

مکانیسم خودترمیمی در قیر و روسازی‌های آسفالتی

مقاله پژوهشی

مهدی زال‌نژاد، استادیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، بابل، ایران
ابراهیم حسامی*، استادیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، بابل، ایران

*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: Hesami@KTH.se

دریافت: ۹۹/۰۵/۱۸ - پذیرش: ۹۹/۱۱/۰۴

صفحه ۷۴-۵۳

چکیده

جاده‌ها از سرمایه‌های زیربنایی و راهبردی هر کشور محسوب می‌شود. سرمایه‌هایی که سالانه بخش زیادی از بودجه را برای ترمیم و نگهداری به خود اختصاص می‌دهند. ایجاد هرگونه خرابی در روسازی آسفالتی، سبب ایجاد اختلال در روند عملکردی وسایل نقلیه شده که در پی آن، کاهش ایمنی رانندگی و نیز کاهش سطح سواری دهی را به دنبال خواهد داشت. خرابی‌ها در روسازی آسفالتی از عوامل مختلفی نشأت می‌گیرند. به‌طور کلی در اثر عبور ترافیک، خرابی با ایجاد ریز ترک‌هایی در سیستم روسازی پدیدار شده که در این میان خستگی و خرابی‌های ناشی از آن، از مدهای اصلی شکست در روسازی آسفالتی است. در واقع در اثر تکرار بیشتر بارگذاری، این ریز ترک‌ها به شکل ترک خستگی گسترش یافته و نهایتاً گسیختگی سازه‌ای روسازی آسفالتی را در پی خواهد داشت. سالانه بخش عمده هزینه‌های تعمیرات و نگهداری راه‌ها صرف برطرف نمودن خرابی‌های ناشی از ترک‌ها می‌گردد. یکی از عواملی که می‌تواند در افزایش عمر خستگی روسازی آسفالتی مؤثر باشد، پتانسیل خودترمیمی قیر و آسفالت است. منظور از خودترمیمی، توانایی بازیابی مشخصات مکانیکی از قبیل سفتی و مقاومت از دست رفته و نیز بازگشت جابه‌جایی حاصل از بارشدگی ترک‌ها، در طی دوره استراحت و دمای بالا است. در این پژوهش به بررسی پدیده خودترمیمی، عوامل تأثیرگذار در آن و معرفی شاخص‌های اندازه‌گیری این پدیده، آسفالتی به همراه نتایج آخرین تحقیقات پرداخته شده است.

واژه‌های کلیدی: خود ترمیمی، چسبنده قیری، روسازی آسفالتی، ماستیک قیری، عامل ترمیم

۱- مقدمه

کشور بین ۳ تا ۵ سال یعنی تقریباً یک پنجم عمر جهانی آسفالت باشد و اسراف‌ی که در زمینه خرابی‌های آسفالت در کشور صورت می‌پذیرد، بالغ بر چند هزار میلیارد تومان است (Ameri, Shokrgozar and Dehshiri, 2014). در این بین، ترک‌خوردگی روسازی یکی از بزرگ‌ترین مشکلات راه‌سازی محسوب می‌شود که سهم قابل توجهی از خرابی‌ها را به خود اختصاص داده است که در نهایت می‌تواند به فروپاشی روسازی منجر شود. وقتی بار به یک روسازی انعطاف‌پذیر اعمال می‌شود، در کف روسازی، تنش‌های کششی به وجود خواهد آمد که منجر به پیدایش ترک‌های ریز گشته که در صورت عدم ترمیم، تحت تکرار بارگذاری، بر تعداد آن‌ها افزوده شده و به تدریج با پیوستن آن‌ها به هم ترک‌های بزرگ‌تر شکل گرفته که در صورت ادامه این روند،

طراحی راه‌ها و راه‌سازی باید توسط مهندسان راه و ترابری به‌گونه‌ای انجام گیرد که نیازهای اساسی کاربران از جمله ایمنی و راحتی پاسخ داده شود و روسازی راه‌ها برای حداکثر زمان ممکن و در یک سطح قابل قبولی از خدمت‌دهی قرار داشته باشند. اعتقاد بر این است که خواص مخلوط طراحی شده، نقش مهمی را در وضعیت روسازی و کنترل خرابی‌های آن بازی می‌کند. عملکرد مخلوط نیز به‌طور قابل ملاحظه‌ای متأثر از شرایط چسبندگی قیری است. در کشور ما، با توجه به پهنه آب و هوایی موجود و تنوع کم قیرهای تولیدی خالص در کشور، تهیه قیرهایی با درجه عملکردی مناسب یک ضرورت محسوب می‌شود (Ameri et al., 2011). از طرفی پایین بودن عمر روسازی‌ها و هزینه‌گزافی که بابت نگهداری آن‌ها پرداخته می‌شود سبب شده عمر آسفالت در

پیرامون خودترمیمی مخلوط‌های آسفالتی نشان داده پدیده خودترمیمی در مخلوط به شدت تابع جزء قیر است. همچنین کیفیت ماستیک قیر نیز بر مقاومت چسبندگی و توانایی خودترمیمی ریزترک‌ها حین مدت زمان استراحت تأثیرگذار است. طی سال‌های اخیر تحقیقات آزمایشگاهی سعی در اندازه‌گیری خصوصیات خودترمیمی قیر با استفاده از آزمایش‌های رایج و استاندارد خستگی با استفاده از دستگاه رثومتر برش دینامیکی^۶ داشته است. در این مطالعات برای ارزیابی خودترمیمی عمدتاً از دو روش ارزیابی مدول^۷ به صورت اعمال زمان استراحت طولانی بین دو آزمایش خستگی و بارگذاری متناوب^۸ به صورت مجموعه‌ای از بارگذاری‌ها و استراحت‌های متوالی حین آزمایش خستگی استفاده شده است. دلیل اهمیت پارامتر خودترمیمی و اثرگذاری آن در بهبود و ارتقاء عمر خستگی مخلوط آسفالتی، بررسی این پارامتر و عوامل مؤثر بر آن می‌تواند اطلاعات مفیدی در رابطه با انتخاب مصالح مناسب در اختیار ما قرار دهد. یکی از اجزای تشکیل‌دهنده مخلوط آسفالتی فیلرها هستند که می‌توانند سهم بالایی در ارتقاء این پارامتر داشته باشند. با بررسی پارامتر خودترمیمی در ماستیک‌های مختلف با استفاده از دستگاه رثومتر برش دینامیکی می‌توان میزان اثرگذاری فیلرها را در شرایط آزمایشگاهی و دمایی متفاوت مورد ارزیابی قرار داد. در این پژوهش، به تشریح مسئله خودترمیمی، عوامل تأثیرگذار بر این پدیده و شاخص‌های ارزیابی آن پرداخته شده است.

۲- معرفی قیر، نقش و ساختار آن

عملکرد روسازی آسفالتی در ایران، مانند بسیاری از کشورهای در حال توسعه با انتظارات و خواسته‌های جوامع امروزی مطابقت ندارد. این عملکرد ضعیف و عمر کوتاه روسازی راه‌ها می‌تواند عوامل مختلفی داشته باشد که عبارت‌اند از (گلستانی، ۱۳۹۰):

۱. استفاده از قیر و مصالح نامناسب با توجه به شرایط آب و هوایی و کاربری روسازی
۲. طرح اختلاط نامناسب مخلوط‌های آسفالتی با توجه به شرایط و کاربری روسازی
۳. طراحی نامناسب روسازی و لایه‌های تشکیل‌دهنده آن
۴. اجرا و نظارت ضعیف
۵. نگهداری نامناسب

فروپاشی و گسیختگی روسازی رقم خواهد خورد (Grant, 2001). از آنجا که محافظت و بازسازی قیر موجود در روسازی، یک معضل بزرگ محسوب می‌گردد، اقدام به طراحی اصولی به منظور کاهش استفاده از منابع خام و بهبود شرایط موجود ضروری است. این امر محققین را بر آن داشت که به مطالعه عوامل مختلف و میزان اثربخشی آن‌ها بر عمر خستگی روسازی بپردازند. محققین روسازی پس از مشاهده تفاوت قابل ملاحظه بین نتایج به دست آمده از آزمون خستگی در آزمایشگاه (تحت بارگذاری بدون دوره استراحت) و عمر خستگی واقعی مشاهده شده در محل (تحت بارگذاری با دوره‌های استراحت)، با قابلیت جدیدی در مخلوط‌های آسفالتی، به نام خودترمیمی آشنا شدند (Sutharsan, 2010).

آسفالت خودترمیم‌شونده^۱ به عنوان نوع جدیدی از آسفالت، به طور قابل ملاحظه‌ای باعث ترمیم و شکاف ترک‌های مویی در سطح روسازی می‌شود و عمر خدمت‌دهی آن را حداکثر می‌سازد. منظور از خودترمیمی، ارزیابی مشخصات مکانیکی از قبیل سفتی^۲ و مقاومت^۳ از دست رفته و بازگشت جابه‌جایی حاصل از بازشدگی ترک‌ها^۴ در طول دوره استراحت و دمای بالاست (Qiu et al., 2012). برای طراحی اصولی روسازی راه نیاز به آگاهی از خصوصیات مصالح مورد استفاده در لایه‌ها است که از مهم‌ترین این ویژگی‌ها می‌توان به سفتی و مقاومت خستگی مخلوط آسفالتی اشاره نمود که مقاومت خستگی توانمندی مخلوط در برابر بارهای خمشی تکراری بدون شکست است (Sutharsan, 2010).

خاصیت خودترمیمی قیر یکی از عوامل مهمی است که نقش مهمی در مقاومت مخلوط در برابر ترک‌های خستگی ناشی از بارگذاری ترافیکی ایفا می‌کند. مواد قیری دارای خاصیت خودترمیمی بوده که با خاصیت ذاتی برگرداندن نسبی خرابی مانند ترک‌های به وجود آمده در عمر سرویس‌دهی، می‌تواند سبب افزایش عمر سرویس‌دهی روسازی و کاهش قابل ملاحظه‌ای در نشر گازهای گلخانه‌ای گردد (Butt, Birgisson and Kringos, 2012). خودترمیمی به صورت خلاصه فرآیندی است که در آن گسترش ترک در قیر یا مخلوط پس از عدم بارگذاری، به طور نسبی یا کامل برگشت داده می‌شود. تحقیقات صورت گرفته

مولکولی بالا هستند که در دی سولفید کربن حل می‌شوند. خواص قیر را می‌توان منوط به ساختمان شیمیایی، کمیت و کیفیت اجزای شکل‌دهنده آن دانست. به‌طور کلی، اجزای قیر به دو گروه شیمیایی مشخص به نام آسفالتن‌ها و مالتن‌ها تقسیم می‌شوند. مالتن‌ها نیز به گروه‌های ترکیبات آروماتیک، رزین‌ها و اشباع‌ها تقسیم می‌شود (Lesueur, 2009).

آسفالتن‌ها مواد آروماتیکی پیچیده با وزن مولکولی خیلی بالا هستند، که ۵ تا ۲۵ درصد قیر را تشکیل می‌دهند. آن‌ها اسکلت و ساختمان قیر را می‌سازند. رزین‌ها یا آروماتیک‌های قطبی، به‌عنوان ضد انعقاد برای آسفالتن‌ها، عامل چسبندگی و شکل‌پذیری می‌باشند و ترکیبات اشباع و روغن‌ها عامل روانی قیر هستند (Hamed, 2010). تغییر ترکیب شیمیایی قیر با گذشت زمان نیز در شکل ۲ نشان داده شده است. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود، مقدار آسفالتن قیر در مخلوط آسفالتی به‌تدریج با گذشت زمان افزایش می‌یابد، در حالی که مقدار رزین و ترکیبات آروماتیکی با گذشت زمان کاهش می‌یابد. اگرچه تغییرات کمی برای ترکیبات اشباع انتظار می‌رود، اما کمی افزایش در این جز، به دلیل ریزش روغن از وسایل نقلیه بر روی آسفالت است.

از منظر رئولوژیکی، رفتار قیرها مورد بررسی قرار گرفته است و مشخص گردیده رفتاری شبیه به مواد ویسکوالاستیک دارند (Van Poel, 1954). این مواد در پاسخ به تنش مکانیکی، بخشی از انرژی مکانیکی را ذخیره و بخشی دیگر را تلف می‌کنند. در دمای پایین و مدت زمان‌های بارگذاری کوتاه، آن‌ها مانند جامدات الاستیک عمل می‌کنند. در دما و مدت زمان‌های بارگذاری بالا، آن‌ها مانند سیالات ویسکوز ساده عمل می‌کنند. در دما و زمان بارگذاری متوسط، رفتار پیچیده‌تر می‌گردد. پاسخ مواد الاستیک، ویسکوز و ویسکوالاستیک تحت بارگذاری تنش ثابت در شکل ۳ نمایش داده شده است. در قسمت (الف) این شکل، بار ثابت وارده به یک ماده الاستیک و کرنش متناظر با تنش اعمالی نشان داده شده است. با حذف تنش اعمالی از روی ماده، بازیابی تا رسیدن به وضعیت اولیه صورت می‌گیرد. قسمت (ب) بیانگر رفتار ماده ویسکوز است که کرنش ماده، تحت تنش اعمالی در طی زمان، افزایش می‌یابد. قسمت (ج) رفتار ماده ویسکوالاستیک را تحت تنش ثابت نشان می‌دهد که در

همان‌طور که در مورد اول اشاره گردید، قیر نامناسب از جمله عوامل عملکرد ضعیف روسازی‌ها است که به همین سبب حجم بالایی از تحقیقات و مطالعات در راه‌سازی را به خود معطوف ساخته است. علی‌رغم درصد وزن کم (۴ تا ۶ درصد) قیر در مخلوط آسفالتی، این ماده در استحکام و پایداری پوشش جاده در برابر عوامل فرسایشی نقش مهمی دارد و بنابراین هرگونه بهبود خواص قیر، بهبود عملکرد مخلوط آسفالتی را به همراه دارد (Ameri et al., 2011). شکل ۱ اشکل ۱ سهم قیر را در خرابی‌های اساسی روسازی آسفالتی نظیر تغییر شکل دائمی، خستگی و ترک‌های دمای پایین نشان می‌دهد.



شکل ۱ تأثیر چسبندگی قیری بر خرابی‌های اساسی روسازی (Kennedy et al., 1994)

دوام و طول عمر عملکردی روسازی آسفالتی همواره به‌عنوان یکی از موضوعات مهم مطرح بوده است. به همین منظور یک آسفالت خودترمیم می‌تواند ترمیم ترک‌ها را به‌طور خودکار و بدون تعمیر به انجام برساند. به این نحو که قبل از اینکه ترک پیش رفته و بزرگ شود، آسفالت به‌صورت خودکار شروع به ترمیم قسمت ترک خورده می‌کند که این امر باعث ایجاد سطحی صاف و افزایش عمر خدمت‌دهی روسازی راه می‌گردد. قابلیت خودترمیمی قیر آن‌قدر زیاد نیست که بتواند به‌صورت موثر موجب افزایش طول عمر سرویس‌دهی روسازی آسفالتی شود (Gaskin, 2013). بنابراین ارتقا قابلیت خودترمیمی قیر و آسفالت بسیار مهم است.

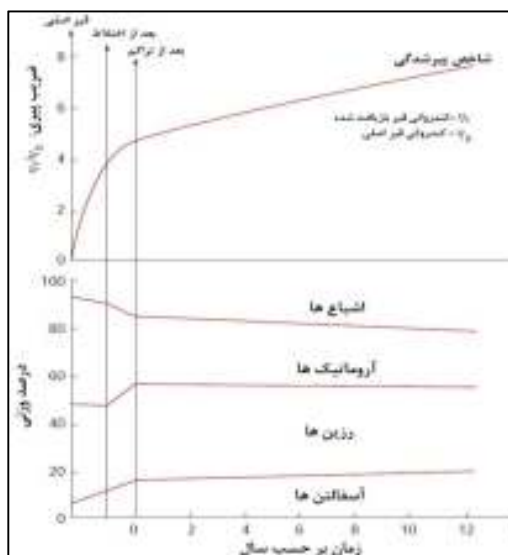
قیر در یک تعریف عمومی، ماده چسبنده و سیاه، مورد استفاده در روسازی‌های آسفالتی است (Lavin, 2014). بر اساس تعریف ASTM، قیرها، هیدروکربون‌هایی با وزن

بهره‌برداری مشخصی است. از این رو محققان همواره تلاش کرده‌اند که به نحوی، خواص این سنگین‌ترین برش نفتی را در جهت مطلوب تغییر دهند. اصلاح خواص قیر باعث بالا رفتن کیفیت آن و افزایش عمر بهره‌برداری روسازی گردیده و در نتیجه هزینه نگهداری و تکرار روسازی را به نحو چشمگیری کم خواهد کرد (ابطحی، گلی و دیباجی، ۱۳۹۰). گرچه برآورد دقیقی از میزان مصرف قیرهای اصلاح‌شده، حتی در ایالات متحده نیز وجود ندارد، ولی تخمین زده می‌شود که این رقم به ۱۵٪ کل قیرهای مورد استفاده در این کشور برسد و انتظار می‌یابد که این مقدار در آینده نیز شدیداً افزایش یابد (Bahia et al., 2001). آمارها نشان می‌دهد، هزینه تولید هر تن قیر اصلاح شده در این کشور، بسته به نوع اصلاح انجام شده، حدود ۵۰٪ تا ۱۰۰٪ بیشتر از قیرهای اصلاح نشده است که این امر موجب افزایش ۱۰ تا ۲۰ درصدی قیمت آسفالت در این کشور شده است. در شرایطی که قیرهای اصلاح شده به حد کافی بهبود عملکرد قیر را در پی داشته باشد، این افزایش قیمت می‌تواند مقرون‌به‌صرفه باشد (Bahia et al., 2001).

۳-۱- طبقه‌بندی اصلاح‌کننده‌های قیر

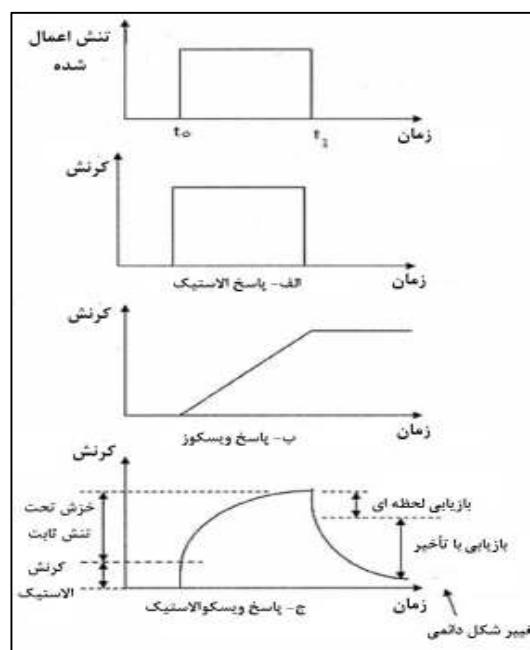
به‌طور کلی اصلاح‌کننده‌های قیر، موادی هستند که یا از پیش به قیر افزوده شده یا در حین تهیهی مخلوط‌های آسفالتی به واحد مخلوط‌کنندهی کارخانه آسفالت اضافه می‌شوند تا خواص یا عملکرد قیر دارای افزودنی یا مخلوط آسفالتی ساخته شده با آن را بهبود بخشند. شکل ۴ رفتار ایده آل را به تصویر کشیده است. همان طوری که ملاحظه می‌شود، قیر اصلاح شده باید از دماهای زیر صفر تا حدود ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد قوام تقریباً یکسانی داشته و در دماهای پایین انعطاف‌پذیر بوده و در دماهای بالای ۵۰ درجه سانتیگراد، مقاومت خوبی در برابر تغییر شکل از خود نشان دهد. در عین حال این قیر باید ویسکوزیتهی پایینی در حوالی دمای اختلاط داشته باشد تا بتوان آن را با دستگاه‌های معمولی با مصالح مخلوط نمود. اگر قیر اصلاح شده این خاصیت را نداشته باشد، خیلی سریع رد خواهد شد.

طی زمان طولانی کرنش افزایش می‌یابد و با حذف تنش اعمال شده، ماده نمی‌تواند به وضعیت اولیه برگردد که موجب تغییر شکل دائمی می‌شود.



شکل ۲ سخت شدن قیر و تغییر ترکیبات آن در مراحل مختلف

زمانی (Read and Whiteoak, 2003)



شکل ۳ پاسخ ایده آل مواد الاستیک، ویسکوز و ویسکوالاستیک

تحت بارگذاری تنش ثابت (Hamed, 2010)

۳- اصلاح قیر

قیرهای به دست آمده از نفت خام، با توجه به خواص فیزیکی و مکانیکی، دارای قابلیت کاربردی محدود و زمان

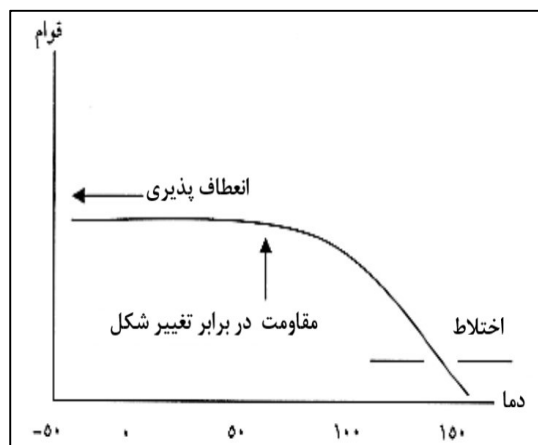
2004). در هریک از این دو روش، هدف نزدیک شدن به یک نوع رفتار ایده آل برای قیر است. هرگاه مواد شیمیایی برای ایجاد تغییر در ساختمان شیمیایی و در نتیجه خواص و رفتار فیزیکی قیر به کار برده شود، این نوع اصلاح خواص را یک روش شیمیایی می‌نامند. روش‌های فیزیکی به‌طور گسترده‌تر در مورد اصلاح خواص قیر و در نتیجه بهبود رفتار مخلوط‌های آسفالتی به کار برده می‌شود.

افزودنی‌های مختلفی از جمله مواد معدنی، آلی، طبیعی و صنعتی در زمینه بهبود خواص قیرها مورد بررسی و مصرف قرار گرفته‌اند. جدول ۱ تأثیر برخی اصلاح‌کننده‌ها بر خواص عملکردی قیر و مخلوط آسفالتی را نشان می‌دهد. علامت \checkmark بیانگر بهبود آن عملکرد، در شرایط خدمت‌دهی روسازی است.

۴- خودترمیمی (Self-Healing)

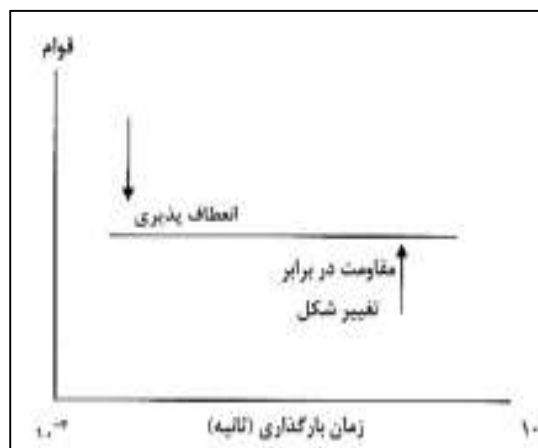
مطالعات صورت گرفته در این زمینه نشان می‌دهد که پتانسیل خودترمیمی برای روسازی آسفالتی بسیار حائز اهمیت بوده زیرا ترک‌ها به‌وسیله این پتانسیل ترمیم گشته و بهبود می‌یابند و در نتیجه عمر سرویس‌دهی روسازی نیز افزایش خواهد یافت. از این رو وجود این پتانسیل می‌تواند سبب بهینه‌سازی تولید آسفالت بادوام با حفظ خصوصیات عملکردی و ساختاری گردد (Gaskin, 2013).

شواهد تجربی بیانگر اهمیت مسئله خودترمیمی در روسازی آسفالتی است. محققین روسازی پس از مشاهده تفاوت قابل ملاحظه بین نتایج به دست آمده از آزمون خستگی در آزمایشگاه (تحت بارگذاری بدون دوره استراحت) و عمر خستگی واقعی مشاهده شده در محل (تحت بارگذاری با دوره‌های استراحت)، با قابلیت جدیدی در مخلوط‌های آسفالتی، به نام خودترمیمی آشنا شدند (Sutharsan, 2010).



شکل ۴ رفتار قیر اصلاح شده (Araujo et al., 2014)

در شکل ۵ رفتار یک قیر ایده آل، در هنگام کارکرد نشان داده شده است. همانطوری که ملاحظه می‌شود، همانطوری که ملاحظه می‌شود، تحت بارهای دینامیکی خیلی سریع و خیلی آهسته که تقریباً معادل شرایط آمدوشد سریع و بارهای سنگین است، قیر ایده آل رفتار یکسانی دارد که در نتیجه قیرهای اصلاح شده نیز بایستی دارای چنین رفتاری باشد.



شکل ۵ رفتار قیر ایده آل هنگام خدمت‌دهی (Daly, 2017)

به‌طور کلی روش‌های اصلاح خواص قیر را می‌توان به دو دسته فیزیکی و شیمیایی طبقه‌بندی کرد (Yousefi,

جدول ۱ مزایای اصلاح کننده‌های مختلف (Read and Whiteoak, 2003)

نوع اصلاح کننده	تغییر شکل دائمی	ترک خوردگی حرارتی	ترک خوردگی خستگی	خرابی رطوبتی	پیرشدگی
الاستومرها	✓	✓	✓		✓
ترموپلاستیک‌ها	✓				
خرده لاستیک		✓	✓		
دوده	✓				✓
آهک				✓	✓
گوگرد	✓				
اصلاح کننده شیمیایی	✓				
آنتی اکسیدان‌ها					✓
افزودنی ضد عریان‌شدگی				✓	✓
آهک هیدراته				✓	✓

شکل بارگذاری به دلیل داشتن زمان‌های استراحت طولانی با بارگذاری واقعی متفاوت است. این اشکال در روسازی‌های تحت ترافیک سنگین خود را بیشتر نشان می‌دهد (Bahia et al., 1999). گزارش‌های میدانی نیز از وجود پدیده خودترمیمی ارائه شده است. در چهار مقطع روسازی ALF^۱ با به‌کارگیری امواج سطحی، سختی قبل و پس از گذشت ۲۴ ساعت از عبور ترافیک اندازه‌گیری شد. نتیجه‌های به‌دست آمده حاکی از پتانسیل بیشتر خودترمیمی در شرایط خستگی شدیدتر بود.

۵- مکانیسم خودترمیمی

در ابتدا بحث خودترمیمی در نانو ساختارها و پلیمرها مطرح گردید و توانسته‌اند پیشرفت‌های چشمگیری را در زمینه ساخت مواد خودترمیم کسب نمایند. مطالعه و شناسایی این پدیده در مواد پلیمری دارای سابقه‌ای نه‌چندان طولانی است. مکانیسم خودترمیمی در سیستم‌های پلیمری به‌صورت افزایش مقاومت مکانیکی تا رسیدن به حد مقاومت گسیختگی اولیه در محل پیوند سطحی دو قطعه از یک ماده‌ی پلیمری آمورف و تماس کامل آن دو در دمایی بالاتر از دمای تبدیل شیشه‌ای، تعریف شده است. پس از ترمیم؛ سطحی که در آن پیوند انجام شده از هر لحاظ با سطوح دیگر ماده غیرقابل تمایز شده و اصطلاحاً پیوندگاه (محل پیوند) ترمیم یافته است (Gaskin, 2013; Prager and Tirrell, 1981). برای درک بهتر مکانیسم ترمیم، ابتدا باید ترک در مخلوط و ملات را به دو نوع تقسیم کرد.

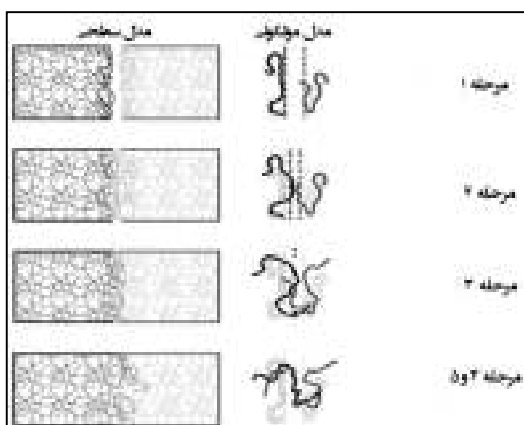
اعمال زمان استراحت به مدت ۳ روز در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد بر نمونه تیرچه‌های آسفالتی با دانه‌بندی متراکم که قبلاً تحت بارگذاری کششی محوری گسیخته شده بودند نشان داد این نمونه‌ها پس از خودترمیمی تا ۹۰٪ مقاومت کششی اولیه را بازیافتند. بعلاوه اعمال زمان استراحت ۱ روزه بین دو آزمایش خستگی سیکلیک انجام شده بر نمونه‌های مشابه نشان داد نسبت میان عمر خستگی پس از استراحت به عمر خستگی قبل از استراحت حتی بزرگتر از ۵۰٪ خواهد بود. شایان ذکر است که در طی زمان استراحت نمونه‌ها تحت فشار ۱/۴۷ کیلوپاسکال به‌منظور بسته شدن ترک‌ها نگهداری شدند. این پژوهش اگرچه شرایطی مشابه آنچه در روسازی واقعی اتفاق می‌افتد را دنبال نکرده بود اما به وضوح وجود خودترمیمی را تأیید کرد (Bazin and Saunier, 1967).

وابستگی مکانیسم خودترمیمی به دما توسط محققین متعددی گزارش شده است. افزایش دمای آزمایش بازگشت مقاومت را سرعت می‌بخشد. تأثیر زمان استراحت با استفاده از بارگذاری متناوب خاصیت خودترمیمی نمونه‌های قیری با استفاده از دستگاه رئومتر برشی دینامیکی بر روی قیرهای رده‌ی PG 64-22 و PG 76-22 در بازه دمایی ۲۰ تا ۴۰ درجه سانتی‌گراد، مورد بررسی قرار گرفت. پس از هر ۵۰۰۰ سیکل بارگذاری زمان‌های استراحت ۱ ساعت، ۲ ساعت و ساعت بر نمونه‌ها اعمال شد. نتایج این پژوهش نشان داد این آزمایش به علت قابلیت تغییر مستقل سطح کرنش و فرکانس بارگذاری نیز محاسبه میزان انرژی مستهلک شده روشی سودمند در ارزیابی خستگی و خودترمیمی است. اما این

صورت گرفته است؛ و می‌توان ادعا کرد در این مرحله خودترمیمی البته نه به‌طور کامل رخ می‌دهد

۵- پراکنش تصادفی^{۱۰}: پیوند به‌صورت راندوم در مولکول‌های انتشار یافته به‌منظور رسیدن به سطحی از مقاومت اولیه مواد که در طی روند خرابی از دست رفته است برقرار می‌گردد. تا با دریافت زمان کافی بتوان به مقادیر اولیه دست یافت (Gaskin, 2013).

این مراحل در شکل ۷۷ توسط دو مدل سطحی و مولکولی نمایش داده خواهد شد.



شکل ۷ مکانیسم پنج مرحله‌ای خودترمیمی (R. Wool and O'Connor, 1981)

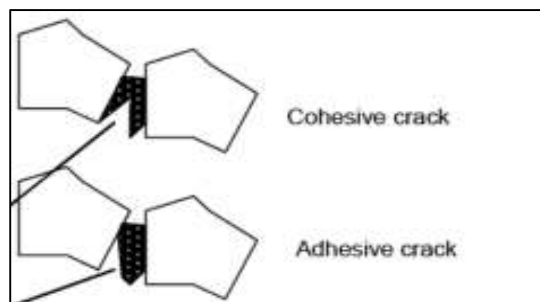
دو فرآیند مهم بلافاصله پس از بارداری آغاز می‌شوند که عبارت‌اند از بازگشت ویسکوالاستیک مصالح و خودترمیمی در محدوده فرآیند شکست. حتی در صورت کوچک بودن تنش یا کرنش برای ایجاد خرابی، فرآیند بازگشت ویسکوالاستیک در کل حجم مصالح اتفاق می‌افتد. برخلاف بازگشت ویسکوالاستیک، وقوع فرآیند خودترمیمی در گرو اعمال تنش یا کرنش منجر به ایجاد خرابی است. تفاوت پدیدار شناختی میان بازگشت ویسکوالاستیک و خودترمیمی این است که بازگشت ویسکوالاستیک در اثر باز آرایش مولکول‌ها در حجم کل مصالح اما خودترمیمی در اثر تر شونده‌گی و همجوشی دو سطح نانو ترک برای رسیدن به مقاومت اولیه به وجود می‌آید (Bhasin et al., 2008).

خودترمیمی به‌محض باربرداری بار خارجی اتفاق می‌افتد. شکل ۸ نوک یک ترک در ناحیه‌ای مطلوب که خودترمیمی در آن اتفاق می‌افتد را نشان می‌دهد.

۱- پیوستگی^۹

۲- چسبندگی^{۱۱}

مورد اول در درون خود ساختار ملات (قیر یا ماستیک) رخ می‌دهد. مورد دوم در ناحیه اتصال بین قیر و سنگدانه اتفاق می‌افتد (Qiu, 2008). در شکل ۶ این موارد نشان داده شده است.



شکل ۶ انواع مختلف ترک در چند مقیاس از مصالح قیری

(Qiu, 2012)

بر اساس مطالعات گسترده محققین، مراحل اصلی در فرآیند خودترمیمی عبارت‌اند از (R. P. Wool, 1980):

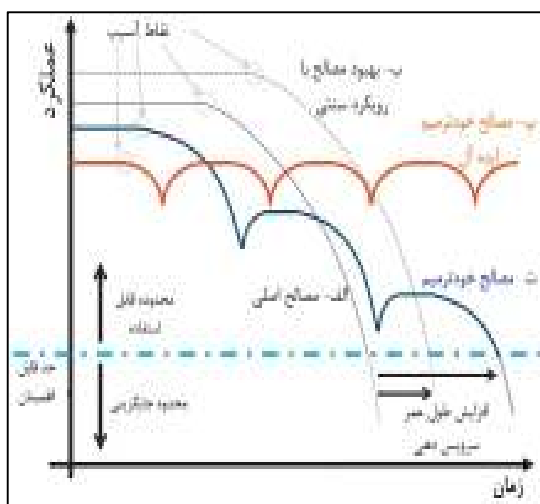
۱- بازآرایی^{۱۱}: در این مرحله زنجیره‌های میکروسکوپی دو سطح ناحیه شکست پس از استراحت، جهت بازیابی خصوصیات مکانیکی، انتشار یافته و به سمت هم حرکت می‌کنند.

۲- نزدیک شدن دو سطح^{۱۲}: ایجاد و برقراری تماس مکانیکی در بخشی از سطح که ملزم بوده تا زنجیره‌ها انرژی حرارتی کافی را به‌عنوان نیروی پیش برنده برای غلبه با انرژی موانع موجود، دریافت نمایند. در این مرحله برای برقراری تماس بین سطوح شکست؛ حداکثر فاصله ۱۰ نانومتر باید حفظ گردد.

۳- تر شدن دو سطح یک ترک^{۱۳}: در این مرحله نیروهای سطحی، نیروهای الکترواستاتیک و پیوندهای هیدروژنی با ایجاد تغییر شکل‌های الاستوپلاستیک، سبب کاهش تدریجی بی‌نظمی‌ها در سطح و در نهایت ایجاد خودترمیمی چسبنده می‌شوند. فاصله‌ی لازم بین دو سطح در حدود ۰٫۳ نانومتر تا ۱۰ نانومتر است.

۴- همجوشی^{۱۴}: انتشار مولکول‌ها از سطحی به سطح دیگر؛ در فاصله‌ای کمتر از ۰٫۳ نانومتر، با انتقال تنش‌های ناشی از کار ترمودینامیک حاصل از پیوستگی، گیرش مولکولی

گرچه این زمینه از مواد جدید بسیار مورد توجه هستند، اما محدودیت‌های عملی در تفهیم سازوکار ترمیم ترک و پایداری کارایی محل ترمیم شده، وجود دارد. کارایی مواد خودترمیمی در طولانی مدت پریشی است که هنوز بدون پاسخ مانده است. اما تلاش‌ها در علم تولید مواد ترمیم‌پذیر، به‌ویژه آن‌ها که قابلیت ترمیم خودبه‌خود دارند، رو به گسترش است. شکل ۹ به صورت شماتیک اصل اساسی گسترش طول عمر را به وسیله پیاده‌سازی مفهوم ترمیم نشان می‌دهد. یک رویکرد سنتی نسبت به کاربرد طولانی‌تر ساختارها و سیستم‌ها، توسعه مقاومت و استفاده از مواد بهتر نسبت به نمونه‌های اولیه است (منحنی‌های الف و ب) (Garcia, 2014). در حالی که رویکردهای سنتی، با بهبود خواص اولیه تاکنون به تحولات کوچکی با وجود پیشرفت‌های بزرگ رسیده است، مفهوم ترک یک رویکرد پیشنهادی برپایه مدیریت خسارت به‌جای تحمل ترک ارائه می‌دهد. این رویکرد جدید علیرغم اینکه، سن پایینی در عرصه میدانی دارد، نتایج بسیار قابل توجهی از خود نشان داده است. منحنی ت در شکل ۹ افزایش طول عمر را با استفاده از یکی از ساده‌ترین رویکردهای خودترمیمی نشان می‌دهد که خواص اولیه مصالح را بازیابی می‌کند. بیشترین حد ممکن در افزایش طول عمر با امکان ترمیم چندباره که هیچ‌گونه کاهش در خواص اولیه نباشد، فراهم می‌شود؛ مانند آنچه در منحنی پ دیده می‌شود.

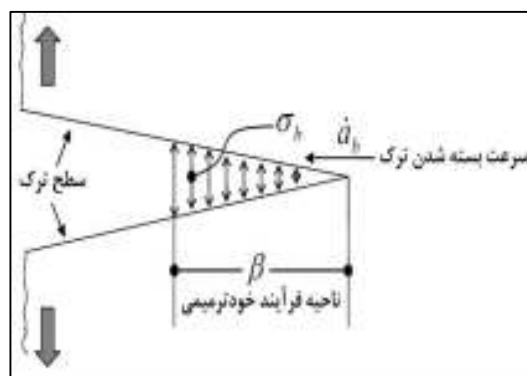


شکل ۹ افزایش طول عمر در مواد مهندسی به‌وسیله انجام اصل

خودترمیمی (Garcia, 2014)

حال در زمینه‌ی مواد قیری و روسازی آسفالتی تعریف خودترمیمی اندکی متفاوت است. مکانیسم ذکرشده برای مواد پلیمری در سه مرحله رخ داده که منجر به بازیابی بخشی یا تمام خصوصیات ذاتی و مکانیکی چسبنده قیری در امتداد سطح شکست (ترک) می‌گردد. این سه مرحله در دو فاز رخ می‌دهد: فاز اول که همان خودترمیمی ویسکوالاستیک بوده، مربوط به ایجاد و برقراری اتصال مجدد بین سطح سنگدانه‌ها و چسبنده قیری است. فاز دوم، خودترمیمی ویسکوز است که وابسته به زمان بوده و مربوط به ایجاد پیوستگی در مواد قیری است؛ که حتی اگر به آن فرصت کافی داده شود می‌تواند به‌طور کامل رخ داده و به بازیابی نسبتاً کامل و یا صد در صد خصوصیات مکانیکی از دست رفته، منجر گردد (García, 2012; Qiu et al., 2011; Sutharsan, 2010). مکانیسم سه مرحله‌ای مطابق زیر ارائه شده است:

۱. تر شدن دو سطح ریزترک‌ها (که با انرژی سطحی دو سطح ترک مدنظر است)
۲. انتشار مولکول‌ها از سطحی به سطح دیگر
۳. به‌صورت راندم درآوردن مولکول‌های انتشار یافته به منظور رسیدن به سطحی از مقاومت اولیه مواد که در طی روند خرابی از دست رفته است (Bhasin et al., 2008; Sutharsan, 2010).



شکل ۸ توزیع ترک و ناحیه فرآیند خودترمیمی (Bhasin et al., 2008)

۵-۱- ضرورت خودترمیمی

مواد خودترمیمی قابلیت ویژه‌ای در افزایش طول عمر مواد ایجاد می‌کنند. به این منظور، دولت‌ها و صنایع، بودجه‌های کلانی را صرف طراحی و ساخت مواد خودترمیمی می‌کنند.

۶- تأثیر پارامترهای مختلف بر عملکرد

خودترمیمی

جهت بررسی پتانسیل خودترمیمی در محیط آزمایشگاهی، باید تأثیر پارامترهای مختلف را در نرخ خودترمیمی^{۱۶} مورد ارزیابی قرارداد. این پدیده بسیار پیچیده بوده و تابع عوامل مختلفی از جمله؛ دوره استراحت بین دو بارگذاری، شرایط آزمایشگاهی، میزان پیرشدگی چسبنده قیری و نوع قیر مصرفی است. شرایط آزمایشگاهی نیز خود شامل سطح کرنش اعمالی، فرکانس بارگذاری و دمای آزمایش است. همچنین به عوامل مؤثر بر بسته شدن ترک مانند؛ ماهیت سطح ترک، طول ترک، وضعیت تنش و شرایط حاکم بر نوک ترک، تاریخچه بارگذاری و نوع مواد مورد استفاده در مخلوط بستگی دارد (Sutharsan, 2010).

۶-۱- تأثیر اعمال دوره استراحت بر عملکرد خودترمیمی

یکی از پارامترهایی که در عملکرد خودترمیمی مخلوط آسفالتی مؤثر است، دوره استراحت بوده که در مطالعات متعددی مورد بررسی قرار گرفته است. مهم‌ترین مواردی که در رابطه با دوره استراحت وجود دارد، یکی مدت‌زمان آن و دیگری تعداد دفعات اعمال است. تأثیر اصلی اعمال دوره‌های استراحت بر عملکرد خستگی در چسبنده‌های قیری، کاهش نرخ مدول دینامیکی برشی (G^*) است. برای خرابی خستگی و شکست ناشی از آن تعریف جامعی ارائه می‌گردد که بر اساس آن، عمر خستگی برابر با تعداد چرخه‌های بارگذاری برای رسیدن به کاهش ۵۰ درصدی در مقدار G^* خواهد بود (Sutharsan, 2010). با اعمال بارگذاری‌های متناوب، تأثیر دوره استراحت را بر عمر خستگی مورد بررسی قرار می‌گیرد. روند آزمایش بدین صورت است که پس از اعمال تعداد مشخصی سیکل بارگذاری پیوسته، بارگذاری به‌طور کامل متوقف شده و مدت زمان معینی (برابر مدت‌های ۲۵ و ۱۰ و ۵ و ۳ و ۰ برابر طول چرخه‌ی بارگذاری) به نمونه‌ها استراحت داده می‌شود و سپس با اعمال مجدد بارگذاری پیوسته با تعداد چرخه‌های معین و پس از آن اعمال دوباره دوره استراحت آزمایش دنبال می‌شود. در این مطالعه مشخص شد که اعمال دوره استراحت تأثیر بسیار مهمی بر پتانسیل خودترمیمی و در نهایت بهبود عملکرد خستگی و افزایش عمر خستگی (روسازی) خواهد گذاشت (Sutharsan, 2010). می‌توان

این‌گونه بیان کرد که با اعمال دوره استراحت، روند خودترمیمی بهتر انجام گرفته و در نتیجه عمر خستگی افزایش می‌یابد. اما نکته‌ی دیگری که وجود دارد این است که تعداد دوره استراحت‌های اعمال شده، نقش پررنگ‌تری در بهبود قابلیت خودترمیمی خواهد داشت؛ تا حدی که با افزایش تعداد دوره‌ی استراحت از ۱ به ۱۰، تغییرات مثبت زیادی در عمر خستگی مشاهده می‌شود (Stimilli et al., 2012).

۶-۲- تأثیر درجه‌ی پیرشدگی بر عملکرد خودترمیمی

محققین با ارزیابی و بررسی بیشتر روی داده‌های حاصل از آزمایش‌های خستگی، به این نتیجه دست یافتند که درجه‌ی پیرشدگی تأثیر قابل ملاحظه‌ای بر افزایش عمر خستگی در ارتباط با روند خودترمیمی خواهد گذاشت. با انجام آزمایش DSR در مد کرنش ثابت، مشاهده شد که هم پیرشدگی کوتاه مدت آزمایش لعاب نازک چرخشی (RTFO) و هم بلندمدت (PAV) تأثیر مثبتی بر عمر خستگی نمونه‌ها خواهد گذاشت (Stimilli et al., 2012; Sutharsan, 2010; Van de Ven, 2010). نتایج تحقیقات گذشته مبنی بر این است که درجه پیرشدگی به نوع آسفالت مصرفی وابسته بوده و نیز سختی ایجاد شده بر اثر پیرشدگی در نمونه‌ها لزوماً عمر خستگی ترکیبات آسفالتی را کاهش نخواهد داد (Tsai et al., 2005). نکته‌ای مهم اینکه نرخ رشد ترک برای مخلوط‌های سخت شده در اثر روند پیرشدگی در آزمایشگاه، بسیار کند بوده ولی در محیط واقعی این روند به‌صورت عکس عمل کرده و مخلوط پیر شده عملکرد ضعیف‌تری از خود نشان می‌دهد (Roque et al., 2002).

۶-۳- تأثیر نوع قیر مصرفی بر عملکرد خودترمیمی

از آنجا که خودترمیمی در مواد آسفالتی به‌عنوان یک پتانسیل ذاتی در خودبازیابی خواص مواد تعریف می‌گردد، پس می‌توان نتیجه گرفت که تا حد زیادی به خصوصیات شیمیایی ترکیبات آسفالتی و نیروهای بین مولکولی (واندروالسی) وابسته است. برای ارزیابی میزان اثربخشی نوع قیر مصرفی، دو نوع متعارف شامل، PG 70-28 و PG 64-28، یکبار در کرنش ثابت و دما و فرکانس متغیر؛ بار دیگر با ثابت گرفتن دما و متغیر گرفتن دو

کرنش، دمای آزمایش و فرکانس بارگذاری بوده و در ادامه هر مورد به تفکیک مورد ارزیابی قرار می‌گیرد:

۶-۵- تأثیر سطح کرنش بر عملکرد خودترمیمی

برای تعیین بازه کرنش خطی، آزمایش کرنش رفت و برگشتی با فرکانس بارگذاری ثابت انجام گرفت و با افزایش سطح کرنش، مقادیر G^* ثبت می‌گردید. طبق مشاهدات صورت گرفته، برای تعیین بازه کرنش خطی یا ویسکوالاستیک، میزان کاهش ۵۰ درصدی در مقدار G^* معیار قرار گرفته شد. تأثیر سطح کرنش بر روند خودترمیمی با نموداری غیرخطی مشخص و مشاهده گردید که در سطح پایینی از خودترمیمی با افزایش کرنش، نرخ خودترمیمی کاهش خواهد یافت؛ و از آنجایی که روند خودترمیمی تابعی از نرخ تجمع خرابی است؛ می‌توان بیان نمود که سطح بالایی از کرنش، به روند تجمع خرابی سرعت بخشیده و توانایی مولکول‌های آسفالت را جهت خودترمیمی در مدت زمان کوتاه کاهش می‌دهد (Sutharsan, 2010).

۶-۶- ۶-۵- تأثیر دمای آزمایش بر عملکرد خودترمیمی

یکی دیگر از پارامترهایی که می‌تواند بر قابلیت خودترمیمی تأثیر قابل ملاحظه‌ای بگذارد، دما است؛ به طوری که میزان بازیابی خصوصیات در روند خودترمیمی با زمان رابطه‌ی مستقیم داشته و نرخ آن با دما افزایش می‌یابد (García, 2012). دما معمولاً به‌عنوان یک فاکتور بسیار مهم در روند خودترمیمی به‌شمار می‌آید. علت آن هم اثرگذاری دما بر دینامیک حرارتی و قابلیت جاری شدن مولکول‌ها است (Sutharsan, 2010). بدین منظور جهت بررسی اثر دما در خودترمیمی، در سال ۲۰۰۱ مطالعه‌ای صورت گرفت که در آن برای ارزیابی خودترمیمی، به کمک دو نمونه مخلوط (مخلوط حاوی درشت‌دانه و مخلوط حاوی ریزدانه) در دماهای ۱۰ و ۱۵ درجه سانتیگراد، از آزمایش کشش غیر مستقیم روسازی برتر استفاده شد. نتیجه دیگر این مطالعات این بود که روند خودترمیمی در دمای ۱۰ درجه سانتی‌گراد نسبت به ۱۵ درجه سانتی‌گراد بسیار آهسته‌تر رخ داده و خود ترمیمی تا حد بسیار زیادی به دما وابسته است؛ به طوری که اگر دما به اندازه کافی بالا باشد، قابلیت خودترمیمی به صورت آنی اتفاق می‌افتد. همچنین مشخص شد که در دمای ۱۵ درجه سانتیگراد، نرخ

معیار دیگر و در آخر هم با ثابت فرض نمودن فرکانس و متغیر در نظر گرفتن دو پارامتر دیگر؛ باهم مقایسه شدند. در هر سه حالت، نرخ خودترمیمی برای قیر با، PG 70-28 از PG 64-28 بالاتر بود. نتایج نشان می‌دهد که با اصلاح قیرها (با افزودنی‌های پلیمری) عملکرد خودترمیمی در هر دو نوع قیر، به دلیل افزایش ارتباط میان مولکولی بهبود می‌یابد (Sutharsan, 2010).

۶-۴- تأثیر شرایط آزمایشگاهی بر عملکرد خودترمیمی

بیشتر تحقیقات حوزه خودترمیمی مربوط به بررسی عوامل مؤثر بر مقدار ترمیم، نظیر دما، دوره استراحت، حالت بارگذاری، خسارت نمونه قبل از اعمال دوره استراحت، تأثیر قیر اصلاح شده پلیمری بر روی خواص ترمیم مواد، پیر شدگی، خواص قیر موجود در مخلوط و غیره است. در حالت کلی برای ترمیم مصالح آسفالتی، یک رویکرد تحقیقاتی سه‌گانه می‌توان در نظر گرفت. سه بخش اصلی از بررسی پدیده خودترمیمی که در نظر گرفته می‌شود، بخش مکانیکی، ماده و مدل کردن است.

• بخش مدل کردن

این بخش بر توضیح پدیده خودترمیمی با استفاده از مدل کردن عددی تمرکز دارد. یک رویکرد مدل مؤثر که بتواند بین مدل‌های خودترمیمی ارتباط برقرار کند، مورد نیاز است.

• بخش مکانیکی

این بخش بر توسعه یک روش آزمایش مؤثر برای اندازه‌گیری قابلیت خودترمیم چسبنده قیری تمرکز دارد. این روش آزمایش بهتر است به صورت بسیار نزدیکی شبیه به فرآیند خودترمیمی در عمل باشد. علاوه بر این، تأثیر عوامل تأثیرگذار مانند دما، مدت دوره ترمیم و سطح خسارت در شروع ترمیم به حساب آورده شود.

• بخش ماده

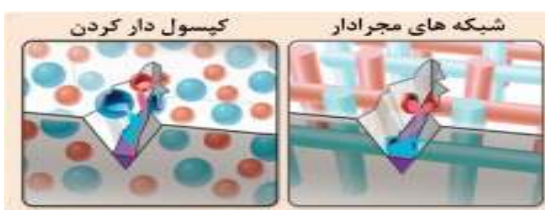
این بخش بر بهبود قابلیت خودترمیمی مواد قیری با استفاده از ترکیبات خودترمیمی جدید تمرکز دارد. اصلاح کننده‌های خودترمیمی جدید باید با در نظر گرفتن معیارهای خاصی انتخاب گردند. ویژگی‌های اساسی و قابلیت خودترمیمی باید بررسی گردد. این شرایط شامل سطح

خودترمیمی در مخلوط درشت‌دانه بسیار بیشتر از مخلوط ریزدانه خواهد بود (Grant, 2001).

۷-۲- خودترمیمی غیر ذاتی

حالت خودترمیمی غیر ذاتی را می‌توان با دو مکانیسم، پدید آورد:

مبتنی بر کپسول
استفاده از شبکه‌های مجرادار (سه‌بعدی یا مویرگی)
شکل ۱۰ مکانیسم ترمیم به روش غیرذاتی را به تصویر کشیده است.



شکل ۱۰ مکانیسم ترمیم به روش غیرذاتی (Blaiszik et al., 2010)

۷-۲-۱- کپسول‌دار کردن

در سال ۱۹۵۰ برای اولین بار تهیه میکروکپسول‌ها توسط گرین و اشلايگر صورت گرفت و از اواسط دهه ۱۹۷۰ روش‌های مختلف میکروکپسوله کردن در صنایع دارویی به کار گرفته شد (Cosco et al., 2007). در سال ۲۰۰۱ از میکروکپسول‌ها در سیستم‌های خودترمیم‌شونده توسط وایت و همکاران استفاده شد (Blaiszik et al., 2010). نحوه ترمیم خودکار سیستم میکروکپسول حاوی ماده ترمیم‌گر و کاتالیزهای واقع در ماتریس اپوکسی، در شکل ۱۱ نشان داده شده است:

۱. ابتدا خسارت وارد شده موجب ایجاد ترک می‌شود.
۲. آن ترک موجب شکستگی میکروکپسول و رهایش جز ترمیم‌گر مایع در صفحه ترک از طریق مویرگی می‌شود.

۳. نهایتاً جز ترمیم‌گر، در تماس با کاتالیزور و انجام عمل پلیمریزاسیون، موجب بسته شدن ترک می‌شود.

۶-۱- تأثیر فرکانس بارگذاری بر عملکرد خودترمیمی

با انجام آزمایش در فرکانس‌های مختلف (10Hz، 15Hz، 20Hz و 25Hz)، اثر فرکانس بارگذاری در روند خودترمیمی مورد ارزیابی قرار گرفته شده است. نتایج نشان می‌دهد که در سطح پایینی از خودترمیمی، با افزایش فرکانس بارگذاری، نرخ خودترمیمی کاهش یافته و رابطه‌ی حاکم بین این دو پارامتر غیرخطی است. می‌توان این‌طور بیان کرد که نرخ بالای بارگذاری با تسریع روند تجمعی خرابی، پتانسیل خودترمیمی را کاهش خواهد داد (Sutharsan, 2010).

۷- مکانیسم‌های رایج خودترمیمی

توجه اولیه به مواد خودترمیمی به سال ۱۹۷۰ برای کاربردهایی نظیر اکتشافات فضایی (آچولو)، مطالعات زمین (شاتل) و موشک‌های بالستیک استفاده بر می‌گردد (R. P. Wool, 2008). علی‌رغم میزان اندک تاریخچه تحقیقاتی خودترمیمی در مصالح قیری، مکانیسم ترمیم در مواد پلیمری به شدت مورد مطالعه بوده است. پراگر و تیرل در سال ۱۹۸۱، پدیده ترمیم را بدین گونه تعریف کردند (Prager and Tirrell, 1981):

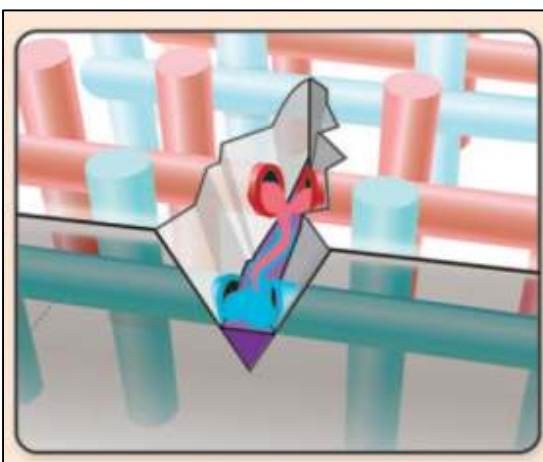
“وقتی که دو سطح از مواد پلیمری آمورف، بالای دمای انتقال شیشه‌ای در تماس با یکدیگر واقع می‌شوند، اتصال سطوح به تدریج افزایش قدرت مکانیکی را به همراه دارد و اگر زمان کافی داده شود به تمام استحکام شکست ماده اولیه می‌رسد. در این مرحله سطح اتصال یافته در تمام جهات نسبت به دیگر سطوح که ممکن است در حجم ماده واقع شده باشد، قابل شناسایی نیست که در این حالت می‌گویند اتصال ترمیم یافته است.”

در حالت کلی، می‌توان گفت خودترمیمی در مواد، به دو روش ذاتی و غیر ذاتی امکان‌پذیر است. در روش غیرذاتی، عنصر ترمیم از پیش به ماده اضافه می‌شود و در زمان مناسب رهایش پیدا می‌کند و موجب ترمیم ترک می‌شود. در روش ذاتی، عمل ترمیم از راه تشکیل پیوندهای برگشت‌پذیر انجام می‌شود (Dubey, 2009; Ghosh, 2009; Toohey et al., 2007; White et al., 2001; Zwaag, 2008).

- یک فضای چسبنده در ماتریس بعد از مصرف رزین ترمیم ایجاد می‌شود.

۷-۲-۲- خودترمیمی بر پایه شبکه‌های مجرادر

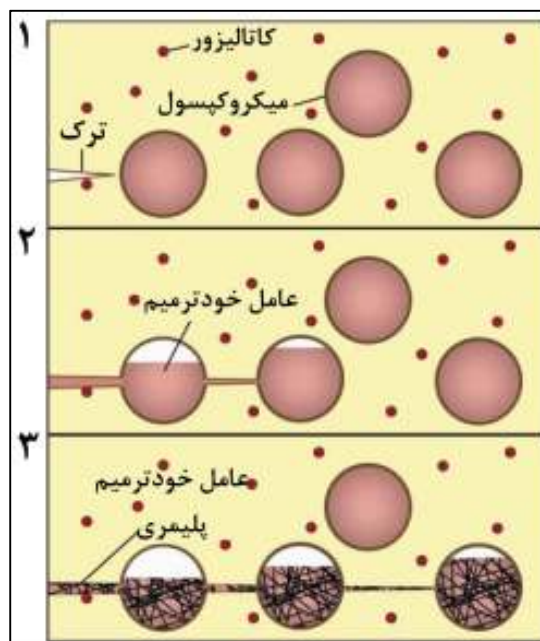
یک سیستم خودترمیمی جدید که شبیه سیستم مویرگی در پوست است توسط گروه سوتز وایت در دانشگاه ایلینویز توسعه داده شد. این سیستم متشکل از شبکه‌هایی از الیاف با کانال‌های توخالی هستند که در سه بعد به هم متصل شده‌اند و عامل ترمیم را در خود ذخیره کرده‌اند. پس از ایجاد شکاف در ماتریس پلیمری، عامل ترمیم از شبکه‌های مجرادر آزاد شده و فرآیند ترمیم انجام می‌شود (Blaiszik et al., 2010). شکل ۱۲ نمایشی از شبکه‌های مویرگی است.



شکل ۱۲ شبکه مجرادر که مواد ترمیم را در خود حفظ می‌کند (Blaiszik et al., 2010)

۷-۳- خودترمیمی ذاتی

این نوع از خودترمیمی، شامل روش‌هایی هستند که به‌طور ذاتی خاصیت خودترمیم‌کنندگی دارند و عمل خودترمیمی در آن‌ها با استفاده از عوامل خارجی مانند نور، حرارت یا فشار انجام می‌شود. بدون استفاده از این عوامل خارجی نمی‌توان به خاصیت خودترمیمی دست یافت. هرکدام از این روش‌ها در مکانیسم مورد استفاده با دیگری فرق دارد. با توجه به روش مورد استفاده حجم آسیب مورد ترمیم، تکرارپذیری فرآیند ترمیم و میزان بازده حاصل نیز متفاوت خواهد بود. مواد با خاصیت خودترمیمی ذاتی در سه طرح اصلی در شکل ۱۳ نشان داده شده‌اند (Blaiszik et al., 2010):



شکل ۱۱ نحوه ترمیم خودکار سیستم میکروکپسول (Qiu, 2012; White et al., 2001)

تاکنون تحقیقات بسیاری بر روی بهینه‌سازی سیستم خودترمیمی این میکروکپسول‌ها انجام گرفته است. تمرکز این تحقیقات عمدتاً بر روی بهینه‌سازی اندازه کپسول، شکل، مصالح پوسته، عامل ترمیم و کاتالیزور واقع گردیده است. میکروکپسول‌های بزرگ‌تر ($< 350 \mu m$) نسبت به میکروکپسول‌های کوچک‌تر با همان درصد وزنی دارای عملکرد بهتری می‌باشند.

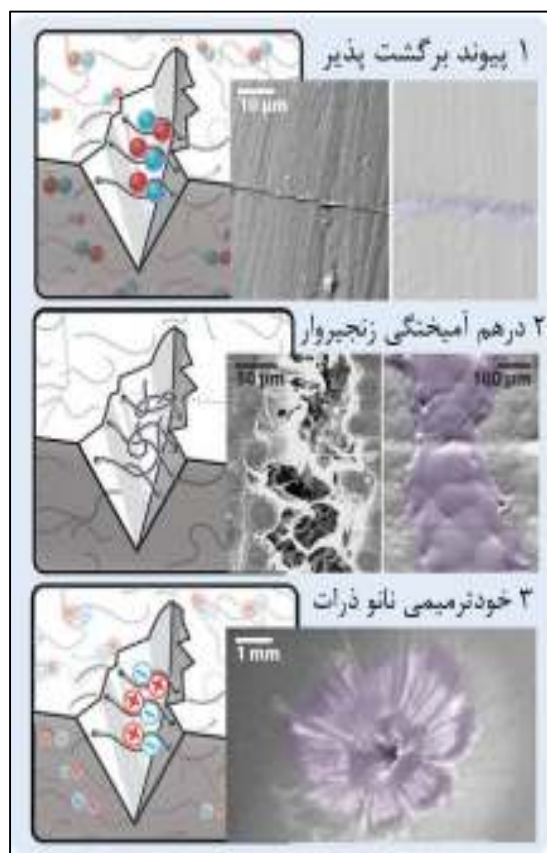
سیستم میکروکپسول نیز مانند دیگر سیستم‌ها مزایا و معایب خاص خود را دارد:

-مزایای سیستم میکروکپسول

- برای ترمیم سیستم‌های منحصراً رزین مناسب است.
- بازگشت مقاومت خوبی در سیستم‌های رزین خودترمیم (و نه سیستم کامپوزیت) گزارش شده است.
- معایب سیستم میکروکپسول
- شکستن میکروکپسول‌ها برای آزادسازی رزین ضروری است.
- میکروکپسول‌های رزین می‌بایست کاتالیزور را احاطه کنند.
- پراکندگی مناسب کاتالیزور و میکروکپسول‌ها برای ترمیم ضروری است.
- مخزن رزین برای ترمیم خرابی محدود است.

۲. رویکرد درگیری زنجیره‌ها که در سطوح ترک حرکت می‌کنند تا زنجیره‌ها در دهانه ترک درگیر شوند.
 ۳. ترمیم غیر کووالانسی که وابسته به پیوند هیدروژنی برگشت‌پذیر و یا گروه‌های یونی آویزان بر روی زنجیر اصلی ماتریس بوده است.

۱. طرح پیوند برگشت‌پذیر که با استفاده از طبیعت برگشت‌پذیر بودن برخی واکنش‌های شیمیایی، برای کاربردهای خودترمیمی مناسب است، مثل واکنش‌های دیلز-آلدر مانند سیکلو پنتا دی ان حلقوی واکنش بین یک دی ان مزدوج و یک دی ان دوست.



شکل ۱۳ مواد خودترمیم شونده با عوامل درونی (Blaiszik et al., 2010)

۸- روش‌های انجام آزمایش ترمیم

سیکل بارگذاری با یک سیکل استراحت همراه است یا از یک بارگذاری چرخه‌ای تحت کنترل تنش یا کرنش با نسبت‌های متفاوت از دوره استراحت به بارگذاری تشکیل شده است.

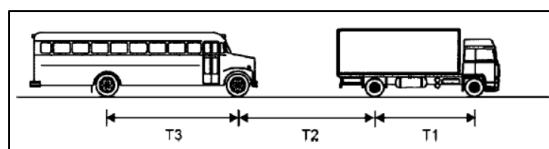
جهت بررسی تأثیر پدیده ترمیم در شاخص‌های مورد مطالعه، بارگذاری همراه با زمان‌های استراحت انجام می‌شود. چندین دسته‌بندی و روش جهت انجام آزمایش ترمیم وجود دارد که در جدول ۲ به آن اشاره شده است.

نوعی از آزمایش ترمیم که به سبک گسیختگی است در شکل ۱۴ نشان داده شده است. در نوع الف از آزمایش ترمیم، بارگذاری تکراری پیوسته شبیه به آزمایش خستگی رایج انجام می‌شود، با این تفاوت زمانی در بین بارگذاری پیوسته، بارگذاری متوقف می‌شود. در نوع ب از شکل ۱۴ هر

جدول ۲ دسته‌بندی آزمایش‌های خودترمیمی

شاخص	روش ترمیم	روش بارگذاری	روش آزمایش
طول شکست	۴ ساعت در ۲۰-۲۲ درجه سانتی‌گراد	۵ سانتی‌متر بر دقیقه در ۵ درجه سانتی‌گراد	آزمایش شکل‌پذیری
مدول کل تنش برشی	۲۰۰ دقیقه در ۲۰ درجه سانتی‌گراد	روش نمونه دو بخشی ^{۱۷} با سطح کرنش ۰/۰۰۶۲۵ درصد در فرکانس ۱۰ هرتز در ۲۵ درجه سانتی‌گراد	آزمایش رئومتر برش دینامیکی
مقاومت کششی	۳، ۶، ۲۰ و ۴۸ ساعت در دمای ۲۲ درجه سانتی‌گراد	۱۰ میلی‌متر بر دقیقه در ۰ درجه سانتی‌گراد	آزمایش کشش مستقیم با نمونه‌های استاندارد
مقاومت کششی	۳، ۶ و ۲۴ ساعت در ۲۰ درجه سانتی‌گراد	۱۰ میلی‌متر بر دقیقه و ۱۰۰ میلی‌متر بر دقیقه در ۰ درجه سانتی‌گراد	آزمایش کشش مستقیم با نمونه‌های اصلاح شده

نوع اول از آزمایش‌های ترمیم که سبک خستگی است، انعکاس واقع‌گرایانه‌تری از تاریخچه بارگذاری روسازی است، چراکه در روسازی واقعی یک دوره استراحت بین اعمال بار از محورهای متوالی از وسایل نقلیه عبوری وجود دارد. شکل ۱۶ زمان استراحت بین محورهای عبوری را نشان می‌دهد.

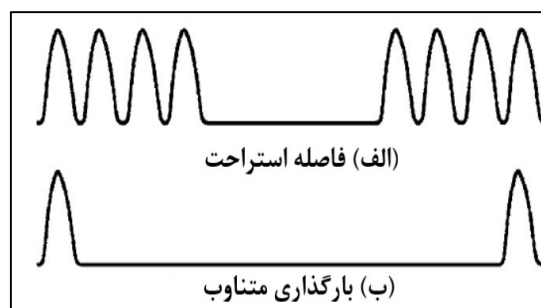


شکل ۱۶ وسایل نقلیه عبوری از روسازی راه و زمان استراحت بین محورها (Castro and Sánchez, 2006)

۹- روش‌های اندازه‌گیری خود ترمیمی

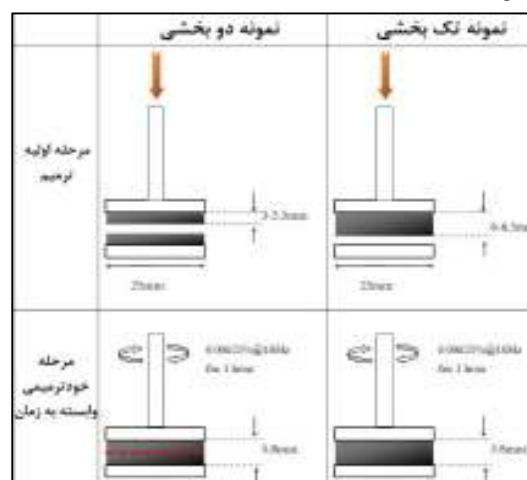
رویکردهای متفاوت توسط محققین برای اندازه‌گیری خود ترمیمی در انواع مختلف قیر، ماستیک قیر و مخلوط ارائه شده است. اگرچه مشاهدات نشان داده است که نحوه گسیختگی در مخلوط‌های آسفالتی به شکل از میان رفتن چسبندگی سطوح سنگدانه و قیر نیز اتفاق می‌افتد اما با توجه به اینکه ترک‌ها غالباً در ماستیک قیری ایجاد شده و گسترش می‌یابند بیشتر مطالعات بر مبنای گسیختگی پیوستگی صورت گرفته است (Santagata et al., 2009).

خود ترمیمی عموماً با استفاده از دو الگوی بارگذاری قابل اندازه‌گیری است. در روش اول بارگذاری سیکلیک در دو حالت تنش و یا کرنش کنترل شده شامل ترکیب‌های مختلفی از زمان‌های استراحت و بارگذاری بر نمونه اعمال



شکل ۱۴ نحوه بارگذاری با دوره‌های استراحت معین (Castro and Sánchez, 2006)

در مورد آزمایش ترمیم به سبک گسیختگی، دوره‌های ترمیم بین دو آزمایش گسیختگی اعمال می‌شود. آزمایش ترمیم دو بخشی نیز به منظور شبیه‌سازی فرآیند ترمیم در سطح ترک‌خورده انجام می‌گیرد. این آزمایش در شکل ۱۵ شکل ۱۵ نشان داده شده است.



شکل ۱۵ آزمایش ترمیم دو بخشی (Qiu, 2012)

۹-۲- شاخص خودترمیمی با استفاده از آزمایش‌های

خستگی خمش دونقطه‌ای، سه نقطه‌ای و چهار نقطه‌ای

شاخص خودترمیمی در رابطه با افزایش سختی کاذب: مشاهدات نشان داد که با افزایش تعداد چرخه‌ها و سیکل‌های بارگذاری، میزان سختی کاذب کاهش می‌یابد که این امر بیانگر تشکیل خرابی‌های کوچک در طی تست خستگی است که در رابطه ۲ نشان داده شده است:

$$HI = \frac{\phi_{After} - \phi_{Before}}{\phi_{Before}} \quad (2)$$

HI: شاخص خودترمیمی

ϕ_{After} : سختی کاذب پس از دوره استراحت

ϕ_{Before} : سختی کاذب قبل از دوره استراحت

۹-۳- شاخص خودترمیمی در رابطه با تعداد سیکل‌های

بارگذاری

آزمایشات نشان داد که با افزایش تعداد سیکل‌های بارگذاری خودترمیمی کاهش پیدا می‌کند که در رابطه **Error!** **Reference source not found.** ۳ نشان داده شده

است:

$$HI = \frac{N_C - N_B}{N_C} \quad (3)$$

HI: شاخص عمر خستگی افزایش یافته

N_C : تعداد سیکل‌ها قبل از اعمال دوره استراحت

N_B : تعداد سیکل‌ها پس از القای دوره استراحت

۹-۴- رویکرد استفاده از مفهوم RDEC^{۱۸}

پدیده خودترمیمی در نگاه اول به فرآیند بازگشت خرابی بین سیکل‌های بارگذاری و بسته شدن ریزترک‌ها اطلاق می‌شد اما در حقیقت خودترمیمی واکنشی فیزیکی-شیمیایی است که علاوه بر زمان استراحت به‌طور پیوسته با گسترش خرابی در اثر اعمال بار نیز می‌تواند اتفاق بیفتد. رفتار خستگی مواد ویسکوالاستیک از طریق تعادل انرژی بین انرژی سطح و انرژی مستهلک شده قابل توصیف است. این مورد در رابطه توضیح داده شده است.

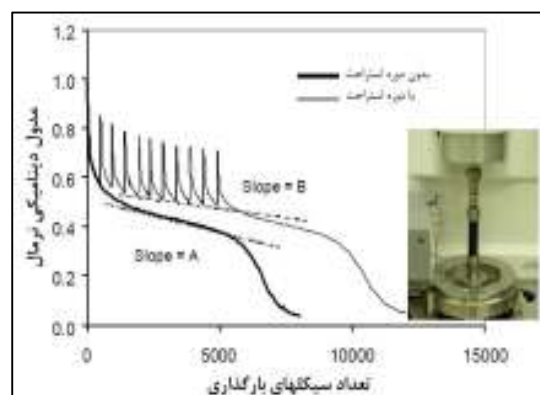
$$Healing Potential = SE - DE \quad (4)$$

SE: انرژی سطح

شده و در نهایت بهبود پارامترهای خستگی در اثر اعمال این نحوه بارگذاری ارزیابی می‌شود. این روش اصطلاحاً بارگذاری متناوب خوانده می‌شود. در روش دوم یک زمان استراحت طولانی بین دو آزمایش خستگی اعمال شده و افزایش عمر خستگی و میزان بازگشت مدول برشی در اثر این استراحت اندازه‌گیری می‌شود. به این روش، روش بازبازی مدول گفته می‌شود (Castro and Sánchez, 2006; Liu et al., 2012; Qiu et al., 2011).

۹-۱- رویکرد استفاده از دستگاه تحلیلگر مکانیکی پویا^{۱۸}

تحلیلگر مکانیکی پویا برای اندازه‌گیری مشخصات ترک‌های خستگی ماتریس ریزدانه‌ها (عبوری از الک ۱۶ #) و قیر مورد استفاده قرار گرفته است. با اندازه‌گیری افزایش عمر خستگی مخلوط در اثر اعمال ۱۰ زمان استراحت ۲ دقیقه‌ای خودترمیمی ارزیابی می‌شود. تأثیر خودترمیمی زمانی چشمگیرتر خواهد بود که زمان استراحت قبل از ایجاد خرابی عمده در مصالح بر آن اعمال شود (Castro and Sánchez, 2006). این موضوع در شکل ۱۷ نشان داده شده است.



شکل ۱۷ تأثیر خودترمیمی پس از ایجاد خرابی در زمان

استراحت (Qiu, 2012)

شاخص خودترمیمی در این رویکرد از رابطه ۱، بدست

می‌آید:

$$HI = \frac{A - B}{A} \quad (1)$$

در این رابطه A و B به ترتیب برابر قدر مطلق شیب

(سرعت ریزترک) به همراه و بدون زمان استراحت است.

DE: انرژی مستهلک شده

$$P_{Ductility} = \frac{L_{Healed}}{L_{Original}} \times 100 \quad (5)$$

L_{Healed} : طول نمونه ترمیم شده در لحظه گسیختگی

$L_{Original}$: طول نمونه پایه در لحظه گسیختگی

$P_{Ductility}$: درصد خودترمیمی آزمایش کشسانی

۹-۶- رویکرد استفاده از آزمایش شبیه‌ساز فرآیند ترمیم

(رئومتر برش دینامیکی):

در این روش آزمایش با اعمال یک نیروی ثابت ۰٫۴ نیوتونی و فرکانس ۱۰ رادیان بر ثانیه، کرنش ثابت ۰٫۰۰۶۲۵٪ و فاصله صفحات ۵ میلی‌متری دو نمونه قیری که یکی به صفحه بالایی و دیگری به صفحه پایینی متصل‌اند، در اتصال با هم قرار گرفته و نتایج با حالت آزمایش، بر یک ضخامت برابر با مجموع ضخامت‌های دو تکه نمونه دارد، مقایسه می‌شود. این موضوع پیش‌تر در شکل ۱۵ نشان داده شده است. شاخص خودترمیم در این روش از رابطه ۶ به دست می‌آید:

$$H_{DSR} = \frac{M_{Healed}}{M_{Original}} \times 100 \quad (6)$$

H_{DSR} : شاخص خودترمیمی آزمایش رئومتر برش دینامیکی

M_{Healed} : مدول برشی نمونه ترمیم یافته و تشکیل شده از دو قسمت

$M_{Original}$: مدول برشی نمونه اصلی و تشکیل شده از یک قسمت

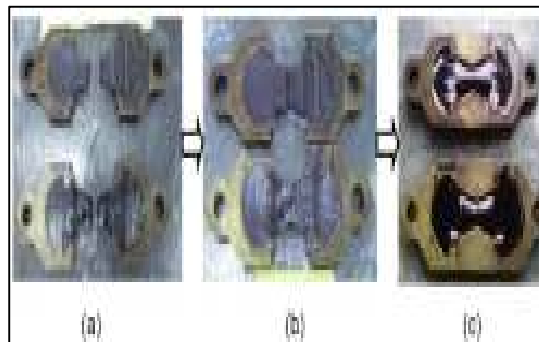
۱۰- مروری بر کارهای انجام شده

نیومن تحقیقاتی را با استفاده از روش تیرچه خمشی بر روی مخلوط‌های آسفالتی اصلاح شده با ۵ درصد خرده لاستیک اصلاح شده^{۲۰} (MCR)، ۳ و ۵ درصد از لاتکس لاستیکی بوتادین استایرن^{۲۱} (SBR)، پلیمر استایرن بوتادین استایرن^{۲۲} (SBS) و پلیمر استایرن بوتادین (SB) و مقادیری از پلیمر استایرن بوتادین استایرن اصلاح شده (MSBS) انجام داد. از جمله نتایجی که بدست آورد، این بود که مخلوط‌های اصلاح شده با SB و SBR در سطوح بالای بارگذاری (بارهای محوری سنگین) و نیز MSBS، مقاومت خستگی مخلوط‌های آسفالتی را به‌طور قابل توجهی افزایش

اگر مقدار انرژی سطح از انرژی مستهلک شده کوچکتر باشد (خود ترمیمی منفی) مصالح تمایل به افزایش انرژی سطح از طریق ایجاد سطوح بیشتر دارد که این فرآیند منجر به ایجاد ترک و توزیع خرابی خواهد شد. از سوی دیگر اگر خود ترمیمی مثبت باشد مصالح به کاهش سطوح که همان بسته شدن ترک از طریق خود ترمیمی است تمایل پیدا خواهند کرد (Carpenter and Shen, 2006).

۹-۵- رویکرد استفاده از آزمایش شکل‌پذیری

در پژوهشی دیگر آزمایش کشسانی خود ترمیمی بر نمونه‌های دوتکه شده انجام شد که در آن نمونه‌های استاندارد استاندارد توسط چاقو به دو نیم تقسیم شده و به مدت ۱۰ ثانیه توسط نیروی دست و در تماس با یکدیگر قرار گرفتند. این نمونه به مدت ۴ ساعت درون قالب در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد ترمیم یافته سپس در دمای ۵ درجه سانتی‌گراد و سرعت ۵ سانتی‌متر بر دقیقه مورد آزمایش کشسانی قرار گرفتند. درصد خودترمیم نمونه‌های قیری از محاسبه نسبت طول گسیختگی نمونه‌های ترمیم یافته به طول گسیختگی نمونه‌های استاندارد محاسبه می‌شود. به‌طور مشابه نمونه‌های استاندارد آزمایش کشش مستقیم در دمای ۵ درجه سانتی‌گراد برش داده شده و با استفاده از نیروی دست مجدداً در کنار هم قرار گرفتند. این نمونه‌ها طی مدت زمان‌های ۳، ۶، ۲۰ و ۴۸ ساعت در دمای اتاق ترمیم یافته و در دمای صفر درجه سانتی‌گراد و سرعت بارگذاری ۱۰ میلی‌متر بر دقیقه آزمایش شدند. این حالات در شکل ۱۸ نشان داده شده است.



شکل ۱۸ روند انجام آزمایش ترمیم توسط آزمایش شکل‌پذیری

در این حالت درصد خود ترمیمی نمونه‌های اصلاح شده بر اساس رابطه ۵ تعریف می‌شود (Qiu, 2008b).

کیم و همکارانش در سال ۱۹۹۰ مطالعه ترمیم را با استفاده از میکروسکوپ الکترونی و بر روی قیرهای AC-50 و AC-20 و همچنین قیر اصلاح شده AC-5 با پلیمر SBR انجام دادند. نتایج آن‌ها نشان داد که زمان ترمیم و گرانیروی قیر دو عامل مهم در ترمیم هستند. به دلیل ناسازگاری پلیمر SBR و قیر AC-5، این دو به صورت یک سیستم دو فاز عمل کرده و شکست آن‌ها به صورت ورقه‌ای اتفاق می‌افتد. دو تحقیقات آن‌ها نشان داد، با وجود رسوخ زیاد اولیه قیرهای با گرانیروی کم، سطح چسبندگی سازه‌ای آن‌ها بعد از تکامل ترمیم کم است. در مورد قیر اصلاح شده AC-5 با SBR بررسی‌ها حکایت از آن دارد که در دمای ۲۰ درجه سانتی‌گراد و در زمان ترمیم، فاز قیر تمایل به ترمیم دارد ولی در بخش پلیمری به دلیل جامد بودن در طول زمان ترمیم، هیچ‌گونه تغییری رخ نمی‌دهد (Y. R. Kim, Little, and Burghardt, 1991).

به‌طور کلی، تأثیر اصلاح‌کننده‌ها بر قابلیت خودترمیمی مصالح آسفالتی، خیلی پراکنده گزارش شده است. باهیا دو قیر اصلاح نشده، دو قیر اصلاح شده با پلاستومر، دو قیر اصلاح شده با الاستومر و دو قیر اصلاح شده با اکسیژن (اکسید شده) را آزمایش کرد. او استنتاج نمود که چسبنده قیری اصلاح شده یک پتانسیل ترمیم بهتری را نسبت به قیر اصلی نشان می‌دهد. نتایج نشان داد که تکنولوژی اصلاح می‌تواند عملکرد ترمیم را تغییر دهد (Bahia et al., 1999). کارپنتر و شن گزارش کردند نرخ ترمیم / برگشت چسبنده‌های قیر اصلاح شده با پلیمر PG 70-22 به‌طور موثری بهتر از چسبنده قیر خالص PG 64-22 است (Carpenter and Shen, 2006). هرچند ارزیابی کیم و روکو در سال ۲۰۰۶، بر اثر اصلاح‌کننده SBS بر خواص ترمیم و ترک‌خوردگی نشان داد که اصلاح‌کننده SBS یک اثر نسبتاً کوچک بر نرخ ترمیم مخلوط‌های آسفالتی دارد (B. Kim and Roque, 2006). کیم و همکاران در سال ۲۰۱۱ با انجام آزمایش کشش مستقیم بر روی مخلوط‌های آسفالتی با استخوان‌بندی سنگدانه‌ای، نتیجه گرفتند که در مرحله ترک‌های کوچک، قیر ماستیک اصلاح شده با پلیمر SBS بازیابی مقاومت بهتری را نسبت به قیر ماستیک استاندارد نشان می‌دهد، اما در مرحله ترک‌های بزرگ این قیر ماستیک استاندارد است که قابلیت بازیابی بیشتر مقاومت را

می‌دهند. نیومن این افزایش عمر خستگی را ناشی از عوامل متعددی از قبیل وجود رشته‌های پلیمر پخش شده در قیر که همانند یک شبکه زنجیر مانند عمل می‌کنند و نرخ بالای چسبندگی قیر - سنگدانه در مخلوط‌های آسفالتی اصلاح شده با پلیمرها می‌داند. البته به عقیده او، پلیمر SBS باعث کاهش قابلیت ترمیم در مخلوط آسفالتی می‌گردد و این در حالی است که این پلیمر مقاومت خستگی را در مخلوط‌های آسفالتی افزایش داده و ترک‌خوردگی را به تعویق می‌اندازد (Newman, 2004). در تحقیقی از لیتل و همکارانش گزارش شد که افزودن پلیمرهایی نظیر SBS می‌تواند به صورت فیلر عمل کرده و توانایی قیر خالص را جهت ایجاد تماس دوباره و ترمیم کاهش دهد. او استنتاج کرد که افزودن SBS و پلی اتیلن با دانسیته پایین (LDPE) به‌عنوان یک سیستم فیلر عمل کرده تا جایی که توانایی متوقف ساختن ترمیم قیر خالص دارد. تفسیر اثر منفی افزودن پلیمر بر ترمیم ممکن است متکی به اثر پلیمر بر ساخت ترکیب‌بندی قیر باشد. شبکه‌های پلیمر در قیر توسط قیر حجیم می‌شوند که جذب اجزاء سازگار قیر توسط پلیمر، علت آن تورم است. قیر با یک غلظت آسفالتین بالاتر احتمال کمتری برای روانی و ترمیم دارد. لیتل و همکارانش همچنین اثر احتمالی آهک هیدراته (HL) را بر قابلیت ترمیم قیر تشریح کردند. افزودن HL به یک قیر با آروماتیک بالا با یک اجزاء خیلی کم از آسفالتین، کم شدن ظرفیت ترمیم را نشان داد (Little et al., 1998). روکو و همکارانش در سال ۲۰۰۴، نیز نظریه لیتل را تأیید کردند. او نیز در تحقیق که با استفاده از آزمایش کشش غیر مستقیم و رویکرد DCSE^{۲۴} انجام داد، مشاهده کرد SBS بر ترمیم تأثیری ندارد (Roque et al., 2004). با این وجود محققین دانشگاه ایلینویز که با رویکرد RDEC این موضوع را مورد مطالعه قرار داده‌اند، نظری کاملاً متفاوت دارند. نتایج آن‌ها نشان می‌دهد که پلیمر SBS تأثیری مثبت بر ترمیم دارد (Shen and Carpenter, 2006). در تحقیقات شن و همکارانش در سال ۲۰۱۰ با استفاده از آزمایش DSR و رویکرد RDEC نشان داده شد که پلیمر SBS بر ترمیم تأثیرگذار است و این تحقیق یافته‌های گذشته او را که برای مخلوط بدست آورده بود، تأیید می‌کرد (Shen, Chiu, and Huang, 2010).

۱۱- نتیجه‌گیری

در هر زیرساختی ناگزیر در ابتدا ترک‌های بسیار ریزی پدید می‌آید که تحت بارگذاری در طی زمان، رشد نموده و باعث ایجاد خرابی می‌گردد. حال اگر بتوان از مصالحی در ساخت این تسهیلات و زیرساخت‌ها استفاده نمود که بتواند به‌صورت بالقوه این ترک‌ها را ترمیم کرده و از رشد آن‌ها جلوگیری کند، هزینه‌های تعمیر و بازدیدهای دوره‌ای بسیار کاهش خواهد یافت. به‌طور خاص، خودترمیمی یکی از پدیده‌هایی است که می‌تواند منجر به ارزیابی خواص مصالح قیری شود. منظور از خودترمیمی، توانایی بازیابی مشخصات مکانیکی از قبیل سختی و مقاومت ازدست‌رفته و نیز بازگشت جابجایی حاصل از بازشدگی ترک‌ها، در طی دوره استراحت و دمای بالا، است. ایده خودترمیمی الهام گرفته از پدیده‌های طبیعی بوده و مکانیسم دیده شده در آن نیز تقریباً مشابه موارد طبیعی است. براساس آنچه در قسمت‌های قبل بیان گردید، مشخص شد که پدیده خستگی و ترمیم در مصالح قیری حدود ۵۰ سال است که توسط محققین مورد بررسی قرار گرفته است. با آگاهی از عوامل مؤثر بر قابلیت خودترمیمی می‌توان از روش‌ها و افزودنی‌هایی جهت بهبود آن در مخلوط‌های آسفالتی، استفاده نمود. از مهم‌ترین مواد مطرح جهت افزایش قابلیت خودترمیمی مخلوط‌های آسفالتی می‌توان به استفاده از ذرات رسانا در مخلوط آسفالتی اشاره کرد؛ اما به‌طور کلی می‌توان گفت به‌کارگیری هر نوع افزودنی و مصالحی که بتواند بر عملکرد خستگی ماستیک و چسبنده قیری تأثیر مثبتی ایجاد نماید، سبب بهبود روند خودترمیمی هم خواهد شد. به‌طور خلاصه نتایج بررسی‌ها نشان داده است، عملکرد خودترمیمی مخلوط آسفالتی تا حد زیادی به پتانسیل خودترمیمی چسبنده قیری و ماستیک آسفالتی بستگی داشته و سبک‌های مختلفی از آزمایش‌ها برای کمی کردن خودترمیمی استفاده می‌شود. با این حال، همچنان یک روش آزمایش استاندارد و معیار مشخصی برای برآورد خودترمیمی وجود ندارد.

۱۲- پی‌نوشت‌ها

1. Self-Healing Asphalt
2. Stiffness
3. Strength

از خود نشان می‌دهد (Qiu, 2012). نوشتاش با انجام آزمایش خستگی تک محوری بر روی مخلوط آسفالتی حاوی پلیمر SBS نشان داد، این افزودنی در هر دو رویکرد RDEC و CDPSE²⁸ اثر منفی بر ترمیم دارد (نوشتاش، ۱۳۹۰). شفیعی تأثیر مثبت نانو رس، را در قابلیت خودترمیمی قیر گزارش کرد. او نشان داد ۷ درصد نانو رس در مقابل درصدهای پائین آن (نظیر ۱ درصد) تأثیر قابل ملاحظه‌تری بر رفتار خودترمیمی قیر دارد (شفیعی، ۱۳۹۰). صیادی نشان داد استفاده از گرد کوره قوس الکتریکی به‌عنوان فیلر در قیر، عملکرد خوبی در بهبود عمر خستگی و رفتار خودترمیمی ماستیک از خود نشان می‌دهد (صیادی، ۱۳۹۳). مطالعات گنجه‌ای و همکارانش نشان داد نوع فیلر تأثیر کمی بر میزان خودترمیمی دارد ولی در عین حل بهترین فیلر، فیلر گرانیبی و ضعیف‌ترین فیلر، فیلر سیمانی و فیلر آهکی بین آن دو است (گنجه‌ای، افلاکی و مقدس‌نژاد، ۱۳۹۲). یکی از موثرترین روش‌ها برای ازتقاء پتانسیل خودترمیمی، که در چند سال اخیر مورد توجه قرار گرفته، استفاده از میکروکپسول‌های حاوی جوان‌کننده است که البته در بررسی چند ماده جوان‌کننده، این نتیجه حاصل شد که علاوه بر مضر بودن این مواد برای محیط‌زیست، حداکثر عمق نفوذ آن‌ها در بتن آسفالتی دو سانتی‌متر بوده و نیز استفاده از آن باعث کاهش اصطکاک روسازی و مشکلات ایمنی می‌گردد (Su, Qiu, and Schlangen, 2013). از اینروست که توجه عمده‌ای بر رسانا کردن روسازی جهت بهبود پتانسیل خودترمیمی شده است.

ذرات رسانایی مانند فیبر و فیلر رسانا، حساسیت حرارتی مخلوط را افزایش می‌دهند و در فرآیند القای گرما، به‌صورت گرم‌کننده‌های موضعی عمل می‌کنند (Gallego, del Val, Contreras, and Páez, 2013). در مورد ترکیب و استفاده از فیبر و فیلر رسانا به‌طور هم‌زمان در مخلوط، باید گفت که توانایی فیلرها در ایجاد رسانایی به اندازه فیبرها نیست ولی به دلیل این که مقاومت گرمایی آن‌ها در مقایسه با فیبرها بیشتر است، بهتر می‌توانند دمای خود را در یک سطح مناسب حفظ کنند (García, Schlangen, van de Ven, and van Vliet, 2011).

تبریز، دانشگاه تبریز.

- نوتاش، م.، (۱۳۹۰)، "بررسی آزمایشگاهی بهبود رفتار خستگی مخلوط‌های آسفالتی با در نظر گرفتن مکانیسم خودترمیمی ترک"، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی امیر کبیر.

-Ameri, M., Mansourian, A., Ashani, S. S., and Yadollahi, G., (2011), "Technical study on the Iranian Gilsonite as an additive for modification of asphalt binders used in pavement construction", *Construction and Building Materials*, 25(3), 1379-1387. doi:10.1016/j.conbuildmat.2010.09.005.

-Ameri, M., Shokrgozar, M., and Dehshiri, M. A., (2014), "Investigating the processes of asphalt mixture self-healing", Paper presented at the 6th Iran National Conference on Asphalt and Asphalt Mixtures, Iran, Tehran.

-Araujo, M. S., Leite, L., Pasa, V., and Lins, V., (2014), "Rheological and thermal behavior of weathering-aged polymer modified bitumen", *Brazilian Journal of Petroleum and Gas*, 7(4).

-Bahia, H. U., Hanson, D., Zeng, M., Zhai, H., Khatri, M., and Anderson, R., (2001), "Characterization of modified asphalt binders in superpave mix design".

-Bahia, H. U., Zhai, H., Bonnetti, K., and Kose, S., (1999), "Non-linear viscoelastic and fatigue properties of asphalt binders", *Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists*, 68, pp.1-34.

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

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

-Blaiszik, B. J., Kramer, S. L., Olugebefola, S. C., Moore, J. S., Sottos, N. R., and White, S. R., (2010), "Self-healing polymers and composites", *Annual review of materials research*, 40, pp.179-211.

-Butt, A. A., Birgisson, B., and Kringos, N., (2012), "Optimizing the highway lifetime by improving the self healing capacity of asphalt", Paper presented at the Conference on Transport Research Arena Location: Athens, Greece Date: APR 23-26, pp.2012.

4. Crack Opening Displacement
5. DSR
6. Storage Recuperation
7. Intermittent Loading
8. Accelerated Loading Facility
9. Cohesive
10. Adhesive
11. Rearrangement
12. Approach
13. Wetting
14. Diffusion
15. Randomization
16. Healing Ratio
17. Two-piece specimen
18. Dynamic Mechanical Analysis
19. Ratio of Dissipated Energy Change
20. Modified Experimental Crumb Rubber
21. Styrene-Butadiene Rubber
22. Styrene-Butadiene-Rtyrene
23. Low Density Polyethylene
24. Dissipated Creep Strain Energy
25. Characteristic Dissipated Pseudo Strain Energy

۱۳- مراجع

-ابطحی، س. م.، گلی، ا. و دیباجی، س. ح. ا.، (۱۳۹۰)، "اصلاح و نگهداری قیر"، انتشارات مؤسسه علمی دانش پژوهان برین.

-شفیعی، م. ح.، (۱۳۹۰)، "بررسی تأثیر نانو ذرات بر خاصیت خودترمیمی قیر"، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شریف.

-صیادی، م.، (۱۳۹۳)، "ارزیابی عملکرد چسباننده قیری خودترمیم حاوی فیلر معدنی و مواد افزودنی"، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل.

-گلستانی، ب.، (۱۳۹۰)، "بررسی عملی تاثیر افزونه های پلیمری شاخص بر خواص قیرهای کشور با توجه به شرایط آب و هوایی کشور"، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه علوم و تحقیقات تهران.

-گنجه‌ای، م. ا.، افلاکی، ا.، و مقدس‌نژاد، ف.، (۱۳۹۲)، "تأثیر پارامترهای مؤثر بر خودترمیمی مخلوط آسفالتی با استفاده از روش تاگوچی"، دهمین کنگره بین المللی مهندسی عمران.

- Kennedy, T. W., Huber, G. A., Harrigan, E. T., Cominsky, R. J., Hughes, C. S., Von Quintus, H., and Moulthrop, J. S., (1994), "Superior performing asphalt pavements (Superpave): The product of the SHRP asphalt research program", National Research Council.
- Kim, B., and Roque, R., (2006), "Evaluation of healing property of asphalt mixtures", Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board(1970), pp.84-91.
- Kim, Y. R., Little, D. N., and Burghardt, R., (1991), "SEM analysis on fracture and healing of sand-asphalt mixtures", Journal of Materials in Civil Engineering, 3(2), pp.140-153.
- Lavin, P., (2014), "Asphalt pavements: a practical guide to design, production and maintenance for engineers and architects", CRC Press.
- Lesueur, D., (2009), "The colloidal structure of bitumen: Consequences on the rheology and on the mechanisms of bitumen modification", Advances in colloid and interface science, 145(1-2), pp.42-82.
- Little, D. N., Lytton, R. L., Chairl, B., Williams, D., and ITexas, A., (1998), "An Analysis of the Mechanism of Microdamage Healing Based on the Application of Micromechanics First Principles of Fracture and Healing.
- Liu, Q., Schlangen, E., van de Ven, M., van Bochove, G., and van Montfort, J., (2012), "Evaluation of the induction healing effect of porous asphalt concrete through four point bending fatigue test", Construction and Building Materials, 29, pp.403-409.
- Newman, K., (2004), "Polymer-modified asphalt mixtures for heavy-duty pavements: fatigue characteristics as measured by flexural beam testing", Paper presented at the FAA worldwide airport technology transfer conference, Atlantic city, NJ, USA.
- Prager, S., and Tirrell, M., (1981), "The healing process at polymer-polymer interfaces", The journal of chemical physics, 75(10), pp.5194-5198.
- Qiu, J., (2008), "Self healing of asphalt mixes: literature review", Delft University of Technology.
- Qiu, J., (2012). Self healing of asphalt mixtures: towards a better understanding of the mechanism. TU Delft, Delft University of Technology.
- ,Carpenter, S., and Shen, S. (2006), "Dissipated energy approach to study hot-mix asphalt healing in fatigue", Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board(1970), pp.178-185.
- Castro, M., and Sánchez, J. A., (2006), "Fatigue and healing of asphalt mixtures: discriminate analysis of fatigue curves", Journal of Transportation Engineering, 132(2), pp.168-174.
- Cosco, S., Ambrogi, V., Musto, P., and Carfagna, C., (2007), "Properties of poly (urea formaldehyde) microcapsules containing an epoxy resin", Journal of applied polymer science, 105(3), pp.1400-1411.
- Daly, W. H., (2017), "Relationship Between Chemical Makeup of Binders and Engineering Performance".
- Dubey, R. (2009), "Microencapsulation technology and applications", Defence Science Journal, 59(1), pp.82.
- Gallego, J., del Val, M. A., Contreras, V., and Páez, A., (2013), "Heating asphalt mixtures with microwaves to promote self-healing", Construction and Building Materials, 42, pp.1-4.
- García, Á., (2012), "Self-healing of open cracks in asphalt mastic", Fuel, 93, pp.264-272.
- García, Á., Schlangen, E., van de Ven, M., and van Vliet, D., (2011), "Induction heating of mastic containing conductive fibers and fillers", Materials and structures, 44(2), pp.499-508.
- Garcia, S. J., (2014), "Effect of polymer architecture on the intrinsic self-healing character of polymers", European Polymer Journal, 53, pp.118-125.
- Gaskin, J., (2013), "On bitumen microstructure and the effects of crack healing", University of Nottingham.
- Ghosh, S. K., (2009), "Self-healing materials: fundamentals, design strategies, and applications", John Wiley and Sons.
- Grant, T. P., (2001), "Determination of asphalt mixture healing rate using the Superpave indirect tensile test", University of Florida USA.
- Hamed, F. K. M., (2010), "Evaluation of fatigue resistance for modified asphalt concrete mixtures based on dissipated energy concept", Technische Universität Darmstadt.

- Sutharsan, T., (2010), "Quantification of cohesive healing of asphalt binder based on dissipated energy analysis", Washington State University.
- Toohey, K. S., Sottos, N. R., Lewis, J. A., Moore, J. S., and White, S. R., (2007), "Self-healing materials with microvascular networks", *Nature materials*, 6(8), pp.581.
- Tsai, B.-W., Monismith, C., Dunning, M., Gibson, N., D'Angelo, J., Leahy, R., . . . Davis, R., (2005), "Influence of asphalt binder properties on the fatigue performance of asphalt concrete pavements", *Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists*, 74(January), pp.733-789.
- Van de Ven, M., (2012), "The influence of ageing on the fatigue and healing properties of bituminous mortars", *Procedia-Social and Behavioral Sciences*, 53, pp.256-265.
- Van Poel, C. D., (1954), "A general system describing the visco elastic properties of bitumens and its relation to routine test data", *Journal of applied chemistry*, 4(5), pp.221-236.
- White, S. R., Sottos, N., Geubelle, P., Moore, J., Kessler, M. R., Sriram, S., . . . Viswanathan, S., (2001), "Autonomic healing of polymer composites", *Nature*, 409(6822), pp.794.
- Wool, R., and O'connor, K., (1981), "A theory crack healing in polymers", *Journal of Applied Physics*, 52(10), pp.5953-5963.
- Wool, R. P., (1980), "Crack healing in semicrystalline polymers, block copolymers and filled elastomers", In *Adhesion and adsorption of polymers*, pp. 341-362.
- Wool, R. P., (2008), "Self-healing materials: a review", *Soft Matter*, 4(3), pp.400-418.
- Yousefi, A. A., (2004), "Rubber-polyethylene modified bitumens", *Iranian Polymer Journal*, pp.101-112.
- Zwaag, S., (2008), "Self healing materials: an alternative approach to 20 centuries of materials science", Dordrecht: Springer, The Netherlands.
- Qiu, J., Molenaar, A., Van de Ven, M., Wu, S., and Yu, J., (2012), "Investigation of self healing behaviour of asphalt mixes using beam on elastic foundation setup", *Materials and structures*, 45(5), pp.777-791.
- Qiu, J., Van de Ven, M., Wu, S., Yu, J., and Molenaar, A., (2011), "Investigating self healing behaviour of pure bitumen using dynamic shear rheometer", *Fuel*, 90(8), pp.2710-2720.
- Read, J., and Whiteoak, D., (2003), "The shell bitumen handbook", Thomas Telford.
- Roque, R., Birgisson, B., Sangpetngam, B., and Zhang, Z., (2002), "Hot mix asphalt fracture mechanics: a fundamental crack growth law for asphalt mixtures", *Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists*, pp.71.
- Roque, R., Birgisson, B., Tia, M., Kim, B., and Cui, Z., (2004), "Guidelines for use of modifiers in Superpave mixtures: executive summary and volume 1 of 3 volumes: evaluation of SBS modifier", Tallahassee, Florida Department of Transportation .
- Santagata, E., Baglieri, O., Dalmazzo, D. and Tsantilis, L., (2009), "Rheological and chemical investigation on the damage and healing properties of bituminous binders", *Asphalt Paving Technology-Proceedings*, 28, pp.567.
- Shen, S., and Carpenter, S. H., (2006), "Dissipated energy concepts for HMA performance: fatigue and healing", (Vol. 67), Citeseer.
- Shen, S., Chiu, H.-M., and Huang, H., (2010), "Characterization of fatigue and healing in asphalt binders", *Journal of Materials in Civil Engineering*, 22(9), pp.846-852.
- Stimilli, A., Hintz, C., Li, Z., Velasquez, R., and Bahia, H. U., (2012), "Effect of healing on fatigue law parameters of asphalt binders", *Transportation Research Record*, 2293(1), pp.96-105.
- Su, J.-F., Qiu, J., and Schlangen, E., (2013), "Stability investigation of self-healing microcapsules containing rejuvenator for bitumen", *Polymer degradation and stability*, 98(6), pp.1205-1215.

Self-Healing Mechanism in Bitumen and Asphalt Pavement

Mehdi Zalnezhad, Assistant Professor, Highways and Transportation Engineering, Babol Noshirvani University of Technology, Babol, Iran.

Ebrahim Hesami, Assistant Professor, Highways and Transportation Engineering, Babol Noshirvani University of Technology, Babol, Iran.

E-mail: Hesami@KTH.se

Received: September 2020-Accepted: January 2021

ABSTRACT

Roads are considered as the infrastructural and strategic capital of each country. A main part of the budget is allocated to the repair and maintenance of the roads. Any damage to the asphalt pavement will cause disturbance in the performance of the vehicles, which result in reduced driving safety and reduced riding levels. The damages to the asphalt pavement are due to various factors. In general, due to traffic jams, these damages emerge as small cracks in the pavement system, among which fatigue and cracks resulting from are the main causes of failure in the asphalt pavement. In fact, as a result of repeated loading, these small cracks are expanded in the form of fatigue cracking and eventually cause the rupture of the structure of the asphalt pavement. A major part of the annual budget is allocated to the repair and maintenance of the roads and eradicates the damages caused by the cracks. One of the factors that can be effective in increasing the fatigue life of the asphalt pavement is the self-healing potential of bitumen and asphalt. Self-healing means the ability to retrieve mechanical properties such as rigidity and resistance, as well as the return of displacement resulting from the opening of the cracks during the rest period and the high temperature period. In this research, the self-healing phenomenon and the factors affecting it are investigated, and the indices for measuring this asphaltic phenomenon are introduced and the results of the most recent studies are presented.

Keywords: Self Healing, Asphalt Binder, Asphalt Pavement, Bitumen Mastic, Healing Agent