات کلسیم با استفاده از آزمایش ۳ خمش سه‌نقطه‌ای اصلاح‌شده پرداخت. (Al-Mansoori et al., 2017; Jose

Norambuena-Contreras, Yalcin, Hudson-Griffiths, & Garcia, 2019) همان‌طور که در شکل ۱۶

نشان داده شده است، این آزمایش عمدتاً از سه مرحله زیر تشکیل شده است. (۱) ایجاد ترک مخلوط آسفالتی با یک برش عرضی در نقطه میانی سطح زیرین توسط آزمایش خمش سه‌نقطه‌ای پس از قرار دادن در دمای ۲۰ - درجه سانتی‌گراد به مدت چند ساعت به دو قطعه تقسیم شد. (۲) فعال شدن کپسول‌ها. تیر شکسته با یک غشای پلاستیکی نازک بین سطوح ترک‌خورده به مدت چند ساعت در قالب فولادی در دمای ۲۰ درجه سانتی‌گراد قرار داده شد. سپس یک بار فشاری به‌طور یکنواخت بر روی سطح بالایی آن اعمال شد تا کپسول‌ها شکسته شوند تا جوانساز آزاد شود. (۳) فرآیند ترمیم. پس از برداشتن غشای پلاستیکی، تیر شکسته دوباره به مدت چند ساعت در قالب فولادی قرار داده شد تا ترک‌ها ترمیم شوند.

آلژینات کلسیم به طور قابل توجهی میزان ترمیم تیرهای آسفالت را در دماهای زیر ۴۰ درجه سانتی‌گراد بهبود بخشید، درحالی‌که در دماهای بالای ۴۰ درجه سانتی‌گراد خیلی مفید نبودند؛ بنابراین آزمایش ترمیم ترک برای انجام زیر ۴۰ درجه سانتی‌گراد توصیه می‌شود. نورامبونا و همکاران نیز آزمایش خمش سه‌نقطه‌ای را برای ارزیابی عملکرد خودترمیمی انجام دادند و پیشنهاد کردند که محتوای کپسول بهینه ۰/۵ درصد وزن کل مخلوط آسفالتی با در نظر گرفتن اثر خودترمیمی و ویژگی‌های رئولوژیکی مخلوط آسفالتی است.

در آخر، تیر ترمیم‌یافته را بیرون کرده و مرحله ۱ دوباره تکرار شد. اثر ترمیم با استفاده از حداکثر بار وارده بر تیر اندازه‌گیری شده توسط آزمایش خمش سه‌نقطه‌ای قبل و بعد از فرآیند ترمیم تعیین شد. نتایج آزمایش نشان داد که میزان خود ترمیمی با افزایش زمان ترمیم افزایش می‌یابد اما پس از گذشت زمان ترمیم از ۷۲ ساعت تقریباً مقدار ثابتی را حفظ می‌کند (Al-Mansoori, Norambuena-Contreras, & Garcia, 2018).
خمش سه‌نقطه‌ای را بر روی مخلوط آسفالتی با کپسول‌های آلژینات کلسیم انجام دادند. نتایج نشان داد که کپسول‌های

جدول ۵. جزئیات آزمایش خودترمیمی خمش سه‌نقطه‌ای

منبع	دمای آزمایش	شرایط ترمیم	شاخص خودترمیمی	نتایج
(Tabaković et al., 2016)	۲۰- و ۵- درجه سانتی‌گراد	۱۲-۰ / ۵ ساعت در دمای ۲۰ درجه سانتی‌گراد	$\frac{PL_h}{PL_o}$	شاخص خودترمیمی نمونه ماستیکی با افزودن ۱/۳ درصد فیبرهای کلسیم آلژینات بر حسب وزن کل مخلوط به‌اندازه ۳۶٪ افزایش می‌یابد.
(Al-Mansoori et al., 2017)	۲۰- درجه سانتی‌گراد	۲۰۰-۲ ساعت در دمای ۲۰ درجه سانتی‌گراد	$\frac{PL_h}{PL_o}$	شاخص خودترمیمی نمونه‌ها با افزودن ۵/۵ درصد کپسول‌های کلسیم آلژینات بر حسب وزن قیر به‌اندازه ۴۱/۹۲٪ افزایش می‌یابد.
(Al-Mansoori, Norambuena-Contreras, Micaelo, & Garcia, 2018)	۲۰- درجه سانتی‌گراد	۲۱۶-۶ ساعت در دمای ۲۰-۵ درجه سانتی‌گراد	$\frac{PL_h}{PL_o}$	سطح ترمیم در مدت زمان ۹۶ ساعت به بیشترین مقدار خود می‌رسد.
(Jose Norambuena-Contreras, Liu, et al., 2019)	۲۰- درجه سانتی‌گراد	۲۱۶-۶ ساعت در دمای ۲۰-۵ درجه سانتی‌گراد	$\frac{PL_h}{PL_o}$	درصد بهینه کپسول‌های کلسیم آلژینات ۰/۵٪ وزن کل مخلوط آسفالتی است.
(Jose Norambuena-Contreras, Yalcin, et al., 2019)	۲۰- درجه سانتی‌گراد	۲۱۶-۶ ساعت در دمای ۲۰-۵ درجه سانتی‌گراد	$\frac{PL_h}{PL_o}$	شاخص خودترمیمی نمونه‌ها با افزودن ۰/۵ درصد کپسول‌های کلسیم آلژینات بر حسب وزن قیر به‌اندازه ۱۱/۴۸٪ افزایش می‌یابد.
(L. Zhang et al., 2019)	۱۰- درجه سانتی‌گراد	۴۸ ساعت در دمای ۲۰ درجه سانتی‌گراد	$\frac{PL_h}{PL_o}$ $\frac{FE_h}{FE_o}$	شاخص ترمیم مبتنی بر انرژی شکست خیلی بالاتر بود.

نکته: PL_h, PL_o بار پیک مخلوط آسفالت اولیه و مخلوط آسفالت ترمیم‌یافته را نشان می‌دهد؛ FE_h, FE_o انرژی شکست مخلوط آسفالت اولیه و مخلوط آسفالت ترمیم‌یافته را نشان می‌دهد.

آزمون تیر روی پایه الاستیک^{۲۵}

کردند که در آن تیر بر روی پایه لاستیکی چسبیده بود و امکان بستن خودکار سطح شکسته را فراهم می‌کرد، همان‌طور که در شکل ۱۷ نشان داده شده است.

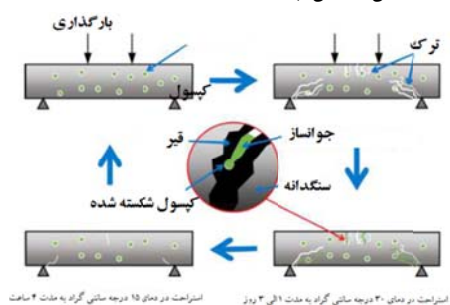
در آزمایش خمش سه‌نقطه‌ای مخلوط آسفالتی ممکن است دچار تغییر شکل‌های بزرگی شود که باعث مشکلاتی در فرآیند ترمیم می‌شود. برای غلبه بر این مشکل، Qiu و همکاران در سال ۲۰۱۲ یک روش آزمایش جدید به نام BOEF طراحی

آزمایش‌های خستگی-ترمیمی

آزمایش خمش چهار نقطه‌ای

پدیده خودترمیمی در سطوح کرنش پایین، زمانی که ترک‌ها در مقیاس میکرو هستند، بیشتر مشهود است (Carpenter & Shen, 2006). در آزمایش خمش چهار نقطه‌ای تغییر شکل و درجه آسیب نمونه آزمایش را می‌توان به‌طور مؤثری کنترل کرد که امکان ایجاد تغییر شکل‌های کوچک و میکروتُرک‌ها در نمونه آزمایش را فراهم می‌کند. بنابراین، آزمایش ۴ خمش سه نقطه‌ای به‌عنوان یک روش مؤثر برای بررسی عملکرد ترمیم شناخته می‌شود (Khiavi & Rasouli, 2018; Tabaković, 2017; Schuyffel, Karač, & Schlangen, 2017). در این آزمایش تیر مخلوط آسفالتی به‌صورت متقارن در دو نقطه بارگذاری شده است. شاخص ترمیم معمولاً با استفاده از مدول سفتی S_0 یا عمر خستگی نمونه قبل و بعد از فرآیند ترمیم تعیین می‌شود. Tabakovic و همکاران از آزمایش خمش چهار نقطه‌ای برای بررسی تأثیر فیبر کلسیم آلزینات بر اثر ترمیم مخلوط آسفالتی استفاده کردند و تأیید کردند که فیبر کلسیم آلزینات تأثیر مثبتی بر بهبود عملکرد ترمیم دارد (Tabaković et al., 2017). Sun و همکاران خواص ترمیم مخلوط آسفالت با میکروکپسول‌های با پوسته ملایم فرمالدهید را بررسی کردند. روند آزمایش در شکل ۲۱ نشان داده شده است. فرآیند بارگذاری

زمانی پایان می‌یابد که مدول سفتی به ۵۰٪ مدول سفتی اولیه کاهش یابد و سپس فرآیند ترمیم در ۳۰ درجه سانتی‌گراد به مدت چند ساعت انجام شود. در نهایت آزمایش خمش چهار نقطه‌ای دوباره در دمای ۱۵ درجه سانتی‌گراد بر روی نمونه ترمیم‌یافته انجام شد. مدول سفتی و عمر خستگی قبل و بعد از ترمیم برای مشخص کردن اثر میکروکپسول بر عملکرد خودترمیمی نمونه مورد استفاده قرار گرفت. نتایج آزمایش نشان داد که میکروکپسول باعث کاهش مدول سفتی اولیه می‌شود اما به‌طور قابل‌توجهی عمر خستگی و ظرفیت خودترمیمی را افزایش می‌دهد (Sun, Li, et al., 2018). هی و همکاران کپسول‌های کلسیم آلزینات را به مخلوط آسفالتی اصلاح‌شده با لاستیک اضافه کردند و اثر مثبت آن را بر خاصیت خودترمیمی با آزمایش خمش چهار نقطه‌ای نشان دادند.



شکل ۲۲. روش آزمایش ترمیم توسط خمش چهار نقطه‌ای

جدول ۶. جزئیات آزمایش ترمیم خستگی

منبع	شرایط آزمایش	شرایط ترمیم	شاخص خودترمیمی	نتایج
(Tabaković et al., 2017)	$300 \mu\text{m}$ کنترل تغییر شکل، بارگذاری سینوسی، ۳۰ هرتز، دمای ۲۰ درجه سانتی‌گراد	$D=0/5$ ، دمای ۲۰ درجه سانتی‌گراد، ۲۰ ساعت	S	عملکرد خودترمیمی نمونه با افزایش تعداد بارگذاری کاهش می‌یابد.
(Sun, Li, et al., 2018)	$500 \mu\text{E}$ کرنش کنترل، بارگذاری نیمه سینوسی، ۱۰ هرتز، دمای ۱۵ درجه سانتی‌گراد	$D=0/5$ ، دمای ۳۰ درجه سانتی‌گراد، ۲۰ و ۴۰ ساعت	$\frac{S_h}{S_0}$ $\frac{N_h}{N_0}$	شاخص ترمیم به ۳۰/۳۵ درصد با افزودن ۵٪ میکروکپسول افزایش یافته است.
(He et al., 2020)	$500 \mu\text{E}$ سطح کنترل، بارگذاری نیمه سینوسی، ۱۰ هرتز، دمای ۱۵ درجه سانتی‌گراد	$D=0/5$ ، دمای ۲۰ درجه سانتی‌گراد، ۲۰ ساعت	$\frac{S_h}{S_0}$ $\frac{N_h}{N_0}$	شاخص ترمیم به ۳۲/۰۸ درصد با افزودن ۵٪ میکروکپسول افزایش یافته است.

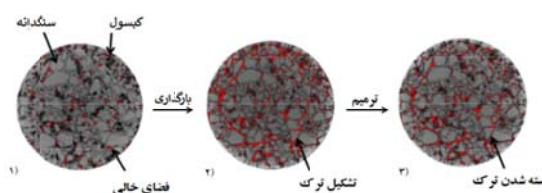
نکته ۱: S مدول سفتی را نشان می‌دهد.

نکته ۲: S_h و S_0 نشان‌دهنده مدول سفتی اولیه نمونه اصلی و نمونه ترمیم‌یافته می‌باشد.

نکته ۳: N_h و N_0 نشان‌دهنده چرخه بارگذاری نمونه اصلی و نمونه ترمیم‌یافته در زمانی است که میزان خرابی D به دست می‌آید.

اسکن توموگرافی کامپیوتری

روش CT-scan توسط Garcia و همکارانش برای ارزیابی کمی عملکرد ترمیم از طریق محاسبه تغییر حجم فضای خالی در نمونه مورد استفاده قرار گرفت (Garcia, Jelfs, & Austin, 2015). آزمایش فشاری سیکلی بر روی نمونه مخلوط آسفالت حاوی کپسول‌های ماسه متخلخل در دمای ۲۰ درجه سانتی‌گراد انجام شد. وقتی تعداد مشخصی از چرخه‌های بارگذاری به دست آمد، نمونه به مدت ۴ ساعت در دمای ۵۵ درجه سانتی‌گراد ترمیم یافت و سپس دوباره آزمایش شد. همان‌طور که در شکل ۲۳ نشان داده شده است، حجم فضای خالی نمونه آسیب‌دیده و نمونه ترمیم‌یافته با استفاده از CT-scan همراه با تکنیک پردازش و تحلیل تصویر دیجیتال به دست آمده است.



شکل ۲۳- مقاطع سی‌تی‌اسکن نمونه مخلوط آسفالت در طول آزمایش: ۱- نمونه اولیه؛ ۲- نمونه آسیب‌دیده؛ ۳- نمونه ترمیم‌یافته

افزایش حجم فضای خالی در نمونه آسیب‌دیده در مقایسه با نمونه اولیه در نتیجه آغاز و گسترش ترک‌های ناشی از بارگذاری تشخیص داده شد. درعین حال، کاهش حجم حفره‌های هوا در نمونه ترمیم‌یافته در مقایسه با نمونه آسیب‌دیده به ترمیم چندین ترک در طول دوره استراحت نسبت داده شد. از این رو، اثر ترمیم ترک به صورت نسبت حجم کاهش‌یافته حفره‌های هوا در طول فرآیند ترمیم به حجم افزایش‌یافته حفره‌های هوا در طول فرآیند بارگذاری تعریف شد، نتایج آزمایش نشان داد که تقریباً ۴۵٪ از ترک‌های ایجاد شده در طول دوره بارگذاری به طور موفقیت‌آمیزی در طول دوره ترمیم شدند (Garcia et al., 2015). Micaelo و همکاران دریافتند که حجم فضای خالی در نزدیکی کپسول‌های کلسیم آلزینات در مخلوط آسفالت آسیب‌دیده تا حد زیادی پس از دوره استراحت توسط تصاویر CT-scan کاهش می‌یابد که نشان می‌دهد که کپسول کلسیم آلزینات به طور مؤثر کارایی ترمیم مخلوط آسفالت را بهبود می‌بخشد. نتایج آزمایش نشان داد که ۵۰٪ حجم فضای خالی در طول دوره ترمیم ناپدید می‌شود. با این حال، باید توجه داشت

که بار خستگی به‌ناچار باعث تجمع تغییر شکل کوچک در طول دوره بارگذاری می‌شود که به کاهش فضای خالی و تأثیر بر نتیجه محاسبه حجم ترک ناشی از بارگذاری کمک می‌کند (Micaelo, Al-Mansoori, & Garcia, 2016)

تأثیر کپسول در سایر عملکردهای مخلوط آسفالتی در جاده

یک بررسی مروری برای نشان دادن اثر کپسول‌ها بر عملکرد جاده مخلوط آسفالت، تمامی نتایج آزمایش‌های انجام‌شده نشان دادند که کپسول‌ها به دلیل استحکام کم‌تر، چسبندگی ضعیف با آسفالت و رها شدن غیرمنتظره جوانساز در حین اختلاط و تراکم، اثرات منفی بر استحکام مکانیکی نمونه مخلوط آسفالت دارند (Á. García, Schlangen, & Van de Ven, 2011).

اما زمانی که فیبر کلسیم آلزینات استفاده می‌شود یک استثنا وجود دارد. می‌توان آن را به درهم‌تنیدگی فیبرها نسبت داد که به بهبود استحکام مکانیکی کمک می‌کنند. برای دمای بالا، دمای پایین و عملکرد مقاومت در برابر آب، بیشتر نتایج تحقیق نشان داد که کپسول‌ها اثرات نامطلوب اندکی دارند و یا تفاوتی با نمونه‌های مرجع ندارند. گزارش شد که فیبرهای کلسیم آلزینات عملکرد دمای بالا را به دلیل درگیر شدن با قیر بهبود می‌بخشند (Shu, Bao, et al., 2019). این کپسول‌ها برای افزایش عمر خستگی نمونه مخلوط آسفالتی تحت اثر جوان ساز رها شده در طول دوره بارگذاری مفید بودند. علاوه بر این، مقدار کپسول ارتباط نزدیکی با نوع مخلوط آسفالتی دارد. به‌طور کلی، اضافه کردن کپسول تأثیر منفی کمی بر برخی جنبه‌های عملکرد جاده دارد، اما آن‌ها هنوز هم نیاز اساسی مخلوط آسفالتی را برآورده می‌کنند و مقدار و نوع کپسول‌ها باید با دقت بیشتری طراحی شوند تا اثر بهبود بر خواص خودترمیمی آسفالت را بدون به خطر انداختن عملکرد مخلوط آسفالت برآورد سازد.

۵- نتیجه‌گیری

با بررسی مطالعات انجام‌شده در حوزه‌ی خودترمیمی مخلوط آسفالتی با کپسول‌های حاوی جوانساز نتیجه‌گیری می‌شود که استفاده از این کپسول‌ها به صورت قابل‌توجهی شاخص خودترمیمی مخلوط آسفالتی را ارتقا می‌دهد. در نتیجه با ارتقای عملکرد خودترمیمی می‌توان هزینه‌های مربوط به تعمیر و نگهداری روسازی آسفالتی را کاهش داد. از طرف دیگر استفاده از مواد آلی در فرایند ساخت کپسول باعث عدم ایجاد آلودگی

and healing temperature on the self-healing potential of asphalt mixtures. *Materials and Structures*, 51(2), 1-12.

-Al-Mansoori, T., Norambuena-Contreras, J., Micaelo, R., & Garcia, A., (2018). Self-healing of asphalt mastic by the action of polymeric capsules containing rejuvenators. *Construction and Building Materials*, 161, 330-339.

-Arshady, R., & George, M. H., (1993). Suspension, dispersion, and interfacial polycondensation: a methodological survey. *Polymer Engineering & Science*, 33(14), 865-876.

-Bazin, P., & Saunier, J., (1967). *Deformability, fatigue and healing properties of asphalt mixes*. Paper presented at the Intl Conf Struct Design Asphalt Pvmnts.

-Bhasin, A., Little, D. N., Bommavaram, R., & Vasconcelos, K., (2008). A framework to quantify the effect of healing in bituminous materials using material properties. *Road Materials and Pavement Design*, 9(sup1), 219-242.

-Bhasin, A., and Motamed, A., (2011). Analytical models to characterise crack growth in asphaltic materials and healing in asphalt binders. *International Journal of Pavement Engineering*, 12(4), 371-383.

-Bhasin, A., Narayan, A., & Little, D. N., (2009). Laboratory investigation of a novel method to accelerate healing in asphalt mixtures using thermal treatment. Retrieved from.

-Branco, C., & Franco, V. T., (2008). A unified method for the analysis of nonlinear viscoelasticity and fatigue cracking of asphalt mixtures using the dynamic mechanical analyzer (Vol. 70).

-Burningham, S., & Stankevich, N., (2005). Why road maintenance is important and how to get it done.

-Carpenter, S. H., & Shen, S., (2006). Dissipated energy approach to study hot-mix asphalt healing in fatigue. *Transportation Research Record*, 1970(1), 178-185.

-Caruso, M. M., Davis, D. A., Shen, Q., Odom, S. A., Sottos, N. R., White, S. R., & Moore, J. S., (2009). Mechanically-induced chemical changes in polymeric materials. *Chemical Reviews*, 109(11), 5755-5798.

-Chiu, C. T., & Lee, M. G., (2006). Effectiveness of seal rejuvenators for bituminous pavement surfaces. *Journal of Testing and Evaluation*, 34(5), 390-394.

محیط زیستی و کاهش هزینه‌های ساخت کپسول می‌شود. همچنین با مقایسه روش‌های ساخت کپسول، روش بسپارش درجا به دلیل سهولت در تهیه کپسول و عدم نیاز به تجهیزات خاص گزینه مناسبی برای ساخت کپسول‌های حاوی جوانساز است.

۶- پی‌نوشت‌ها

- 1-Microcracks
- 2-Fog Seal
- 3-Slurry Seal
- 4-Micro Surfacing
- 5-Cohesive Crack
- 6-Adhesive
- 7-Semi-Circular Bending Test
- 8-Surface Energy Theory
- 9-Perpetual Pavement
- 10-Fatigue Endurance Limit
- 11-Dissipated Energy
- 12-Ratio of Dissipated Energy Per Cycle
- 13-Creep Compliance
- 14-Dynamic Shear Remoter
- 15-Lifshitz Vander Waals
- 16-Multi Wall Nano Carbon Tubes
- 17-In-Situ Polymerization
- 18-Immiscible
- 19-Emulsification Polymerization
- 20-Layer-by-Layer Assembly
- 21-Coacervation
- 22-Internal Phase Separation
- 23-Fluorescence Microscopy
- 24-Computed Tomography
- 25-Beam on Elastic Foundation Test
- 26-Rolling Device

۷- مراجع

- Aguirre, M. A., Hassan, M. M., Shirzad, S., Daly, W. H., & Mohammad, L. N., (2016). Micro-encapsulation of asphalt rejuvenators using melamine-formaldehyde. *Construction and Building Materials*, 114, 29-39.
- Agzenai, Y., Pozuelo, J., Sanz, J., Perez, I and Baselga, J., (2015). Advanced self-healing asphalt composites in the pavement performance field: mechanisms at the nano level and new repairing methodologies. *Recent patents on nanotechnology*, 9(1), 43-50.
- Al-Mansoori, T., Micaelo, R., Artamendi, I., Norambuena-Contreras, J., & Garcia, A., (2017). Microcapsules for self-healing of asphalt mixture without compromising mechanical performance. *Construction and Building Materials*, 155, 1091-1100.
- Al-Mansoori, T., Norambuena-Contreras, J., & Garcia, A., (2018). Effect of capsule addition

- Construction and Building Materials*, 254, 119225.
- Hou, Y., Sun, W., Das, P., Song, X., Wang, L., Ge, Z., & Huang, Y., (2016). Coupled Navier–Stokes phase-field model to evaluate the microscopic phase separation in asphalt binder under thermal loading. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 28(10), 04016100.
- Hou, Y., Wang, L., Pauli, T., & Sun, W., (2015). Investigation of the asphalt self-healing mechanism using a phase-field model. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 27(3), 04014118.
- Jyothi, N. V. N., Prasanna, P. M., Sakarkar, S. N., Prabha, K. S., Ramaiah, P. S., & Srawan, G., (2010). Microencapsulation techniques, factors influencing encapsulation efficiency. *Journal of Microencapsulation*, 27(3), 187-197.
- Karlsson, R., & Isacson, U., (2003). Investigations on bitumen rejuvenator diffusion and structural stability (with discussion). *Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists*, 72.
- Karlsson, R., & Isacson, U., (2006). Material related aspects of asphalt recycling state of the art. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 18(1), 81-92.
- Khavari, A., (2010). Preparation and Characterization of Novel Microcapsules.
- Khiavi, A. K., & Rasouli, R., (2018). Laboratory evaluation of loading frequency effects on HMA self-healing. *Construction and Building Materials*, 162, 1-8.
- Kim, B., & Roque, R., (2006). *Evaluation of healing property of asphalt mixtures. Transportation Research Record*, 1970(1), 84-91.
- Kim, Y.-R., Little, D., & Lytton, R., (2003). Fatigue and healing characterization of asphalt mixtures. *Journal of materials in Civil Engineering*, 15(1), 75-83.
- Kim, Y. R., Little, D. N., Lytton, R., D'Angelo, J., Davis, R., Rowe, G., Roque, R., (2002). Use of dynamic mechanical analysis (DMA) to evaluate the fatigue and healing potential of asphalt binders in sand asphalt mixtures. Paper presented at the Asphalt Paving Technology: Association of Asphalt Paving Technologists-*Proceedings of the Technical Sessions*.
- Kringos, N., Schmets, A., Pauli, T., & Scarpas, T., (2009). A finite element base chemo-mechanical model to simulate healing in bitumen. *Paper presented at the Proceedings of the International Workshop on Chemo-*
- Das, P. K., Kringos, N., Wallqvist, V., & Birgisson, B., (2013). Micromechanical investigation of phase separation in bitumen by combining atomic force microscopy with differential scanning calorimetry results. *Road Materials and Pavement Design*, 14(sup1), 25-37.
- Du, P., Chen, Z., & Zhang, H., (2019). Rheological and aging behaviors of base and SBS modified asphalt with thermochromic microcapsule. *Construction and Building Materials*, 200, 1-9.
- Esser-Kahn, A. P., Odom, S. A., Sottos, N. R., White, S. R., & Moore, J. S., (2011). Triggered release from polymer capsules. *Macromolecules*, 44(14), 5539-5553.
- Gao, X., & Liu, Z., (2019). Self-healing mechanism of bio-oil recycled asphalt. *China J. Highw. Transp.*, 32, 235-242.
- García, Á. (2012). Self-healing of open cracks in asphalt mastic. *Fuel*, 93, 264-272.
- García, A., Bueno, M., Norambuena-Contreras, J., & Partl, M. N., (2013). Induction healing of dense asphalt concrete. *Construction and Building Materials*, 49, 1-7.
- García, A., Jelfs, J., & Austin, C. J., (2015). Internal asphalt mixture rejuvenation using capsules. *Construction and Building Materials*, 101, 309-316.
- García, Á., Schlangen, E., & Van de Ven, M., (2011). Properties of capsules containing rejuvenators for their use in asphalt concrete. *Fuel*, 90(2), 583-591.
- García, Á., Schlangen, E., van de Ven, M., & Sierra-Beltrán, G., (2010). Preparation of capsules containing rejuvenators for their use in asphalt concrete. *Journal of Hazardous Materials*. 603-611.
- Ghosh, S. K., (2009). Self-healing materials: fundamentals, design strategies, and applications, *Wiley Online Library*.
- Gonzalez-Torre, I., & Norambuena-Contreras, J., (2020). Recent advances on self-healing of bituminous materials by the action of encapsulated rejuvenators. *Construction and Building Materials*, 258, 119568.
- Grossegger, D., & Garcia, A., (2019). Influence of the thermal expansion of bitumen on asphalt self-healing. *Applied Thermal Engineering*, 156, 23-33.
- He, L., Li, G., Lv, S., Gao, J., Kowalski, K. J., Valentin, J., & Alexiadis, A., (2020). Self-healing behavior of asphalt system based on molecular dynamics simulation.

- Norambuena-Contreras, J., & Garcia, A., (2016). Self-healing of asphalt mixture by microwave and induction heating. *Materials & Design*, 106, 404-414.
- Norambuena-Contreras, J., Liu, Q., Zhang, L., Wu, S., Yalcin, E., & Garcia, A., (2019). Influence of encapsulated sunflower oil on the mechanical and self-healing properties of dense-graded asphalt mixtures. *Materials and Structures*, 52(4), 1-13.
- Norambuena-Contreras, J. Yalcin, E., Hudson-Griffiths, R., & Garcia, A., (2019). Mechanical and self-healing properties of stone mastic asphalt containing encapsulated rejuvenators. *Journal of materials in Civil Engineering*, 31(5), 04019052.
- Pauli, A. T., (2014). Chemomechanics of damage accumulation and damage-recovery healing in bituminous asphalt binders.
- Phillips, M., (1998). Multi-step models for fatigue and healing, and binder properties involved in healing. *Paper presented at the Eurobitume workshop on performance related properties for bituminous binders, Luxembourg*.
- Qiu, J. (2008). Self healing of asphalt mixes: literature review.
- Qiu, J., (2012). Self healing of asphalt mixtures: towards a better understanding of the mechanism.
- Qiu, J., Molenaar, A., Van de Ven, M., Wu, S., & Yu, J., (2012). Investigation of self healing behaviour of asphalt mixes using beam on elastic foundation setup. *Materials and Structures*, 45(5), 777-791.
- Roque, R., Simms, R., Chen, Y., Koh, C., & Lopp, G. (2012). *Development of a test method that will allow evaluation and quantification of the effects of healing on asphalt mixture*. Retrieved from.
- Saoula, S., Soudani, K., Haddadi, S., Munoz, M. E., & Santamaria, A., (2013). Analysis of the rheological behavior of aging bitumen and predicting the risk of permanent deformation of asphalt.
- Sarier, N., & Onder, E., (2007). The manufacture of microencapsulated phase change materials suitable for the design of thermally enhanced fabrics. *Thermochimica acta*, 452(2), 149-160.
- Shen, J., Amirkhani, S & Aune Miller, J., (2007). Effects of rejuvenating agents on superpave mixtures containing reclaimed asphalt pavement. *Journal of materials in Civil Engineering*, 19(5), 376-384.
- mechanics of Bituminous materials*, Delft, The Netherlands.
- Kringos, N., Schmets, A., Scarpas, A., & Pauli, T., (2011). Towards an understanding of the self-healing capacity of asphaltic mixtures. *Heron*, 56(1/2), 45-74.
- Lee, H.-J., & Kim, Y. R., (1998). Viscoelastic constitutive model for asphalt concrete under cyclic loading. *Journal of Engineering Mechanics*, 124(1), 32-40.
- Li, F., Zhou, S., Chen, S., Yang, Z., Yang, J., Zhu, X., Cheng, Z., (2018). Preparation of low-temperature phase change materials microcapsules and its application to asphalt pavement. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 30(11), 04018303.
- Little, D., Lytton, R., Williams, D., & Chen, C., (2001). Microdamage healing in asphalt and asphalt concrete, Vol. 1, microdamage and microdamage healing, *Project Summary Report*. Retrieved from.
- Little, D. N., & Bhasin, A., (2007). Exploring mechanism of H ealing in asphalt mixtures and quantifying its impact. In *Self healing materials* Springer, 205-218.
- Little, D. N., Lytton, R. L., Williams, D., & Kim, Y. R., (1999). An analysis of the mechanism of microdamage healing based on the application of micromechanics first principles of fracture and healing. *Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists*, 68.
- Liu, Q., Garcia, Á., Schlangen, E., & van de Ven, M., (2011). Induction healing of asphalt mastic and porous asphalt concrete. *Construction and Building Materials*, 25(9), 3746-3752.
- Loeber, L., Muller, G., Morel, J., & Sutton, O., (1998). Bitumen in colloid science: a chemical, structural and rheological approach. *Fuel*, 77(13), 1443-1450.
- Lv, Q., Huang, W., Zhu, X., & Xiao, F., (2017). On the investigation of self-healing behavior of bitumen and its influencing factors. *Materials and Design*, 117, 7-17.
- Micaelo, R., Al-Mansoori, T., & Garcia, A., (2016). Study of the mechanical properties and self-healing ability of asphalt mixture containing calcium-alginate capsules. *Construction and Building Materials*, 123, 734-744.
- Nahar, S., (2016). Phase-separation characteristics of bitumen and their relation to damage-healing.

- compact microcapsules containing rejuvenator applied in asphalt. *Chemical Engineering Journal*, 198, 289-300 .
- Su, J. F., Schlangen, E., & Qiu, J., (2013). Design and construction of microcapsules containing rejuvenator for asphalt. *Powder Technology*, 235, 563-571.
- Su, J. F., Schlangen, E., & Wang, Y. Y., (2015). Investigation the self-healing mechanism of aged bitumen using microcapsules containing rejuvenator. *Construction and Building Materials*, 85, 49-56.
- Su, J. F., Wang, Y. Y., Han, N.-X., Yang, P., & Han, S., (2016). Experimental investigation and mechanism analysis of novel multi-self-healing behaviors of bitumen using microcapsules containing rejuvenator. *Construction and Building Materials*, 106, 317-329.
- Su, J. F., Yang, P., Wang, Y.-Y., Han, S., Han, N.-X., & Li, W., (2016). Investigation of the self-healing behaviors of microcapsules/bitumen composites by a repetitive direct tension test. *Materials*, 9, (7), 600-601.
- Su, J., Wang, Y., Yang, P., Han, S., Han, N., & Li, W., (2016). Evaluating and modeling the internal diffusion behaviors of microencapsulated rejuvenator in aged bitumen by FTIR-ATR tests. *Materials*, 9(11), 932-933.
- Sun, D., Li, B., Tian, Y., Lu, T., Zhu, X., Sun, G., & Gilabert, F. A., (2019). Aided regeneration system of aged asphalt binder based on microcapsule technology. *Construction and Building Materials*, 201, 571-579.
- Sun, D., Li, B., Ye, F., Zhu, X., Lu, T., & Tian, Y., (2018). Fatigue behavior of microcapsule-induced self-healing asphalt concrete. *Journal of Cleaner Production*, 188, 466-476.
- Sun, D., Lu, T., Zhu, X., Li, B., & Tian, Y., (2018). Optimization of synthesis technology to improve the design of asphalt self-healing microcapsules. *Construction and Building Materials*, 175, 88-103.
- Sun, D., Sun, G., Zhu, X., Pang, Q., Yu, F., & Lin, T., (2017). Identification of wetting and molecular diffusion stages during self-healing process of asphalt binder via fluorescence microscope. *Construction and Building Materials*, 132, 230-239.
- Sun, D., Sun, G., Zhu, X., Ye, F., & Xu, J., (2018). Intrinsic temperature sensitive self-healing character of asphalt binders based -Shenoy, D. B., Antipov, A. A., Sukhorukov, G. B., & Möhwald, H., (2003). Layer-by-layer engineering of biocompatible, decomposable core-shell structures. *Biomacromolecules*, 4(2), 265-272.
- Shu, B., Bao, S., Wu, S., Dong, L., Li, C., Yang, X., Wang, Q., (2019). Synthesis and effect of encapsulating rejuvenator fiber on the performance of asphalt mixture. *Materials*, 12(8), 1266-1267.
- Shu, B., Wu, S., Dong, L., Li, C., Kong, D., Yang, X., Wang, Q., (2019). Synthesis and properties of microwave and crack responsive fibers encapsulating rejuvenator for bitumen self-healing. *Materials Research Express*, 6(8), 085306-085307.
- Shu, B., Wu, S., Dong, L., Norambuena-Contreras, J., Yang, X., Li, C., Wang, Q., (2019). Microfluidic synthesis of polymeric fibers containing rejuvenating agent for asphalt self-healing. *Construction and Building Materials*, 219, 176-183.
- Shu, B., Wu, S., Dong, L., Wang, Q., & Liu, Q., (2018). Microfluidic synthesis of ca-alginate microcapsules for self-healing of bituminous binder. *Materials*, 11(4), 630-631.
- Song, I., Little, D. N., Masad, E. A., & Lytton, R., (2005). Comprehensive evaluation of damage in asphalt mastics using X-ray CT, continuum mechanics, and micromechanics (with discussion). *Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists*, 74-75.
- Stangl, K., Jäger, A., & Lackner, R., (2006). Microstructure-based identification of bitumen performance. *Road Materials and Pavement Design*, 7(sup1), 111-142.
- Su, J. F., Qiu, J., & Schlangen, E., (2013). Stability investigation of self-healing microcapsules containing rejuvenator for bitumen. *Polymer degradation and stability*, 98(6), 1205-1215.
- Su, J. F., Qiu, J., Schlangen, E., & Wang, Y. Y., (2015a). Experimental investigation of self-healing behavior of bitumen/microcapsule composites by a modified beam on elastic foundation method. *Materials and Structures*, 12(47), 4027-4028.
- Su, J. F., Qiu, J., Schlangen, E., & Wang, Y. Y., (2015b). Investigation the possibility of a new approach of using microcapsules containing waste cooking oil: In situ rejuvenation for aged bitumen. *Construction and Building Materials*, 74-73-98.
- Su, J.F., & Schlangen, E., (2012). Synthesis and physicochemical properties of high

- Whelehan, M., & Marison, I. W., (2011). Microencapsulation using vibrating technology. *Journal of Microencapsulation*, 28(8), 669-688.
- Wool, R., & O'connor, K., (1981). A theory crack healing in polymers. *Journal of applied physics*, 52(10), 5953-5963.
- Wool, R. P. (2008). Self-healing materials: a review. *Soft Matter*, 4(3), 400-418.
- Wu, S., Pang, L., Mo, L., Qiu, J., Zhu, G., & Xiao, Y., (2008). UV and thermal aging of pure bitumen-comparison between laboratory simulation and natural exposure aging. *Road Materials and Pavement Design*, 9(sup1), 103-113.
- Xu, G., & Wang, H., (2017). Molecular dynamics study of oxidative aging effect on asphalt binder properties. *Fuel*, 188, 1-10.
- Xu, S., Liu, X., Tabaković, A., & Schlangen, E., (2019). Investigation of the potential use of calcium alginate capsules for self-healing in porous asphalt concrete. *Materials*, 12(1), 168.
- Zhang, L., Liu, Q., Li, H., Norambuena-Contreras, J., Wu, S., Bao, S., & Shu, B., (2019). Synthesis and characterization of multi-cavity Ca-alginate capsules used for self-healing in asphalt mixtures. *Construction and Building Materials*, 211, 298-307.
- Zhang, X.-L., Su, J.-F., Guo, Y.-D., Wang, X. Y., Fang, Y., Ding, Z., & Han, N. X., (2018). Novel vascular self-nourishing and self-healing hollow fibers containing oily rejuvenator for bitumen. *Construction and Building Materials*, 183, 150-162.
- on molecular dynamics simulations. *Fuel*, 211, 609-620.
- Sun, D., Yu, F., Li, L., Lin, T., & Zhu, X., (2017). Effect of chemical composition and structure of asphalt binders on self-healing. *Construction and Building Materials*, 133, 495-501.
- Tabaković, A., Post, W., Cantero, D., Copuroglu, O., Garcia, S. J., & Schlangen, E., (2016). The reinforcement and healing of asphalt mastic mixtures by rejuvenator encapsulation in alginate compartmented fibres. *Smart Materials and Structures*, 25(8), 084003.
- Tabaković, A., Schuyffel, L., Karač, A., & Schlangen, E., (2017). An evaluation of the efficiency of compartmented alginate fibres encapsulating a rejuvenator as an asphalt pavement healing system. *Applied Sciences*, 7(7), 647.
- Tschegg, E., Jamek, M., & Lugmayr, R., (2011). Fatigue crack growth in asphalt and asphalt-interfaces. *Engineering Fracture Mechanics*, 78(6), 1044-1054.
- Wang, C., Zhang, H., Castorena, C., Zhang, J., & Kim, Y. R., (2016). Identifying fatigue failure in asphalt binder time sweep tests. *Construction and Building Materials*, 121, 535-546.
- Wang, Y. Y., Su, J.-F., Schlangen, E., Han, N. X., Han, S., & Li, W., (2016). Fabrication and characterization of self-healing microcapsules containing bituminous rejuvenator by a nano-inorganic/organic hybrid method. *Construction and Building Materials*, 121, 471-482.

A Review in Improving the Self-Healing Performance of Asphalt Mixture by Using Capsules Containing Rejuvenator

Mahmoud Ameri, Professor, School of Civil Engineering, Iran University of Science and Technology (IUST), Tehran, Iran.

Mohammad Amin Hosseinzad Derakhshan, Ph.D., Student, School of Civil Engineering, Iran University of Science and Technology (IUST), Tehran, Iran.

E-mail: amin.derakhshan96@gmail.com

Received: June 2024- Accepted: September 2024

ABSTRACT

Nowadays, road transportation plays a major role in the transportation of people and goods; therefore, researchers are trying to reduce environmental pollution and road maintenance costs, and use of natural resources by providing solutions. One of the prominent topics in this field is the self-healing of asphalt, which can be an ideal solution to reduce the mentioned problems. Various methods, such as induction heating, microwave heating, and the use of nanomaterial and polymers, have been suggested by pavement experts to improve the self-healing performance of asphalt pavement. Each of these methods has problems, such as high cost and environmental pollution. This study aims to investigate the self-healing mechanism and improve the self-healing performance of asphalt mixture using capsules containing rejuvenator and to study the methods of evaluating the performance of these capsules in the asphalt mixture. These capsules are a suitable option for improving the self-healing performance of asphalt pavement due to the lack of environmental pollution, disturbance in the traffic flow, and low cost.

Keywords: Self-Healing; Capsules Containing Rejuvenator; Asphalt Mixture