

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشکده عمران

رشته‌ی مهندسی راه و ترابری

پایان‌نامه کارشناسی ارشد

**ارزیابی آزمایشگاهی شاخص خودترمیمی در مخلوط‌های آسفالتی سبز**

نگارنده حسن آذرگهر

استاد راهنما:

دکتر سید علی حسینی

مهر ماه ۱۴۰۰

تقدیم به

پدر و مادر عزیزم که همواره در تمام مراحل زندگی، مشوق و پشتیبان بنده بوده اند.

و به تو

که بی آنکه نامت برده شود سخطه ای تنهایم نگذاشتی

## سپاسگزاری

شکرشایان نثار ایزدمنان که توفیق را رفیق را هم ساخت تا این پایان نامه را به پایان برسانم. از استاد

فاضل و اندیشمند جناب آقای دکتر سید علی حسینی به عنوان استاد راهنما که همواره بخارنده را مورد لطف و

محبت خود قرار داده اند، کمال شکر را دارم. در نهایت مراتب شکر و قدردانی صمیمانه خود را به دوستان و تمام

کسانی که در تهیه این پایان نامه مرایاری نموده اند؛ ابراز می‌کنم.

## تعهدنامه

اینجانب **حسن آذرگهر** دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته مهندسی عمران-راه و ترابری دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه با موضوع **ارزیابی آزمایشگاهی شاخص خودترمیمی در مخلوط‌های آسفالتی سبز** تحت راهنمایی دکتر سید علی حسینی متعهد می‌شوم:

- تحقیقات در این پایان نامه توسط اینجانب انجام شده است و از صحت و اصالت برخوردار است.
- در استفاده از نتایج پژوهش‌های محققان دیگر به مرجع مورد استفاده استناد شده است.
- مطالب مندرج در پایان نامه تاکنون توسط خود یا فرد دیگری برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی در هیچ جا ارائه نشده است.
- کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود است و مقالات مستخرج با نام **دانشگاه صنعتی شاهرود** و یا **Shahrood University of Technology** به چاپ خواهد رسید.
- حقوق معنوی تمام افرادی که در به دست آمدن نتایج اصلی پایان نامه تأثیرگذار بوده‌اند در مقالات مستخرج از پایان نامه رعایت می‌گردد.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که از موجود زنده (یا بافت‌های آن‌ها) استفاده شده است ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که به حوزه اطلاعات شخصی افراد دسترسی یافته یا استفاده شده است اصل رازداری، ضوابط و اصول اخلاق انسانی رعایت شده است.

تاریخ:

امضاء دانشجو

### مالکیت نتایج و حق نشر

- کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات، مستخرج، کتاب، برنامه‌های رایانه ای، نرم افزارها و تجهیزات ساخته شده) متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می‌باشد. این مطلب باید به نحو مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود.
- استفاده از اطلاعات نتایج موجود در پایان نامه بدون ذکر مرجع مجاز نمی‌باشد.

## چکیده

کاهش منابع طبیعی تجدیدناپذیر از جمله مصالح سنگی و آلودگی ناشی از انباشت مصالح دورریز در طبیعت از مهمترین دلایل استفاده از مصالح بازیافتی در ساخت مخلوط‌های آسفالتی سبز هستند. از طرفی دیگر، پدیده خودترمیمی یکی از ویژگی‌های مهم مخلوط‌های آسفالتی است که باعث کاهش هزینه‌های اقتصادی ترمیم و نگهداری و هزینه‌های زیست محیطی تولید مجدد آسفالت می‌شود. در این تحقیق به منظور ساخت مخلوط‌های آسفالتی سبز دوستدار محیط زیست از سرباره فولادی با اندازه ۹/۵-۴/۷۵ میلیمتر به نسبت حجمی ۶۰ درصد مصالح سنگی و پسماند گل قرمز با نسبت های ۵۰ و ۱۰۰ درصد از فیلر به عنوان جایگزین فیلر آهکی استفاده گردیده و شاخص خودترمیمی و حساسیت رطوبتی این مخلوط‌ها مورد ارزیابی قرار گرفته است. به منظور ارزیابی شاخص خودترمیمی، آزمایش خمش ۳ نقطه‌ای بر روی نمونه‌های نیمه استوانه‌ای به صورت ۷ سیکل ترمیم با استفاده از روش گرمادهی امواج ماکروویو انجام گرفته است. نتایج حاکی از آن بود که سرباره و ۵۰ درصد گل قرمز در اولین سیکل ترمیم، مقدار نرخ ترمیم بهینه را نسبت به نمونه شاهد به ترتیب؛ ۵۳/۰۱ و ۳۲/۳۵ درصد افزایش داده‌اند. همچنین به دلیل اهمیت خرابی رطوبتی، آزمایش کشش غیر مستقیم با استاندارد آشتو T283 بر روی نمونه‌های استوانه‌ای انجام گرفت و نتایج نشان داد که میزان مقاومت خرابی رطوبتی در مخلوط‌های حاوی سرباره و ۵۰ درصد گل قرمز نسبت به نمونه شاهد به ترتیب ۱۶ و ۲۱ درصد کاهش داشته است. استفاده از ۵۰ و ۱۰۰ درصد گل کربناته به صورت جایگزین فیلر مصالح آهکی در مخلوط‌های حاوی سرباره مقاومت رطوبتی را به ترتیب ۹ و ۱۳ درصد افزایش داده است. همچنین این ضعف مقاومتی در نمونه شامل ۵۰ درصد گل قرمز به کمک استفاده از ۵۰ درصد گل کربناته جبران گردیده و مقاومت رطوبتی به میزان ۱۲ درصد افزایش یافته است. با بررسی نتایج ضریب مارشال نیز مشخص گردید که سرباره فولادی، ۵۰ درصد گل قرمز و ۵۰ درصد گل کربناته سختی مخلوط آسفالتی را نسبت به نمونه شاهد به ترتیب ۱/۴، ۱/۵۱ و ۰/۰۵ کیلو نیوتن بر میلیمتر افزایش داده‌اند.

**لغات کلیدی:** خودترمیمی، ماکروویو، سرباره فولادی، گل قرمز، گل کربناته، حساسیت رطوبتی

## فهرست مطالب

فصل اول:	۱
۱-۱ مقدمه	۲
۲-۱ بیان مسأله	۳
۳-۱ ضرورت و اهمیت انجام پژوهش	۸
۴-۱ اهداف پژوهش	۹
۵-۱ فرض های پژوهش	۱۰
۶-۱ روش تحقیق	۱۰
۷-۱ نوآوری	۱۱
۸-۱ ساختار پژوهش	۱۲
فصل دوم:	۱۳
۱-۲ مقدمه	۱۴
۲-۲ تاریخچه خودترمیمی	۱۴
۳-۲ قابلیت ترمیم	۱۴
۴-۲ مفهوم ترمیم	۱۵
۵-۲ ترمیم از دیدگاه خستگی	۱۶
۶-۲ برخی مدل های مختلف خودترمیمی	۱۷
۱-۶-۲ مدل ترمیم انتشار مولکولی	۱۷
۲-۶-۲ مدل ترمیم جریان موینگی	۱۸
۷-۲ عوامل تأثیرگذار بر توانایی ترمیم مخلوط های آسفالتی	۱۸

۱۹	..... ۱-۷-۲ خصوصیات قیر
۲۰	..... ۲-۷-۲ دوره استراحت
۲۳	..... ۳-۷-۲ افزودنی ها
۲۸	..... ۴-۷-۲ نوع و سایز سنگدانه ها
۲۹	..... ۵-۷-۲ عرض ترک
۳۲	..... ۶-۷-۲ طول ترک
۳۵	..... ۷-۷-۲ نوع گرمایش
۴۲	..... ۸-۷-۲ میزان حرارت
۴۴	..... ۸-۲ سرباره
۴۴	..... ۱-۸-۲ مقدمه
۴۵	..... ۲-۸-۲ تعریف سرباره
۴۵	..... ۳-۸-۲ انواع سرباره
۴۵	..... ۱-۳-۸-۲ سرباره کوره بلند آهن گدازی
۴۶	..... ۲-۳-۸-۲ سرباره فولادی
۴۷	..... ۴-۸-۲ انواع سرباره های فولادی
۴۷	..... ۱-۴-۸-۲ سرباره کوره قوس الکتریکی
۴۸	..... ۲-۴-۸-۲ سرباره کوره اکسیژن - بازی (کنورتور)
۴۹	..... ۳-۴-۸-۲ کوره شعله ای
۴۹	..... ۵-۸-۲ دلایل مهم کاربرد سرباره فولادی
۵۱	..... ۶-۸-۲ کاربرد های رایج سرباره فولادی
۵۱	..... ۱-۶-۸-۲ ساخت بتن



۵۱	..... ۲-۶-۸-۲ ساخت آسفالت
۵۲	..... ۷-۸-۲ مروری بر کارهای گذشته
۵۲	..... ۱-۷-۸-۲ بررسی برخی از خصوصیات سرباره فولادی
۵۲	..... ۱-۱-۷-۸-۲ مشخصات فیزیکی و مکانیکی
۵۳	..... ۲-۱-۷-۸-۲ خصوصیات شیمیایی
۵۵	..... ۳-۱-۷-۸-۲ ویژگی های حرارتی
۵۵	..... ۲-۷-۸-۲ انواع کاربرد های سرباره فولادی در مخلوط آسفالتی
۵۷	..... ۳-۷-۸-۲ تأثیر سرباره فولادی بر زمینه های عملکردی آسفالت
۵۷	..... ۱-۳-۷-۸-۲ مقاومت اصطکاکی
۵۸	..... ۲-۳-۷-۸-۲ شیارشدگی
۵۹	..... ۳-۳-۷-۸-۲ خستگی
۶۰	..... ۴-۳-۷-۸-۲ حساسیت رطوبتی
۶۲	..... ۹-۲ گل قرمز
۶۲	..... ۱-۹-۲ مقدمه
۶۴	..... ۲-۹-۲ آشنایی با آلومینا و فرآیند تولید آن
۶۶	..... ۳-۹-۲ آشنایی با گل قرمز و میزان تولید آن در جهان
۶۸	..... ۴-۹-۲ مروری بر کارهای انجام شده با گل قرمز
۷۱	..... ۱۰-۲ گل کربناته
۷۱	..... ۱-۱۰-۲ نگاهی به تولید گل کربناته در کارخانه قند و شکر شاهرود
۷۲	..... ۲-۱۰-۲ مرور برخی از کاربرد های گل کربناته
۷۳	..... ۱۱-۲ خلاصه نتایج فصل دوم
۷۷	..... فصل سوم:

۷۸	۱-۳ مقدمه
۷۹	۲-۳ مشخصات مصالح مصرفی
۷۹	۱-۲-۳ خصوصیات مصالح سنگی طبیعی
۸۱	۲-۲-۳ سرباره فولادی
۸۲	۳-۲-۳ مشخصات گل قرمز
۸۲	۴-۲-۳ مشخصات گل کربناته
۸۳	۵-۲-۳ خصوصیات قیر
۸۴	۳-۳ دانه بندی مصالح سنگی
۸۶	۴-۳ آزمایش های انجام گرفته در پژوهش
۸۷	۱-۴-۳ آزمایش مارشال ASTM D 1559
۸۹	۲-۴-۳ آزمایش خمش سه نقطه ای ASTM D 8044
۹۰	۳-۴-۳ آزمایش کشش غیر مستقیم لاتمن اصلاحی AASHTOT 283
۹۴	۴-۴-۳ آزمایش شاخص مارشال
۹۵	۵-۳ نحوه ساخت نمونه
۹۷	۶-۳ ساخت نمونه های نیمه استوانه ای (SCB)
۹۸	۷-۳ نحوه آزمایش خودترمیمی و سیکل های مربوط به آن
۱۰۳	<b>فصل چهارم:</b>
۱۰۴	۱-۴ مقدمه
۱۰۴	۲-۴ بررسی نتایج
۱۰۴	۱-۲-۴ درصد قیر بهینه

۲-۲-۴ نتایج خودترمیمی ..... ۱۰۵

۱-۲-۲-۴ نتایج آزمایش ترمیم: ..... ۱۲۴

۳-۲-۴ نتایج حساسیت رطوبتی ..... ۱۲۵

۴-۲-۴ نتایج ضریب مارشال (شاخص مارشال) ..... ۱۳۰

۳-۴ خلاصه نتایج ..... ۱۳۳

فصل پنجم: ..... ۱۳۵

۱-۵ جمع بندی نتایج ..... ۱۳۶

۲-۵ پیشنهادات ..... ۱۳۶

منابع ..... ۱۳۷

## فهرست اشکال

- شکل ۱-۱ لکه گیری و روکش آسفالت، از روش های پر هزینه مربوط به تعمیر و نگهداری راه ها.. ۶
- شکل ۱-۲ ساختار پایان نامه ..... ۱۲
- شکل ۱-۲ دیاگرام شماتیک مکانیزم مرحله ای ترمیم ترک [۲۲] ..... ۱۶
- شکل ۲-۲ دیاگرام شماتیک سه مرحله ای مکانیزم ترمیم در قیر [۲۲] ..... ۱۷
- شکل ۳-۲ دیاگرام شماتیک توسعه ترک و انواع زنجیر های مولکولی [۲۲] ..... ۱۸
- شکل ۴-۲ تصویر شماتیک نحوه انجام آزمایش ترمیم با دستگاه کششی [۲۵] ..... ۲۱
- شکل ۵-۲ گراف شماتیک زمان - دمای ترمیم در آزمایش مقاومت کششی [۲۵] ..... ۲۱
- شکل ۶-۲ نمودار نرخ ترمیم انواع قیرهای خالص و پلیمری در زمان و دما های مختلف ترمیم [۲۵] ..... ۲۲
- شکل ۷-۲ تصویر شماتیک تأثیر نانوذرات بر جاری شدن قیر به داخل ترک با استفاده از نیروهای گرانشی [۲۶] ..... ۲۴
- شکل ۸-۲ تصویر شماتیک تأثیر استایرن - بوتادین - استایرن بر جلوگیری از گسترش ریز ترک [۲۶] ..... ۲۴
- شکل ۹-۲ تصویر آزمایش کشش غیر مستقیم انجام گرفته بر روی نمونه ها [۲۶] ..... ۲۵
- شکل ۱۰-۲ (a) تصویر اسکن میکروسکوپ الکترونی ترمیم ریز ترک باروان شدن قیر، (b) تصویر شماتیک روان شدن قیر و جاری آن به داخل ریز ترک [۲۶] ..... ۲۵
- شکل ۱۱-۲ (a) ابزار آزمایش خمش سه نقطه ای ، (b) دیاگرام شماتیک ابعاد، نحوه شکست و توزیع ترک در نمونه [۲۷] ..... ۲۷
- شکل ۱۲-۲ تصاویر سی تی اسکن سه بعدی از الیاف فلزی در درصد های مختلف [۲۷] ..... ۲۷
- شکل ۱۳-۲ (چپ) دیاگرام شماتیک ترمیم ترک قبل و بعد ماکروویو ، (راست) تصویر میکروسکوپی

- ترمیم در ۴۰ ثانیه [۲۷] ..... ۲۷
- شکل ۲-۱۴ نمودار نرخ خودترمیمی در چرخه های مختلف برای مقادیر متنوع سرباره [۲۸] ..... ۲۹
- شکل ۲-۱۵ نمایی از تبدیل نمونه استوانه ای به ۴ نمونه نیمه استوانه ای با ابعاد شیار وسط نمونه ها [۲۹] ..... ۳۰
- شکل ۲-۱۶ نمایی از فرآیند ترمیم نمونه نیمه استوانه ای آسفالتی [۲۹] ..... ۳۱
- شکل ۲-۱۷ نمودار نرخ ترمیم بر حسب عرض ترک برای هر دو نوع فیلر آهکی و خاکستر بادی [۲۹] ..... ۳۱
- شکل ۲-۱۸ آزمایش خمش سه نقطه ای در دمای ۱۵ درجه سانتی گراد [۳۰] ..... ۳۳
- شکل ۲-۱۹ تفکیک نمونه های نیمه استوانه ای بر اساس درصد طول ترک [۳۰] ..... ۳۴
- شکل ۲-۲۰ محفظه گرمایش فرو سرخ به همراه ۴ لامپ مادون قرمز [۳۰] ..... ۳۴
- شکل ۲-۲۱ نتایج آزمون همبستگی برای تعیین میزان تأثیر هر یک از عوامل بر ترمیم [۳۰] ..... ۳۵
- شکل ۲-۲۲ (a) ابزار دستگاه ماکروویو ، (b) ابزار دستگاه القایی [۳۱] ..... ۳۶
- شکل ۲-۲۳ مقایسه مقادیر نرخ خودترمیمی در دو روش ماکروویو و القایی [۳۱] ..... ۳۷
- شکل ۲-۲۴ مقایسه نرخ خودترمیمی بر حسب زمان های مختلف ترمیم به ازای ۴ درصد الیاف فولادی در هر روش گرمادهی [۳۱] ..... ۳۷
- شکل ۲-۲۵ نمای شماتیک فرآیند تولید کپسول های آلژینات کلسیم [۳۲] ..... ۳۹
- شکل ۲-۲۶ ابعاد نمونه ماستیک آسفالتی به همراه قالب ساخت آن [۳۲] ..... ۴۰
- شکل ۲-۲۷ نمای کلی یک چرخه ترک - ترمیم در نمونه های ماستیک آسفالتی [۳۲] ..... ۴۱
- شکل ۲-۲۸ مقادیر بار حداکثری ماستیک های آسفالتی [۳۲] ..... ۴۲
- شکل ۲-۲۹ تغییرات نرخ خودترمیمی انواع مخلوط های آسفالتی [۳۲] ..... ۴۲
- شکل ۲-۳۰ نرخ ترمیم انواع مخلوط های حاوی سرباره و الیاف فولادی با هر دو روش گرمایشی [۳۳]

- ۴۳ .....
- شکل ۲-۳۱ گسیختگی مخلوط های آسفالتی به دلیل گرمایش بیش از حد پس از ۱۲۰ ثانیه گرمایش  
ماکروویو [۳۳]..... ۴۴ .....
- شکل ۲-۳۲ سرباره فولادی در چند سایز مختلف [۳۵] ..... ۴۶ .....
- شکل ۲-۳۳ نمایی از عملکرد کوره قوس الکتریکی [۳۴]..... ۴۸ .....
- شکل ۲-۳۴ نمایی از عملکرد کوره اکسیژنی [۳۴]..... ۴۹ .....
- شکل ۲-۳۵ نمودار تغییرات شاخص TSR در نمونه های مختلف سرباره و مصالح آهکی [۵۹]... ۶۲ .....
- شکل ۲-۳۶ کشورهای اصلی تولید کننده بوکسیت در جهان [۶۱]..... ۶۳ .....
- شکل ۲-۳۷ تصویر پودر سفید رنگ آلومینیوم اکسید (آلومینا) ..... ۶۵ .....
- شکل ۲-۳۸ دیاگرام شماتیک تولید اکسید آلومینیوم (آلومینا) در فرآیند بایر [۶۱] ..... ۶۶ .....
- شکل ۲-۳۹ (۱) تخلیه دوغاب گل قرمز، (۲) محل انباشت گل قرمز، (۳) پودر گل قرمز [۶۳]..... ۶۹ .....
- شکل ۲-۴۰ تصویر نمونه های ماستیک - بسترسنگی (a) حالت خشک ، (b) حالت مرطوب [۶۵]..... ۷۱ .....
- شکل ۳-۱ نمایی کلی از ۳ نوع مصالح به ترتیب (۱) سرباره، (۲) گل قرمز و (۳) گل کربناته ..... ۸۳ .....
- شکل ۳-۲ نمودار دانه بندی مورد استفاده در پایان نامه ..... ۸۶ .....
- شکل ۳-۳ (۱) چکش تراکم اتوماتیک مارشال ، (۲) چکش تراکم دستی مارشال ..... ۸۹ .....
- شکل ۳-۴ دستگاه تک محوری با ظرفیت ۵ تن ..... ۹۰ .....
- شکل ۳-۵ تصویر شماتیک محصور شدن رطوبت بین قیر و سنگدانه در یک مخلوط آسفالتی [۶۸]..... ۹۱ .....
- شکل ۳-۶ تصویری از سیکل ذوب و یخ نمونه های اشباع ..... ۹۳ .....
- شکل ۳-۷ نمایی از آزمایش مقاومت کششی غیر مستقیم نمونه آسفالتی با دستگاه جک فشاری ۹۳

- شکل ۳-۸ تصویر جک مارشال و نحوه قرارگیری نمونه در آن ..... ۹۵
- شکل ۳-۹ تصویری از نمونه های استوانه ای مارشال ساخته شده ..... ۹۷
- شکل ۳-۱۰ (۱) برش نمونه استوانه ای (۲) ایجاد شکاف در وسط نمونه (۳) نمونه نیمه استوانه ای  
نهایی ..... ۹۸
- شکل ۳-۱۱ آزمایش خمش سه نقطه ای با دستگاه تک محوری و قالب ساخته شده ..... ۹۹
- شکل ۳-۱۲ تصویر فرآیند گرمایش ماکروویو و ثبت دمای نمونه با دوربین حرارتی ..... ۱۰۱
- شکل ۴-۱ نمودار میزان نرخ ترمیم نمونه ها در زمان های مختلف گرمایش برای سیکل اول ترمیم  
..... ۱۰۸
- شکل ۴-۲ نمودار دمای ترمیم نمونه ها در زمان های مختلف گرمایش برای سیکل اول ترمیم.. ۱۰۹
- شکل ۴-۳ نمودار میزان نرخ ترمیم نمونه ها در زمان های مختلف گرمایش برای سیکل دوم ترمیم  
..... ۱۱۰
- شکل ۴-۴ نمودار دمای ترمیم نمونه ها در زمان های مختلف گرمایش برای سیکل دوم ترمیم. ۱۱۱
- شکل ۴-۵ نمودار میزان نرخ ترمیم نمونه ها در زمانهای مختلف گرمایش برای سیکل سوم ترمیم  
..... ۱۱۲
- شکل ۴-۶ نمودار دمای ترمیم نمونه ها در زمان های مختلف گرمایش برای سیکل سوم ترمیم. ۱۱۳
- شکل ۴-۷ نمودار میزان نرخ ترمیم نمونه ها در زمانهای مختلف گرمایش برای سیکل چهارم ترمیم  
..... ۱۱۴
- شکل ۴-۸ نمودار دمای ترمیم نمونه ها در زمان های مختلف گرمایش برای سیکل چهارم ترمیم  
..... ۱۱۵
- شکل ۴-۹ نمودار میزان نرخ ترمیم نمونه ها در زمان های مختلف گرمایش برای سیکل پنجم ۱۱۶
- شکل ۴-۱۰ نمودار دمای ترمیم نمونه ها در زمان های مختلف گرمایش برای سیکل پنجم ترمیم

۱۱۷.....

شکل ۴-۱۱ نمودار میزان نرخ ترمیم نمونه ها در زمان های مختلف گرمایش برای سیکل ششم

۱۱۸.....

شکل ۴-۱۲ نمودار دمای ترمیم نمونه ها در زمان های مختلف گرمایش برای سیکل ششم ترمیم

۱۱۹.....

شکل ۴-۱۳ نمودار میزان نرخ ترمیم نمونه ها در زمان های مختلف گرمایش برای سیکل هفتم

۱۲۰.....

شکل ۴-۱۴ نمودار دمای ترمیم نمونه ها در زمان های مختلف گرمایش برای سیکل هفتم ترمیم

۱۲۱.....

شکل ۴-۱۵ تصاویر مادون قرمز تعدادی از نمونه ها در اولین سیکل با زمان ترمیم ۹۰ ثانیه.... ۱۲۳

شکل ۴-۱۶ تصاویری از نمونه های تغییر فرم یافته و گسیخته شده در اثر گرمایش بیش از اندازه

۱۲۴.....

شکل ۴-۱۷ نمودار تغییرات نرخ ترمیم بهینه در سیکل های مختلف برای تمامی نمونه ها..... ۱۲۵

شکل ۴-۱۸ مقایسه نسبت مقاومت کششی غیر مستقیم نمونه ها (TSR)..... ۱۲۹

شکل ۴-۱۹ همزن سرعت بالا ساخته شده در پژوهش ..... ۱۳۰

شکل ۴-۲۰ مقایسه ضریب مارشال نمونه ها..... ۱۳۲



## فهرست جداول

- جدول ۱-۲ مقادیر نرخ خودترمیمی قیر های اصلاح شده در دو زمان ۶ و ۲۴ ساعته [۲۵]..... ۲۲
- جدول ۲-۲ ترکیبات شیمیایی خاکستر بادی (درصد) [۲۹] ..... ۲۹
- جدول ۳-۲ مقادیر آب و روغن ضایعاتی به همراه نسبت آن ها در ساخت کپسول ها [۳۲]..... ۳۸
- جدول ۴-۲ مقایسه مشخصات فیزیکی سرباره فولادی با برخی دیگر از مصالح [۳۴]..... ۵۲
- جدول ۵-۲ مقایسه ترکیبات شیمیایی دو نوع سرباره فولادی در تعدادی از مقالات ..... ۵۴
- جدول ۶-۲ میزان تقریبی تولید سالیانه گل قرمز به همراه هزینه مربوط به دفع آن در برخی از کشورها [۶۲] ..... ۶۷
- جدول ۷-۲ ترکیبات شیمیایی مهم گل قرمز تولیدی برخی از کشورها [۶۲]..... ۶۸
- جدول ۸-۲ خلاصه نتایج مرور کارهای گذشته ..... ۷۳
- جدول ۱-۳ مشخصات مربوط به کیفیت مصالح سنگی ..... ۸۰
- جدول ۲-۳ مقادیر وزن مخصوص و میزان درصد جذب آب مصالح سنگی ..... ۸۱
- جدول ۳-۳ ترکیبات شیمیایی مصالح سنگی آهکی و سرباره ای ..... ۸۱
- جدول ۴-۳ ترکیبات شیمیایی تشکیل دهنده گل قرمز کارخانه بوکسیت جاجرم ..... ۸۲
- جدول ۵-۳ ترکیبات شیمیایی گل کربناته کارخانه شکر (قند) شاهرود ..... ۸۳
- جدول ۶-۳ نتایج آزمایش های انجام شده بر روی قیر مصرفی ..... ۸۴
- جدول ۷-۳ دانه بندی مصالح سنگی ..... ۸۵
- جدول ۸-۳ آزمایش های انجام گرفته در این پژوهش ..... ۸۷
- جدول ۹-۳ تعداد ضربات چکش برای ساخت نمونه ها در آزمایش های مختلف ..... ۹۶
- جدول ۱۰-۳ انواع ترکیبات تشکیل یافته بین سنگدانه ها به صورت درصد حجمی در پژوهش .. ۹۷
- جدول ۱-۴ مقادیر درصد قیر بهینه انواع نمونه ها ..... ۱۰۵

- جدول ۲-۴ انواع نمونه های خودترمیمی ساخته شده به همراه زمان های گرمایش ..... ۱۰۷
- جدول ۳-۴ زمان و دمای بهینه ترمیم برای انواع نمونه ها در سیکل اول ترمیم ..... ۱۰۹
- جدول ۴-۴ زمان و دمای بهینه ترمیم برای انواع نمونه ها در سیکل دوم ترمیم ..... ۱۱۲
- جدول ۵-۴ زمان و دمای بهینه ترمیم برای انواع نمونه ها در سیکل سوم ترمیم ..... ۱۱۴
- جدول ۶-۴ زمان و دمای بهینه ترمیم برای انواع نمونه ها در سیکل چهارم ترمیم ..... ۱۱۶
- جدول ۷-۴ زمان و دمای بهینه ترمیم برای انواع نمونه ها در سیکل پنجم ترمیم ..... ۱۱۸
- جدول ۸-۴ زمان و دمای بهینه ترمیم برای انواع نمونه ها در سیکل ششم ترمیم ..... ۱۲۰
- جدول ۹-۴ زمان و دمای بهینه ترمیم برای انواع نمونه ها در سیکل هفتم ترمیم ..... ۱۲۲
- جدول ۱۰-۴ نتایج حساسیت رطوبتی تمامی نمونه ها ..... ۱۲۶
- جدول ۱۱-۴ نتایج ضریب مارشال ..... ۱۳۱
- جدول ۱۲-۴ خلاصه نتایج تمامی آزمایشات ..... ۱۳۳





# فصل اول:

## کلیات تحقیق

## ۱- مقدمه

در عصر حاضر حمل و نقل و ارتباطات در زندگی بشری امری بسیار مهم و ضروری تلقی شده؛ به گونه ای که انسان ها برای رسیدن به اهداف و مقاصد خود از روش های گوناگون و متنوع حمل و نقلی استفاده می کنند. شبکه حمل و نقل به سه دسته کلی زمینی، هوایی و دریایی تقسیم می شود. بیشترین سهم از این شبکه؛ به حمل و نقل زمینی اختصاص دارد. حمل و نقل جاده ای زیرمجموعه حمل و نقل زمینی محسوب می شود که به دلیل داشتن وسعت و گستردگی زیاد و نیز استفاده وسیع مردم از این شبکه، یکی از کاربردی ترین انواع حمل و نقل محسوب می گردد.

روسازی های مورد استفاده در ساخت راه های جاده ای، پارکینگ ها و فرودگاه ها؛ می تواند به یکی از دو صورت روسازی انعطاف پذیر<sup>۱</sup> و روسازی صلب<sup>۲</sup> باشد. یکی از متداول ترین مصالحی که در روسازی های انعطاف پذیر استفاده می شود، مخلوط های آسفالتی داغ می باشد. در اواخر دهه ۱۸۰۰ میلادی، اولین روسازی ها به صورت مخلوط آسفالتی داغ با استفاده از قطران زغال سنگ به عنوان قیر در Washington, D.C. ساخته شدند. در ایالات متحده در دهه ۱۹۵۰، به دنبال جنگ جهانی دوم؛ به دلیل افزایش حجم ترافیک و سرعت سفرها، تولید نفت و قیر در پالایشگاه ها نیز افزایش پیدا کرد که به دنبال آن، تولید مخلوط آسفالتی داغ و ساخت بزرگراه نیز افزایش یافت [۱].

تولید مخلوط های آسفالتی با درجه حرارت های بالا، و نیز اقدامات لازم به جهت تعمیر و نگهداری راه ها در طول عمر بهره برداریشان، با وجود آن که نیاز به صرف سوخت و انرژی زیادی هستند که به تبع آن موجب تولید گاز های آلاینده و دیگر آلودگی های زیست محیطی می شود؛ اما همچنان مورد توجه بسیاری از کشور های دنیا قرار گرفته است. به همین دلیل در کشورهای مثل ایران، که دارای ذخایر نفتی زیادی هستند؛ تولید اینگونه مخلوط ها بسیار رایج می باشد.

---

<sup>۱</sup> Flexible Pavement

<sup>۲</sup> Rigid Pavement

پس از احداث روسازی های آسفالتی موضوع تعمیر و نگهداری راه ها مطرح می شود؛ که این مسأله یکی از دغدغه های مهم و اساسی برای فعالان این صنعت است که چگونه می توان با صرف کمترین هزینه ها در طی عمر بهره برداری، کیفیت آسفالت مسیر را برای استفاده کنندگان از آن در بالاترین سطح نگه داشت و آرامش خاطری را برای رانندگان ایجاد کرد. بنابراین موضوع این پژوهش نیز بررسی یکی از روش های نوین نگهداری و ترمیم راه ها است.

## ۱-۲ بیان مسأله

مخلوط های آسفالتی که متداول ترین مواد سازنده روسازی های انعطاف پذیر در سرتاسر جهان هستند؛ خود ترکیبی از مصالح سنگی دانه بندی شده، فیلر و قیر به عنوان یک ماده اتصال دهنده می باشند [۲]. البته گاهی امکان دارد این ترکیب حاوی برخی از افزودنی ها نیز باشد. پس از طراحی و اجرای یک روسازی آسفالتی، مهم ترین مسأله ای که مطرح می شود؛ موضوع تعمیر و نگهداری راه می باشد. معمولاً عمر بهره برداری روسازی های آسفالتی حدود ۲۰ سال در نظر گرفته می شود [۳]. در طول عمر بهره برداری؛ یک روسازی آسفالتی به دلیل عوامل متعددی نظیر؛ رفت و آمد وسایل نقلیه، تغییرات دمایی، شرایط جوی، بارندگی در معرض فرآیند خرابی<sup>۱</sup> قرار می گیرد. هر یک از این خرابی ها با توجه به منشأ به وجود آمدنشان به انواع مختلف ترک های خستگی<sup>۲</sup>، ترک های حرارتی<sup>۳</sup>، شیارشدگی<sup>۴</sup>، خرابی رطوبتی<sup>۵</sup> و ... تقسیم بندی می شوند. این خرابی ها که برخی از آن ها، جزء خرابی سازه ای آسفالت می باشند، در ابتدا به صورت ترک های ریز<sup>۶</sup> در سطح آسفالت ظاهر می شوند و به تدریج این ترک های ریز به هم متصل شده و شبکه ای از ترک ها را تشکیل می دهند [۴]. زمانی که این سطح از

---

<sup>۱</sup> Deterioration

<sup>۲</sup> Fatigue cracking

<sup>۳</sup> Thermal cracking

<sup>۴</sup> Rutting

<sup>۵</sup> Moisture damage

<sup>۶</sup> Micro-cracks

خرابی رخ می‌دهد، به دلیل آن که در رفت و آمد وسایل نقلیه اختلال ایجاد کرده و سطح ایمنی مسیر را کاهش می‌دهد؛ لذا مهندسين راه به فکر اقدامات مربوط به تعمیر و نگهداری می‌افتند. فرآیند نگهداری شامل سه بخش؛ پیشگیرانه<sup>۱</sup>، اصلاح کننده<sup>۲</sup> و بازسازی کامل<sup>۳</sup> می‌باشد. انجام اقدامات مربوط به هر سه بخش به خصوص بخش آخر، بسیار زمان بر، پر هزینه و غیر اقتصادی بوده تا حدی که میزان زیادی از بودجه کشورها را به خود اختصاص می‌دهد. در شکل ۱-۱ نمونه ای از این اقدامات مشاهده می‌شود. حتی یکسری از تکنولوژی های پیشگیرانه که در قالب اندوهای آب بند و عایق هستند؛ مانند چپ سیل<sup>۴</sup>، فوگ سیل<sup>۵</sup> و میکرو سرفیسینگ<sup>۶</sup> که از دهه ۱۹۷۰ مورد استفاده قرار گرفته و نقش پر کنندگی ترک ها را دارند، به دلیل ضعف در چسبندگی کامل این درزگیرها با سطوح ترک خورده، پس از گذشت مدتی کارایی خود را از دست می‌دهند [۲]. بررسی دلایل بالا، محققین و پژوهشگران این صنعت را به سوی تکنولوژی هایی سوق داد که بتوان ترک ها را در نخستین مراحل تشکیل ترمیم نمود و عمر سرویس دهی روسازی آسفالتی را افزایش داد [۵، ۶]. یکی از این روش ها در قالب پدیده خودترمیمی<sup>۷</sup> مطرح گردید. پدیده خودترمیمی بتن آسفالتی برای اولین بار در دهه ۱۹۶۰ گزارش گردید. از آن زمان به بعد؛ خودترمیمی مخلوط های آسفالتی، یک موضوع داغ تحقیقاتی در هر دو زمینه آزمایشگاهی و میدانی بوده است [۷]. درحقیقت زمانی که روسازی های آسفالتی توانایی ترمیم ترک های کوچک را داشته باشند، به طور قابل توجهی هزینه های نگهداری را کاهش، طول عمر مفید را افزایش و در نهایت باعث کاهش انتشار گاز های آلاینده می‌شوند [۸]. پدیده خودترمیمی به صورت ذاتی در بعضی از مواد

---

<sup>۱</sup> Preventive

<sup>۲</sup> Corrective

<sup>۳</sup> Total reconstruction

<sup>۴</sup> Chip seal

<sup>۵</sup> Fog seal

<sup>۶</sup> Micro-surfacing

<sup>۷</sup> Self-healing



از جمله قیر وجود دارد؛ بنابراین داشتن درک کاملی از خصوصیات شیمیایی و مکانیکی قیر به عنوان یک ماده ویسکو الاستیک، از جمله توانایی ترمیم آن، می‌تواند به طور قابل توجهی به توسعه روسازی های آسفالتی با دوام و پایدار که حداقل آسیب را به محیط زیست وارد می‌کنند، کمک نماید [۹]. خودترمیمی توانایی بهبود ترک های بزرگ<sup>۱</sup> و نیز برخی از خرابی ها مانند تغییر شکل های دائمی<sup>۲</sup> را ندارد [۱۰، ۱۱]. قیر نقش مهمتری در توانایی ترمیم روسازی های آسفالتی بر عهده دارد به گونه ای که قیر نرم تر از توانایی ترمیم بالاتری در مقایسه با قیر سخت برخوردار است. قیر با درجه نفوذ<sup>۳</sup> بالاتر برای فرآیند ترمیم مطلوب تر است. علاوه بر این، ویسکوزیته یک معیار حیاتی در تعیین توانایی ترمیم قیر به حساب می‌آید، به گونه ای که ویسکوزیته پایین تر می‌تواند فرآیند ترمیم قیر را افزایش دهد [۱۲]. پارامتر های تأثیرگذار بر روی پتانسیل ترمیم را می‌توان به دو دسته درونی و بیرونی تقسیم بندی نمود. پارامتر های درونی شامل: خصوصیات قیر، اصلاح کننده های<sup>۴</sup> آسفالت، افزودنی ها، ویژگی های مخلوط آسفالتی (مانند نوع سنگدانه ها و نوع دانه بندی)، عرض و طول ترک می‌باشد. پارامتر های بیرونی را نظیر؛ درجه حرارت، دوره های استراحت<sup>۵</sup>، شرایط بارگذاری و رطوبت تشکیل می‌دهند. دما و دوره استراحت؛ مهم ترین پارامتر های تأثیرگذار خارجی هستند که می‌توانند قابلیت ترمیم را تا حد زیادی بهبود ببخشند [۱۳]. کلیت فرآیند ترمیم آن است که با حرارت دادن به قیر و روان ساختن آن، بتوان ترک ها را به وسیله آن پر نمود. بنابراین منبعی که بتواند این دما را برای قیر و به تبع آن، برای مخلوط آسفالتی مهیا سازد؛ مسأله ای مهم می‌باشد. از جمله روش های گرمادهی می‌توان به گرمایش القایی<sup>۶</sup>، گرمایش ماکروویو<sup>۷</sup>، گرمایش با نور خورشید (که با اشعه مادون قرمز مدل می‌گردد) و گرمایش

---

<sup>۱</sup> Macro-cracks

<sup>۲</sup> Permanent deformations

<sup>۳</sup> Penetration

<sup>۴</sup> Modifiers

<sup>۵</sup> Rest periods

<sup>۶</sup> Induction heating

<sup>۷</sup> Microwave heating

مستقیم (حرارت شعله یا گرمخانه<sup>۱</sup>) اشاره کرد. البته برجسته ترین روش ها که در تحقیقات و پژوهش ها به خصوص در زمینه آزمایشگاهی مورد توجه و استفاده قرار گرفته است، گرمایش القایی و گرمایش ماکروویو بوده است. ما در این پژوهش تلاش داریم تا بتوانیم به بررسی بیشتر این حوزه از علم روسازی بپردازیم.



شکل ۱-۱ لکه گیری و روکش آسفالت، از روش های پر هزینه مربوط به تعمیر و نگهداری راه ها بیش از ۹۰ درصد وزن یک مخلوط آسفالتی را مصالح سنگی معدنی تشکیل می دهند [۱۴]. بنابراین ساخت و نگهداری روسازی های آسفالتی منابع طبیعی زیادی را به مصرف رسانده است. کمبود منابع طبیعی و ضررهای ناشی از استخراج آن ها و نیز مسأله آلودگی محیط زیست به خاطر تولید ضایعات و پسماندهای ناشی کارخانه جات و صنایع؛ پژوهشگران را به سمت استفاده مجدد از بازیافت منابع طبیعی با کیفیت پایین تر و مواد زائد جامد در روسازهای آسفالتی متمایل ساخت [۱۵]. یکی از انواع این مواد

---

<sup>۱</sup> Oven

زائد جامد، سرباره فولادی<sup>۱</sup> است که محصول جانبی کارخانه های تولید فولاد می باشد. سرباره فولادی به عنوان یک پسماند تولیدی ۱۳ درصد از فولاد خام خروجی را تشکیل می دهد [۱۶]. استفاده از سرباره فولادی به عنوان سنگدانه در صنعت راهسازی بیشترین محبوبیت را در سراسر جهان کسب کرده است [۱۷]. از ویژگی های بارز سرباره که نسبت به مصالح سنگی طبیعی مزیت محسوب می شود می توان به؛ وزن مخصوص بالاتر، میزان سختی بیشتر، درصد شکستگی و زبری بالاتر اشاره کرد. از ویژگی های ظاهری سنگدانه های سرباره، تیز گوشه بودن و زاویه داری بسیار حائز اهمیت است، چون نقش مهمی را در قفل و بست بهتر بین سنگدانه ها ایفا می کند. مخلوط های آسفالتی که دارای سرباره فولادی هستند؛ از سختی بیشتر، مقاومت در برابر سایش بهتر، خستگی کمتر و از خصوصیات تغییر شکل دائمی کمتری نسبت به مصالح سنگی طبیعی برخوردارند [۱۸].

همانطور که قبلاً هم بیان شد یکی از اجزای تشکیل دهنده یک مخلوط آسفالتی فیلر است. باگسترش سریع صنعت راهسازی به خصوص در کشور های در حال توسعه، فیلرهای معدنی طبیعی با تقاضای بسیار زیادی رو به رو شده است. از طرفی تأثیرات بد زیست محیطی و آلودگی ناشی از فرآیند خرد و آسیاب کردن کارخانه جات تولید کننده فیلرهای معدنی، ذهن محققین را برای جایگزین کردن سایر مصالح به جای فیلرهای معدنی طبیعی در مخلوط های آسفالتی به خود جلب کرده است. حال چه بهتر که این مصالح جایگزین، از پسماندها و ضایعات صنایع مختلف باشد. یکی از انواع این پسماندهای جامد، گل قرمز<sup>۲</sup> است. این جامد باز یافتی که باقی مانده بوکسیت<sup>۳</sup> است؛ در حقیقت یک محصول جانبی تولید شده در کارخانه جات آلومینا<sup>۴</sup> می باشد [۱۹].

---

<sup>۱</sup> Steel Slag

<sup>۲</sup> Red mud waste

<sup>۳</sup> Bauxite

<sup>۴</sup> Alumina( $Al_2O_3$ )

افزودنی دیگری که در قالب فیلر در این پژوهش مورد استفاده قرار گرفت، گل کربناته<sup>۱</sup> بود. این افزودنی در حقیقت ضایعات کارخانه جات تولید قند و شکر می‌باشد. پس از اعمال شیر آهک به مخازن شربت خام چغندر، به منظور تصفیه آن و جداسازی ناخالصی‌ها، در نهایت پسماندی که باقی می‌ماند، گل کربناته می‌باشد. از آنجایی بخش قابل توجهی از این پسماند را آهک تشکیل می‌دهد؛ لذا توجه ما را در این پژوهش برای استفاده از آن و نیز تأثیر آن بر برخی خصوصیات مکانیکی و عملکردی آسفالت به خود جلب کرد.

در این پژوهش ما می‌خواهیم که با افزودن مصالح بیان شده به آسفالت، خصوصیات خودترمیمی، حساسیت رطوبتی و شاخص مارشال (شکست پلاستیک) را بررسی نماییم.

## ۱-۳ ضرورت و اهمیت انجام پژوهش

امروزه با توجه به افزایش چشمگیر قیمت قیر، هزینه تولید و تعمیر و نگهداری آسفالت به میزان قابل توجهی افزایش پیدا کرده است و همانطور که بیان شد؛ سالیانه مبالغ بسیار زیادی از بودجه کشورها به این بخش اختصاص می‌یابد. زمانی که یک خرابی در سطح روسازی پدیدار و گسترش پیدا می‌کند؛ می‌تواند لطمه‌هایی نظیر؛ پایین آوردن سرعت وسایل نقلیه، افزایش تصادفات رانندگی، آسیب رساندن به خودروها، ایجاد تأثیرات روانی منفی بر روی رانندگان و غیره را وارد نماید. به همین خاطر، پژوهشگران و فعالان عرصه راه و ترابری همیشه به دنبال آن بوده‌اند که با صرف کمترین هزینه‌ها، بیشترین بهره‌برداری را از روسازی آسفالتی در عمر سرویس دهی آن داشته باشند. مطالب بالا باعث شد که موضوع خودترمیمی آسفالت کانون توجه محققان شود.

از آن جایی که تولید آسفالت نیاز به استخراج مصالح سنگی طبیعی زیادی دارد و ما با کمبود منابع طبیعی مواجه هستیم، موضوع جایگزین کردن مصالح دیگر به جای مصالح طبیعی، بسیار مورد توجه

---

<sup>۱</sup> Carbonation mud waste or Carbonation cake

قرار گرفته است. سالیانه چندین میلیون تن ضایعات و پسماندها در کاخانه جات صنعتی زیادی تولید می‌شود که بسیاری از آن‌ها به لحاظ زیست محیطی خطرناک بوده و دفن و امحای آن‌ها مشکلات عدیده‌ای را ایجاد کرده است. حتی برخی از کارخانه‌ها برای تولید این پسماندها، سالانه هزینه زیادی را جریمه می‌شوند. بنابراین اگر بتوان از این ضایعات و پسماندها در تولید آسفالت استفاده کرد به گونه‌ای که خصوصیات عملکردی مخلوط‌های آسفالتی را بهبود بخشند؛ علاوه بر رویکرد مثبت محیط زیستی آن، می‌توان باری را از روی دوش کارخانه جات مذکور برداشت. حال اگر این پسماندها که در قالب مصالح جایگزین استفاده می‌شوند بتوانند خودترمیمی آسفالت که موضوع اصلی این پژوهش است را بهبود بخشند؛ می‌توان آینده روشنی را برای پدیده خودترمیمی آسفالت تصور کرد.

## ۴-۱ اهداف پژوهش

اهداف اصلی این پژوهش در موارد زیر خلاصه می‌شوند:

- ۱) بررسی تأثیر سرباره فولادی بر روی ترمیم مخلوط آسفالتی با استفاده از امواج ماکروویو
- ۲) بررسی تأثیر گل قرمز بر روی ترمیم مخلوط آسفالتی با استفاده از امواج ماکروویو
- ۳) بررسی تأثیر ترکیب سرباره فولادی و گل قرمز بر روی ترمیم مخلوط آسفالتی با استفاده از امواج ماکروویو
- ۴) پیدا کردن بهینه‌ترین زمان اعمال امواج ماکروویو بر حسب ثانیه برای هر ترکیب، که در آن زمان عملکرد ترمیم بهترین باشد
- ۵) بررسی حساسیت رطوبتی سرباره فولادی و گل قرمز به صورت جداگانه و ترکیب همزمان آن‌ها
- ۶) تأثیر گل کربناته بر روی حساسیت رطوبتی مخلوط آسفالتی و ترکیب آن با سرباره فولادی و گل قرمز

۷) بررسی میزان تأثیر هر یک از مصالح ضایعاتی به صورت جداگانه و نیز ترکیبات آن ها بر

روی مقاومت شیارشدگی

۸) یافتن بهترین ترکیب مصالح در آسفالت که از نظر تمامی جوانب به خصوص ترمیم بهترین

باشد

## ۱-۵ فرض های پژوهش

از مهم ترین فرض های این پژوهش می توان به موارد زیر اشاره کرد:

- سرباره فولادی استفاده شده در این پژوهش از نوع کوره قوس الکتریکی بوده و مشخصات یکنواختی دارد.
- مصالح سنگی استفاده شده در نمونه های آسفالتی دارای مشخصات یکنواخت و دانه بندی یکسانی می باشد.
- برای تعیین درصد قیر بهینه نمونه های آسفالتی برای کلیه ترکیبات، از همان روش مرسوم طرح اختلاط مارشال استفاده گردیده است.
- ضایعات گل قرمز و گل کربناته هر کدام از یک کارخانه و یک دپو با مشخصات یکنواخت جمع آوری شده اند.
- شاخص ترمیم؛ نسبت میزان مقاومت خمشی بعد از ترمیم به مقاومت خمشی اولیه نمونه آسفالتی تعریف می شود.
- تابش امواج ماکروویو به سطح نمونه های آسفالتی به طور یکنواخت و همه جانبه می باشد.

## ۱-۶ روش تحقیق

۱) ساخت نمونه های استوانه ای با استفاده از طرح اختلاط مارشال برای تمامی انواع مصالح

ضایعاتی و مصالح سنگی طبیعی به منظور تعیین درصد قیر بهینه

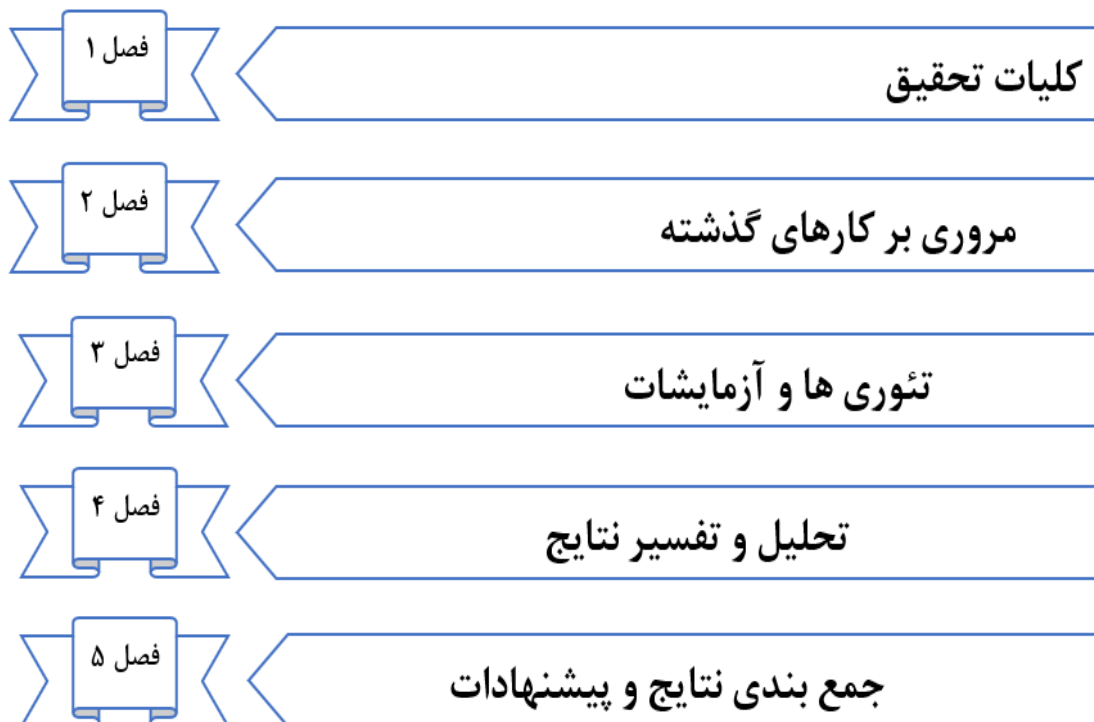
- ۲) برش نمونه های استوانه ای مارشال با درصد قیر بهینه برای هر کدام از مصالح و ترکیبات و تبدیل آن ها به ۴ نمونه نیمه استوانه ای به همراه یک شیار در وسط آن ها
- ۳) انجام آزمایش خمش سه نقطه ای بر روی نمونه های نیمه استوانه ای به منظور تعیین مقاومت خمشی اولیه نمونه ها
- ۴) در معرض قرار دادن نمونه ها تحت امواج ماکروویو در زمان های مختلف و ثبت دمای نمونه ها با استفاده از دوربین حرارتی
- ۵) دادن یک دوره زمان استراحت ۲۴ ساعته به نمونه ها به منظور اطمینان از تکمیل فرآیند ترمیم
- ۶) انجام مجدد آزمایش خمش سه نقطه ای به منظور تعیین مقاومت خمشی ثانویه نمونه ها و تعیین میزان نرخ خودترمیمی
- ۷) انجام آزمایش حساسیت رطوبتی برای کلیه نمونه ها با استفاده از روش لاتمن اصلاح شده
- ۸) بررسی مقاومت شیارشدگی نمونه ها با استفاده از شاخص پارامتر مارشال

## ۷-۱ نوآوری

تاکنون پژوهش های مختلف زیادی در مورد استفاده از سرباره فولادی و تأثیر آن بر خصوصیات عملکردی مخلوط های آسفالتی انجام گرفته است، اما هنوز هم پژوهش ها در مورد ویژگی خودترمیمی مخلوط های حاوی سرباره فولادی که چه درصدی و چه سایزهایی از سنگدانه بهترین عملکرد را دارا می باشند؛ ادامه دارد. از طرفی تأثیر گل قرمز به تنهایی و نیز ترکیب آن با سرباره فولادی بر خودترمیمی آسفالت تاکنون مورد بررسی قرار نگرفته است. از آن جایی که گل قرمز و سرباره فولادی با توجه به تحقیقات پیشین، عملکرد ضعیفی در برابر حساسیت رطوبتی دارند؛ لذا تصمیم گرفتیم تا با گل کربناته که برای اولین بار در مخلوط آسفالتی استفاده می شود، این مشکل را حل نماییم. موارد بالا بیان کننده نوآوری این پژوهش هستند.

## ۸-۱ ساختار پژوهش

مطالب این پایان نامه در قالب ۵ فصل تقسیم بندی شده است. در فصل اول، پس از ارائه مقدمه ای از پژوهش به بیان مسأله، ضرورت انجام پژوهش، اهداف تحقیق و فرض های مهم پژوهش پرداخته شده است. در فصل دوم، مروری بر کارهای انجام گرفته پیرامون موضوع اصلی تحقیق و نیز مصالح بکار گرفته شده جمع آوری و ارائه گردیده است. در فصل سوم، تئوری ها، روش های انجام آزمایشات و نیز استاندارد های مربوطه بیان شده است. در فصل چهارم، به تحلیل و تفسیر کامل نتایج حاصل از آزمایشات پرداخته شده است. و نهایتاً در فصل آخر، جمع بندی نهایی تحقیق و پیشنهاداتی برای کارهای آینده پیرامون موضوع پژوهش ارائه گردید.



شکل ۱-۲ ساختار پایان نامه



## فصل دوم:

### مروری بر کارهای گذشته

## ۲-۱ مقدمه

به دلیل کمبود منابع طبیعی و داشتن احساس مسئولیت به حفظ آن ها و نیز مشکلات بد زیست محیطی ناشی استخراج مصالح، جایگزین نمودن مصالح دیگر مورد توجه قرار گرفته است. از طرفی آلودگی ناشی از پسماندها و ضایعات کارخانه جات صنعتی و مشکلات مربوط به دفن و از بین بردن آن ها؛ برای فعالان محیط زیست نگرانی هایی را ایجاد نموده است. از طرفی همان طور که بیان شد، پدیده خودترمیمی می تواند از صرف هزینه های زیاد ناشی از روش های تعمیر و نگهداری در طول عمر سرویس دهی روسازی آسفالتی جلوگیری به عمل آورد. در این فصل می خواهیم که با کار های انجام گرفته در دو بخش پدیده خودترمیمی و نیز جایگزین نمودن مصالح بازیافتی به عنوان مصالح سنگی و پرکننده ها در مخلوط آسفالتی بیشتر آشنا شویم.

## ۲-۲ تاریخچه خودترمیمی

پدیده خودترمیمی یا توانایی بهبودی در مصالح قیری برای نخستین بار در دهه ۱۹۶۰ میلادی؛ در دو حوزه آزمایشگاهی و میدانی مطرح گردیده است. توانایی ترمیم؛ علاوه بر افزایش دوام و پایداری و عمر سرویس دهی روسازی های آسفالتی، تأثیرات مثبتی را نیز در زمینه های اقتصادی و زیست محیطی در برداشته است. اهمیت خاصیت خودترمیمی زمانی که خدمت دهی بلند مدت مد نظر باشد مانند، روسازی راه ها که تعمیر و نگهداری آن ها آسان نیست، بیشتر مورد توجه قرار می گیرد [۱۳].

## ۲-۳ قابلیت ترمیم<sup>۱</sup>

موادی که از توانایی ترمیم برخوردارند، هنگامی که در معرض خرابی قرار می گیرند، با روش هایی نظیر؛ حرارتی، مکانیکی، بالستیک و یا سایر ابزار، می توانند به ترمیم و بهبودی خود پرداخته و مجموعه

---

<sup>۱</sup> Healing capability

ای از خصوصیات خود را بازیابی کنند. موادی که معمولاً دارای توانایی بهبودی هستند؛ شامل پلیمرها، فلزات، سرامیک ها، شیشه، بتن، قیر و نیز ترکیبات آن ها می باشند. با این وجود مواد کمی، توانایی ترمیم را به عنوان یک ویژگی ذاتی دارند و بیشتر مطالعات بر روی استفاده از سیستم های جدید خودترمیمی متمرکز شده اند [۲۰].

## ۲-۴ مفهوم ترمیم

از آن جایی که ذهنیت در رابطه با ترمیم هنوز هم نا مشخص باقی مانده است، بنابراین هیچ گونه تعریف دقیقی از توانایی ترمیم در روسازی های آسفالتی وجود ندارد. با این حال، توانایی ترمیم بطور کلی به عنوان پاسخ ذاتی<sup>۱</sup> قیر به منظور کاهش ترک های تولید شده در بدنه آن در نظر گرفته شده که در نتیجه باعث بهبود نسبی خواص اصلی مواد قیری می شود [۲۱].

همچنین توسط لیتل و همکاران؛ خودترمیمی مواد آسفالتی، به عنوان بازیابی جزئی ساختار اصلی آسفالت در سطوح ترک مجاور، پیشنهاد شده است [۲۲]. به طور کلی؛ توانایی ترمیم روسازی های آسفالتی به ترمیم ریزترک ها محدود می شود، زیرا ترک های بزرگ بسته نمی شوند مگر آن که نیروهای خارجی برای فشار آوردن سطوح ترک خورده به یکدیگر اعمال شوند [۱۰].

برخی از محققان؛ فرآیند ترمیم در مواد قیری را شامل یک مکانیزم<sup>۳</sup> مرحله ای مطابق شکل ۱-۲ می دانند، که عبارت اند از؛

(۱) عملکرد سطحی ناشی از افزایش تنش ها و روان شدن قیر (آرایش مجدد مولکول ها)

(۲) ترشدگی<sup>۲</sup> (چسبیدن<sup>۲</sup> سطح ترک خورده به یکدیگر توسط انرژی سطحی)

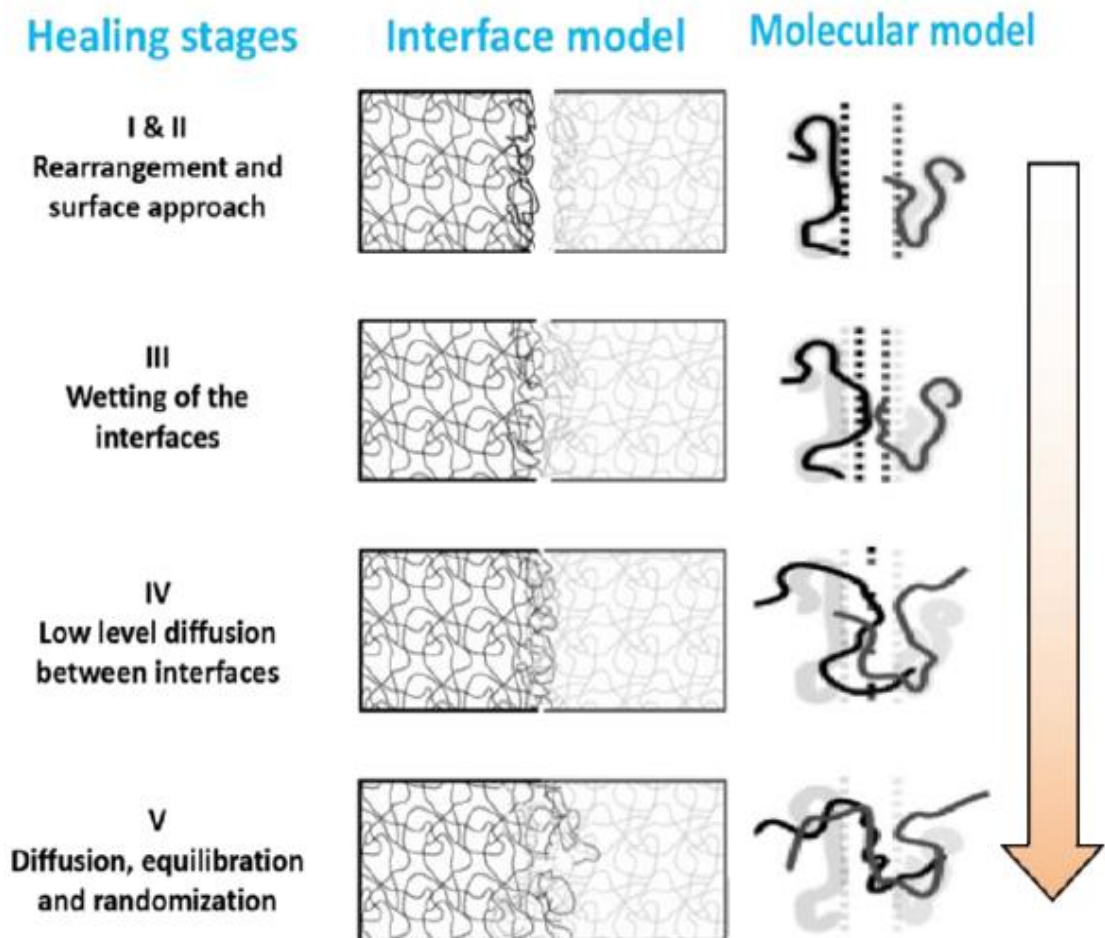
(۳) بازیابی کامل خصوصیات مکانیکی ناشی از انتشار و حرکت (انتقال) تصادفی<sup>۳</sup> مولکول ها [۱۳].

---

<sup>۱</sup> Intrinsic response

<sup>۲</sup> Wetting

<sup>۳</sup> Randomizatoin



شکل ۲-۱ دیاگرام شماتیک مکانیزم مرحله ای ترمیم ترک [۲۲]

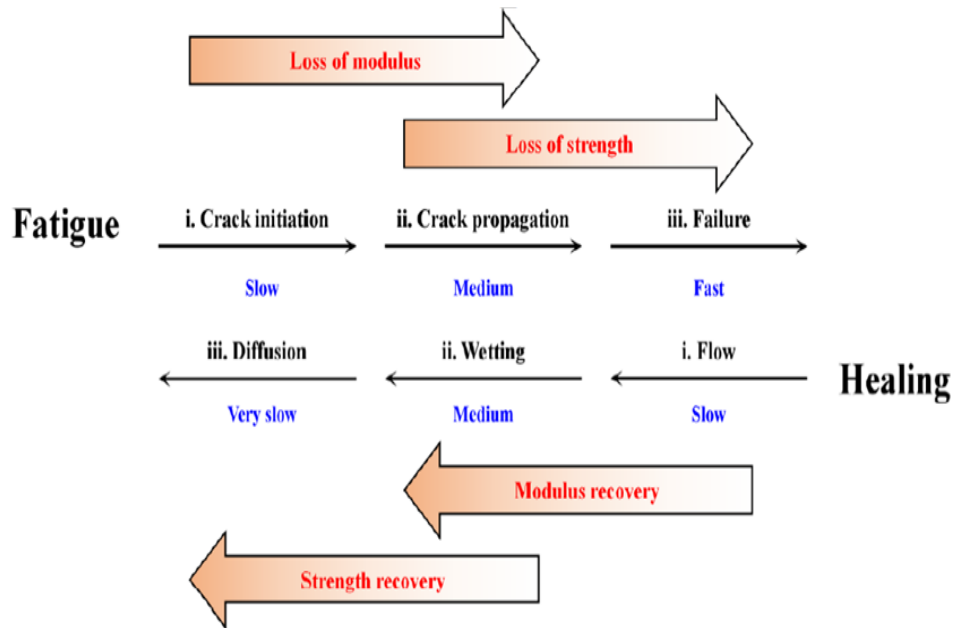
## ۲-۵ ترمیم از دیدگاه خستگی

فیلیپس در سال ۱۹۹۸ با بررسی تفاوت بین نتایج حاصل از آزمایش خستگی با و بدون دوره استراحت و نیز بازگشت حدود زیادی از سختی<sup>۱</sup> و مقاومت اولیه مصالح در دوره استراحت و افزایش عمر خستگی در این نمونه ها، مکانیزم ۳ مرحله ای را مطابق با آنچه که بیان شد برای ترمیم ارائه داد. در شکل ۲-۲ لازم به توضیح است که توانایی انتشار مولکول های قیر مستقیماً به پتانسیل حرکتی<sup>۲</sup> آن ها وابسته است و قیرهایی با مولکول های بیشتر که طول زنجیر آن ها بلندتر و شاخه هایی کوتاه تر دارند،

<sup>۱</sup> Stiffness

<sup>۲</sup> Mobility potential

از توانایی حرکتی مولکولی بیشتری برخوردارند [۱۳].



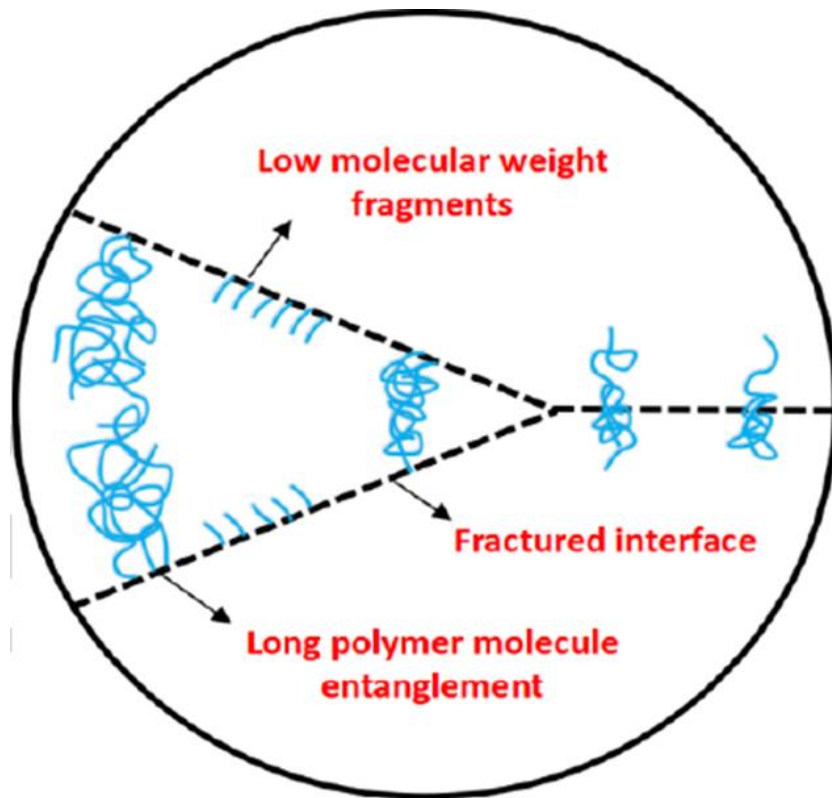
شکل ۲-۲ دیاگرام شماتیک سه مرحله ای مکانیزم ترمیم در قیر [۲۲]

نادیده گرفتن توانایی ترمیم در طراحی روسازی می تواند منجر به یک عمر پیش بینی شده کوتاه تر شود به خصوص در روسازی های فرودگاه که حجم ترافیک کمتر و مدت زمان استراحت طولانی تری دیده می شود.

## ۲-۶ برخی مدل های مختلف خود ترمیمی

### ۲-۶-۱ مدل ترمیم انتشار مولکولی

این مدل طبق شکل ۲-۳ بیان می دارد که در یک قطعه به هنگام ایجاد گسیختگی، قطعات مولکولی سبک تری در دو سطح شکستگی تشکیل شده و مولکول های بلند زنجیر در هم تنیده می شوند. پس از وقوع این رویداد، به تدریج با گذشت زمان و در طی دوره استراحت، مولکول ها به بازسازی و باز آرای خود پرداخته و تا حدی خصوصیات مکانیکی مواد را بازیابی می کنند [۲۲].



شکل ۲-۳ دیاگرام شماتیک توسعه ترک و انواع زنجیر های مولکولی [۲۲]

## ۲-۶-۲ مدل ترمیم جریان موینگی

کاملاً واضح است که ترمیم به انرژی سطحی قیر و ظرفیت نفوذ و توانایی تصادفی سازی حرکت مولکول ها از سطحی به سطح دیگر وابسته است. با پیدایش یک ترک باز تازه در آسفالت، ممکن است به دلیل فاصله زیاد بین سطوح ترک، فرآیند نفوذ مولکولی رخ ندهد. با این وجود؛ فرآیند ترمیم ادامه پیدا می کند و در صورت وجود دوره استراحت و اعمال انرژی کافی به مواد آسفالتی ترک های قابل مشاهده می توانند پُر و ناپدید شوند. پژوهشگران برای توصیف پدیده ترمیم در سطوح مختلف ریز ترک ها و درشت ترک ها از نظریه مبتنی بر خاصیت جریان موینگی استفاده کردند. بر اساس این نظریه؛ در دمای مناسب خاصیت موینگی قیر با انتشار مولکول ها بین دو سطح ترک خورده، رفته رفته باعث ترمیم و بسته شدن ترک می شود [۲۲].

## ۲-۷ عوامل تأثیرگذار بر توانایی ترمیم مخلوط های آسفالتی

پس از فهم پدیده ترمیم و چگونگی عملکرد آن، محققین به بررسی پارامترهای تأثیرگذار بر روی توانایی ترمیم پرداختند. یافته‌های این پژوهش‌ها بیان داشت که عوامل متعددی نظیر خصوصیات قیر، افزودنی‌های مختلف، عرض ترک، دوره استراحت، میزان حرارت و غیره می‌تواند بر قابلیت ترمیم تأثیر بگذارد. در این بخش می‌خواهیم به بررسی تعدادی از این عوامل بپردازیم.

## ۲-۷-۱ خصوصیات قیر

لیو و همکاران (۲۰۱۲)؛ بیان داشتند که خصوصیات قیر، نقش مهمی را در توانایی ترمیم روسازی‌های آسفالتی برعهده دارد. مثلاً قیر با درجه نفوذ بالاتر برای ترمیم مطلوب‌تر است. علاوه بر این، ویسکوزیته یک عامل بحرانی برای تعیین قابلیت ترمیم محسوب می‌شود، به گونه‌ای که ویسکوزیته پایین‌تر می‌تواند فرآیند ترمیم در قیر را افزایش دهد [۲۳].

لیتون (۲۰۰۰)؛ به توضیح اثرات ترکیبات شیمیایی قیر بر روی توانایی ترمیم پرداخته است. به طور خاص نشان داده شده است که قیر با آمفوتریک<sup>۱</sup> کم و مقدار آروماتیک<sup>۲</sup> بالا از ترمیم بالاتری برخوردار است. از طرفی بین مقدار آروماتیک در مؤلفه اجزای اسیدی - بازی انرژی آزاد سطحی<sup>۳</sup> و نرخ ترمیم طولانی مدت ارتباط مستقیمی وجود دارد. انرژی آزاد سطحی به دو بخش کلی؛ اجزای لیفشیتز - واندروالسی<sup>۴</sup> و اجزای اسید - باز لوویس<sup>۵</sup> تقسیم شده است. مؤلفه اسید - باز لوویس بر ترمیم بلند مدت تأثیر مثبت می‌گذارد [۲۴].

عیار و همکاران (۲۰۱۵)؛ اشاره کردند که قیر هم مانند سایر مصالح اورگانیک به مرور زمان دچار پیرشدگی<sup>۶</sup> می‌شود. اما به گزارش آن‌ها پیرشدگی دارای اثرات منفی بر روی قابلیت ترمیم مصالح قیری

---

<sup>۱</sup> amphoteric

<sup>۲</sup> aromatic

<sup>۳</sup> Surface free energy

<sup>۴</sup> Lifshitz - Van der Waals components

<sup>۵</sup> Lewis acid - base component

<sup>۶</sup> Aging

است [۱۳].

## ۲-۷-۲ دوره استراحت

کاظمی و همکاران (۲۰۲۱)؛ به منظور بررسی و مقایسه عملکرد خودترمیمی قیرهای اصلاح شده با پلیمرها، از پلیمر پلی یورتان تولوئن دی آیزوسیانات<sup>۱</sup> استفاده کردند. به همین جهت، این پلیمر با نسبت های وزنی ۳، ۶ و ۹ درصد به قیر خالص با درجه نفوذ ۸۵-۱۰۰ افزوده گردیده است. عمل اختلاط توسط همزن سرعت بالا با نرخ دوران ۲۵۰۰ دور بر دقیقه به مدت ۶۰ دقیقه در دمای ۱۴۰ درجه سانتی گراد انجام گرفته است. برای ارزیابی عملکرد خودترمیمی قیر خالص و قیرهای پلیمری از آزمایش مقاومت چسبندگی قیر<sup>۲</sup> بهره گرفته شده است. طبق شکل ۲-۴ ابتدا بستر سنگی آهکی و میخچه های فلزی<sup>۳</sup> به همراه قیر در گرمخانه به مدت ۱ ساعت در دمای ۱۵۰ درجه سانتی گراد گرم شده اند و سپس میخچه های فلزی با نیروی عمودی توسط قیر به بستر سنگی چسبیده اند. پس از آن که این مجموعه به مدت ۲۴ ساعت در دمای ۲۰ درجه سانتی گراد رها شد تا قیر عمل اتصال میخچه فلزی به بستر سنگی را به خوبی انجام دهد، آزمایش مقاومت کششی<sup>۴</sup> با فشار ۰/۷ مگا پاسکال بر ثانیه انجام گرفته است. پس از جداسازی بلافاصله میخچه های فلزی بدون اعمال هیچ نیرویی در جای خود قرار گرفته و برای بررسی تأثیر مدت زمان استراحت و مقدار دمای ترمیم، همانگونه که در شکل ۲-۵ دیده می شود، نمونه ها در زمان های ۶ و ۲۴ ساعته در گرمخانه با دماهای به ترتیب ۲۵، ۳۵ و ۴۵ درجه سانتی گراد قرار گرفته اند. پس از اعمال این شرایط برای کلیه نمونه ها آزمایش مقاومت کششی مجدداً انجام گرفته است.

---

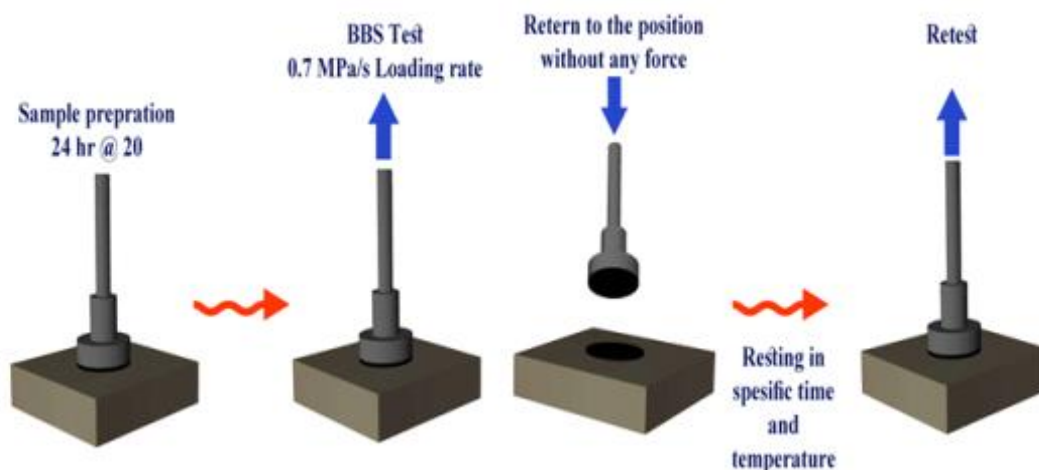
<sup>۱</sup> Toluene diisocyanate polyurethane polymer

<sup>۲</sup> bitumen bond strength (BBS)

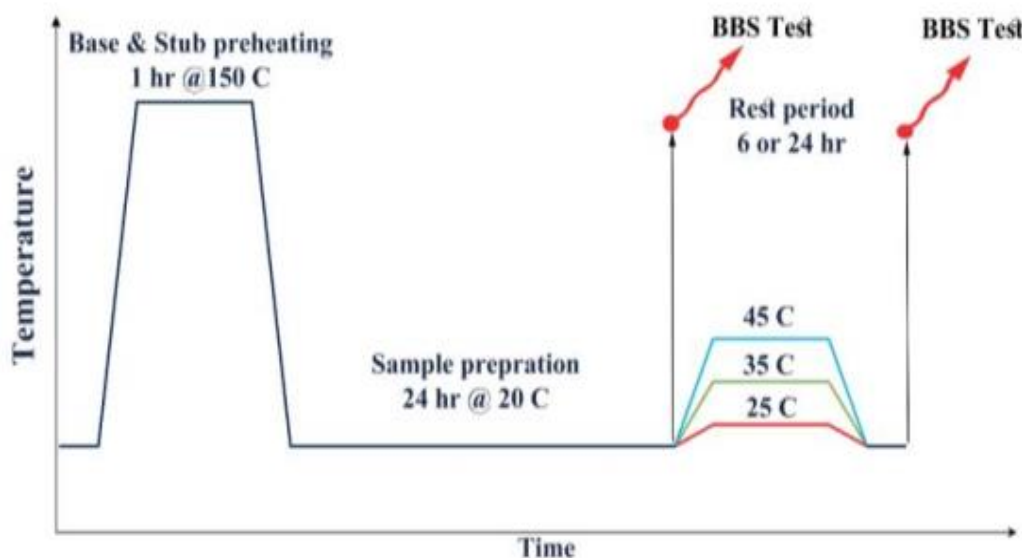
<sup>۳</sup> Stubs

<sup>۴</sup> Pull-off tensile strength (POTS)





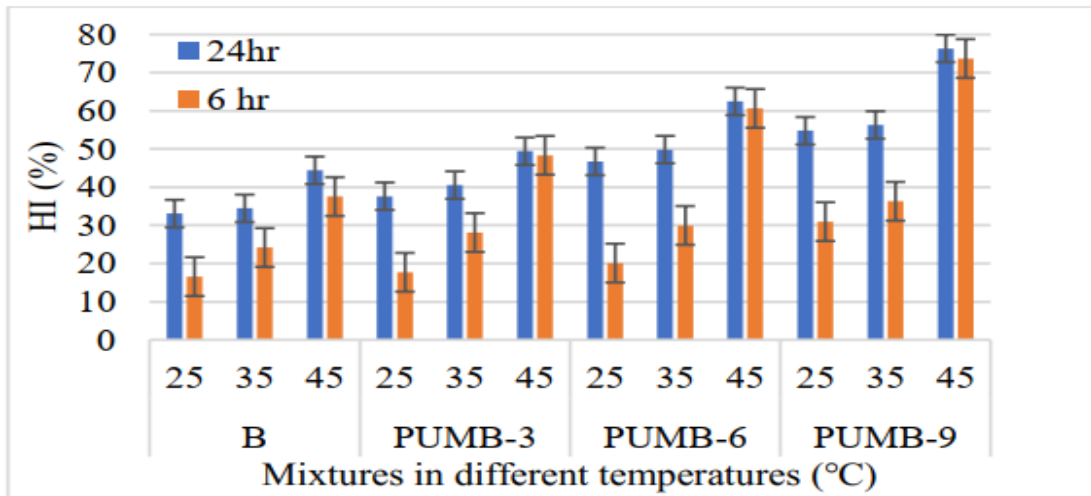
شکل ۲-۴ تصویر شماتیک نحوه انجام آزمایش ترمیم با دستگاه کششی [۲۵]



شکل ۲-۵ گراف شماتیک زمان - دمای ترمیم در آزمایش مقاومت کششی [۲۵]

با توجه به نمودار نرخ ترمیم شکل ۲-۶ مشاهده شده است که با افزایش درصد پلیمر، نرخ خودترمیمی نیز افزایش یافته است. دلیل این موضوع هم احیا و بازسازی پیوند ها به خصوص پیوند های هیدروژنی است که موجب بسته شدن ترک ها می شود. بالاترین نرخ های ترمیم هم در دمای ۴۵ درجه سانتی گراد بدست آمده اند. همچنین با توجه به جدول ۱-۲ پی برده شد که چون اختلاف بین نرخ های ترمیم در دمای ۴۵ درجه سانتی گراد بین دو مدت زمان ترمیم ۶ و ۲۴ ساعته پایین می باشد، به همین دلیل

آن ها نتیجه گرفتند که بهترین زمان خودترمیمی ۶ ساعت بوده است [۲۵].



شکل ۲-۶ نمودار نرخ ترمیم انواع قیرهای خالص و پلیمری در زمان و دما های مختلف ترمیم [۲۵]

جدول ۲-۱ مقادیر نرخ خودترمیمی قیرهای اصلاح شده در دو زمان ۶ و ۲۴ ساعته [۲۵]

Mix type	Healing time (hr)	Healing temperature (°C)	(%)HI (avg)
B	6 hr	25	16.56
PUMB-3			17.70
PUMB-6			20.12
PUMB-9			30.97
B		35	24.18
PUMB-3			28.11
PUMB-6			29.98
PUMB-9			36.31
B		45	37.55
PUMB-3			48.35
PUMB-6			60.64
PUMB-9			73.71
B	24 hr	25	33.09
PUMB-3			37.64
PUMB-6			46.75
PUMB-9			54.79
B		35	34.46
PUMB-3			40.56
PUMB-6			49.86
PUMB-9			56.30
B		45	44.43
PUMB-3			49.42
PUMB-6			62.47
PUMB-9			76.37

## ۲-۷-۳ افزودنی ها

گنجه ای و افلاکی (۲۰۱۶)؛ به بررسی تأثیر نانو - سیلیکا<sup>۱</sup> و استایرن - بوتادین - استایرن<sup>۲</sup> بر بهبودی توانایی خودترمیمی مخلوط آسفالتی پرداختند. آن ها بیان کردند که، ذرات نانو - سیلیکا طبق شکل ۲-۷ به دلیل داشتن شکلی کروی، سطح ویژه بالا، اندازه بسیار ریز و چگالی زیاد در مقایسه با قیر؛ روانی قیر را افزایش داده و باعث می شود که قیر ترک های ریز را پر کند؛ در نتیجه شاخص ترمیم<sup>۳</sup> را در مخلوط های آسفالتی داغ به شدت افزایش می دهد. استایرن - بوتادین - استایرن نیز نه تنها باعث افزایش عمر خستگی و کاهش حساسیت دمایی شده بلکه به کمک الاستومر های بلند زنجیر پلی بوتادین مانع از گسترش ترک ها می گردد (شکل ۲-۸). در این پژوهش از ۰، ۰/۵، ۱، ۲ و ۳ درصد نانو - سیلیکا و ۰، ۱، ۳ و ۵ درصد استایرن - بوتادین - استایرن استفاده شده است. بر روی تمامی نمونه ها آزمایش کشش غیرمستقیم<sup>۴</sup> همان گونه که در شکل ۲-۹ مشاهده می گردد، در دمای ۲۵ درجه سانتی گراد انجام گرفته است. زمان های استراحت ۱ ساعت، ۲ ساعت و ۱ هفته ای برای نمونه ها در نظر گرفته شد و پس از آن با بررسی تصاویر اسکن میکروسکوپ الکترونی (شکل ۲-۱۰)، میزان پر شدن ترک ها توسط قیر مورد ارزیابی قرار گرفت. بهترین زمان استراحت ۱ هفته بوده است. بهینه ترین ترکیب شامل ۳ درصد استایرن - بوتادین - استایرن، ۲ درصد نانو - سیلیکا و ۷ درصد قیر نتیجه داده شده است [۲۶].

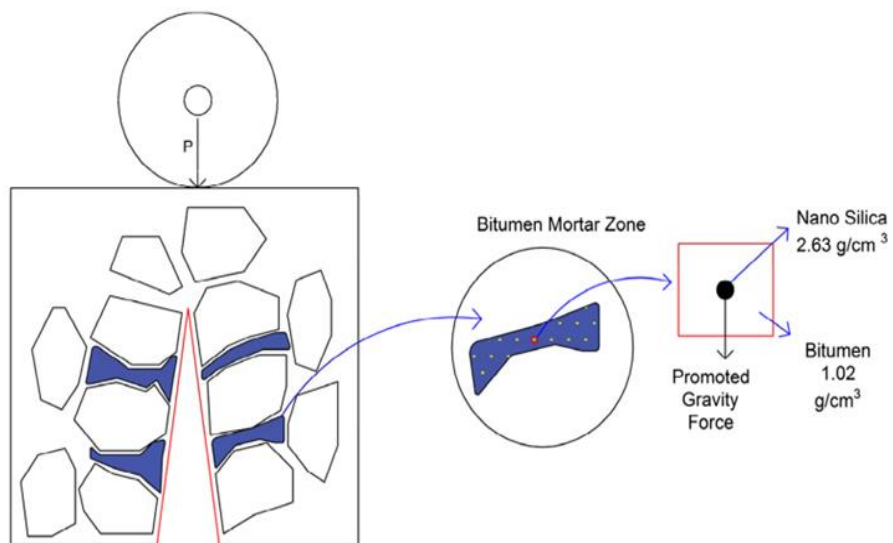
---

<sup>۱</sup> nano-silica

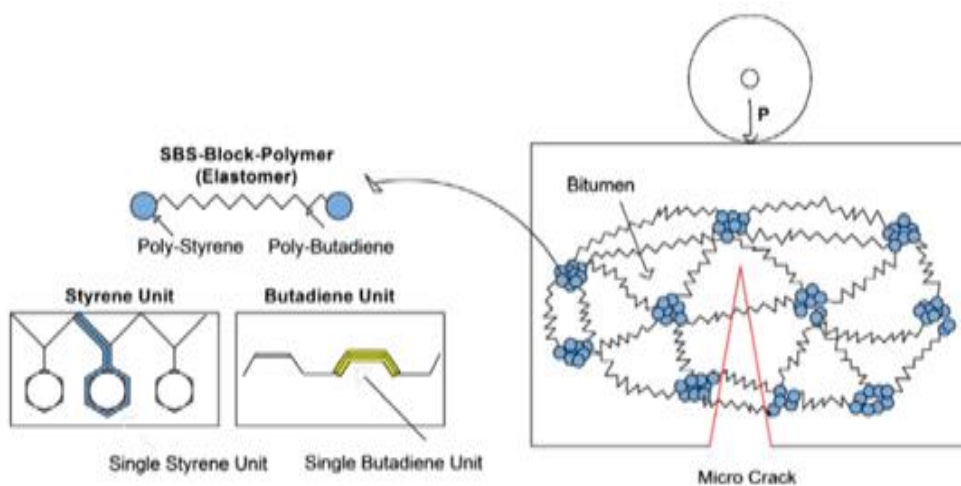
<sup>۲</sup> styrene-butadiene-styrene(SBS)

<sup>۳</sup> Healing Index

<sup>۴</sup> Indirect Tensile Tests (IDT)



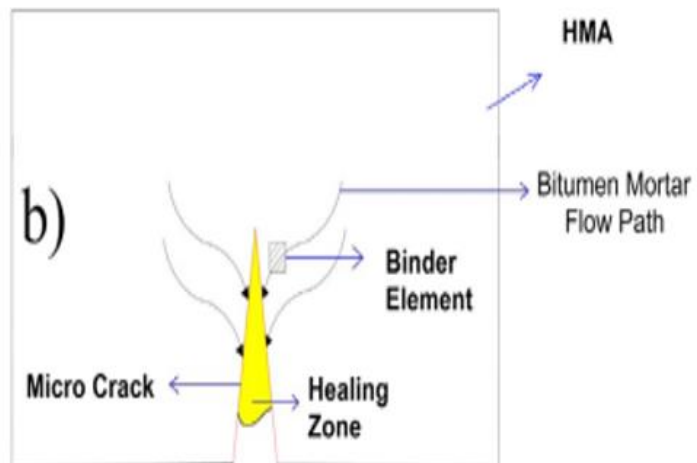
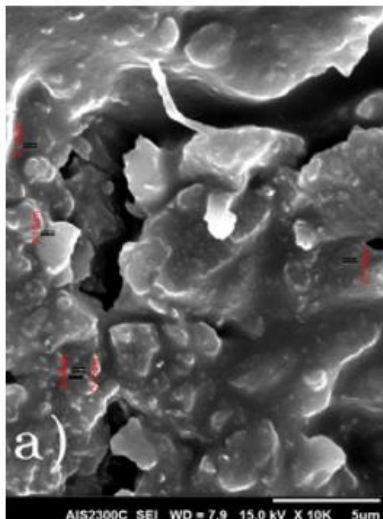
شکل ۲-۷ تصویر شماتیک تأثیر نانوذرات بر جاری شدن قیربه داخل ترک با استفاده از نیروهای گرانشی [۲۶]



شکل ۲-۸ تصویر شماتیک تأثیر استایرن - بوتادین - استایرن بر جلوگیری از گسترش ریز ترک [۲۶]



شکل ۲-۹ تصویر آزمایش کشش غیر مستقیم انجام گرفته بر روی نمونه ها [۲۶]



شکل ۲-۱۰ (a) تصویر اسکن میکروسکوپ الکترونی ترمیم ریز ترک باروان شدن قیر، (b)

تصویر شماتیک روان شدن قیر و جاری آن به داخل ریز ترک [۲۶]

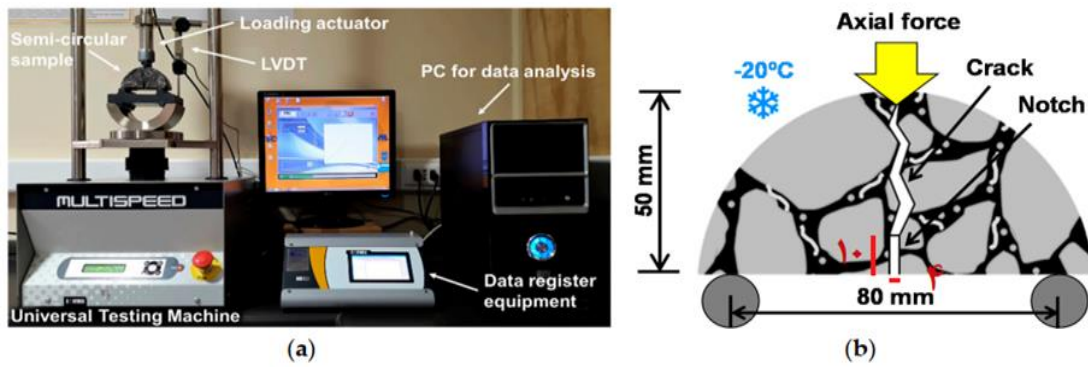
کانتریراس و توره (۲۰۱۷)؛ تأثیر پارامتر زمان گرمایش ماکروویو را بر خصوصیات خودترمیمی مخلوط های آسفالتی مورد ارزیابی و تحقیق قرار دادند. برای این منظور آن ها از الیاف فلزی<sup>۱</sup> با مقادیر ۰، ۲، ۴، ۶ و ۸ درصد در مخلوط ها استفاده کردند. همچنین از دستگاه ماکروویوی با توان ۷۰۰ وات و فرکانس ۲/۴۵ گیگا هرتز با طول موج ۱۲۰ میلیمتر در این پژوهش استفاده شده است. زمان های گرمایش هم ۱۰، ۲۰، ۳۰ و ۴۰ ثانیه انتخاب گردیده است. تمامی نمونه های استوانه ای مارشال برش خورده و به ۴ نمونه نیمه استوانه ای<sup>۲</sup> تبدیل شده اند. آزمایش مقاومت خمشی سه نقطه ای<sup>۳</sup> با دستگاهی با حداکثر توان ۵۰ کیلو نیوتن، نرخ بارگذاری ۰/۵ میلیمتر بر دقیقه و در دمای ۲۰- درجه سانتی گراد انجام گرفته است که کلیت این آزمایش و ابعاد نمونه های نیمه استوانه ای در شکل ۲-۱۱ نمایان می باشد. آن ها با مشاهده تصاویر سی تی اسکن سه بعدی از الیاف فلزی در درصد های مختلف دریافتند که استفاده از مقدار ۸ درصد موجب جمع شدگی تجمعی الیاف شده که باعث گرمایش بیش از حد نمونه در این نواحی می گردد (شکل ۲-۱۲). آن ها نتیجه گرفتند که بهترین زمان برای ترمیم ۴۰ ثانیه و بهینه ترین درصد الیاف فلزی، ۴ و ۶ درصد بوده است. همچنین مقدار عرض ترک در قبل و بعد از ترمیم به عنوان یک عامل تأثیرگذار بر میزان ترمیم مورد بررسی قرار گرفت، و یافته های شکل ۲-۱۳ نشان داد که زمان ۴۰ ثانیه بهترین عملکرد را در بسته شدن ترک ها داشته است [۲۷].

---

<sup>۱</sup> Steel Fiber

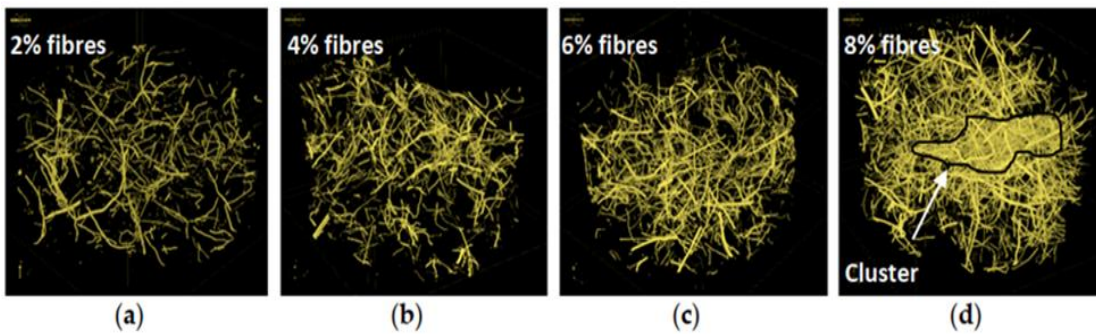
<sup>۲</sup> Semi-cylindrical specimen

<sup>۳</sup> Three-Point Bending (TPB)

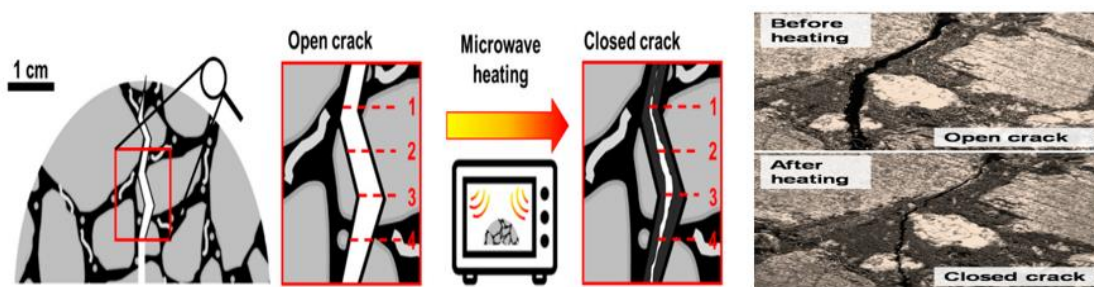


شکل ۲-۱۱ (a) ابزار آزمایش خمشی سه نقطه ای، (b) دیاگرام شماتیک ابعاد، نحوه شکست و

توزیع ترک در نمونه [۲۷]



شکل ۲-۱۲ تصاویر سی تی اسکن سه بعدی از الیاف فلزی در درصد های مختلف [۲۷]



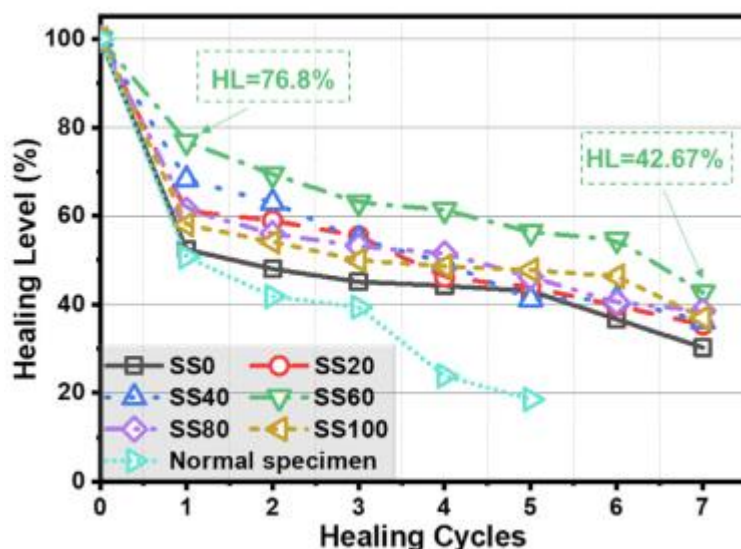
شکل ۲-۱۳ (چپ) دیاگرام شماتیک ترمیم ترک قبل و بعد ماکروویو، (راست) تصویر

میکروسکوپی ترمیم در ۴۰ ثانیه [۲۷]

## ۲-۷-۴ نوع و سایز سنگدانه ها

لو و همکاران (۲۰۲۰)؛ به منظور بررسی تأثیر نوع و اندازه ذرات سنگدانه بر خودترمیمی، مصالح سنگی مختلف آهکی، گرانیته، بازالتی و سرباره فولادی در سایزهای گوناگون را در ماکروویو با توان ۷۰۰ وات و فرکانس ۲/۴۵ گیگا هرتز قرار داده و در فواصل زمانی ۱۰ ثانیه ای میزان گرم شدن آن ها را توسط دوربین حرارتی مادون قرمز ارزیابی نمودند. با بررسی نتایج حرارتی، آن ها مشاهده کردند که سنگدانه های سرباره با سایز ۴/۷۵ - ۹/۵ میلیمتر بیشترین گرمایش را در زمان های مختلف داشته اند. پس از سرباره، مصالح بازالتی به صورت درشت دانه بیشترین جذب امواج ماکروویو و به تبع آن بالاترین نرخ گرمایش را از خود نشان داده اند. مصالح آهکی با اندازه ذرات ۴/۷۵ - ۹/۵ میلیمتر و مصالح گرانیته با اندازه ذرات ۱/۱۸ - ۲/۳۶ میلیمتر به ترتیب پس از ۲ مصالح مذکور از نظر گرمایشی قرار گرفته اند. با توجه به نتایج حاصله محققین برای یافتن بهترین درصد استفاده از سرباره فولادی با اندازه ذرات ۴/۷۵ - ۹/۵ میلیمتر، مقادیر ۰، ۲۰، ۴۰، ۶۰، ۸۰ و ۱۰۰ درصد این سایز را به صورت حجمی جایگزین مصالح آهکی نمودند به گونه ای که مصالح درشت دانه بزرگتر از ۹/۵ میلیمتر از مصالح بازالتی و بخش ریزدانه تماماً از مصالح آهکی انتخاب گردیده است. آزمایش خمش سه نقطه ای با نرخ بارگذاری ۰/۵ میلیمتر بر دقیقه در دمای ۲۰- درجه سانتی گراد بر روی نمونه های نیمه استوانه ای انجام شده است. نمونه ها بعد از گرمایش توسط امواج ماکروویو به مدت ۴ ساعت استراحت کرده و مجدداً به جهت آماده شدن برای آزمایش خمش سه نقطه ای به مدت ۲۴ ساعت در دمای ۲۰- درجه سانتی گراد قرار گرفته اند. این فرآیند به صورت ۷ چرخه (سیکل) تکرار گردیده است. با توجه میزان نرخ خودترمیمی ارائه شده در شکل ۲-۱۴ مشخص گردید که بهترین مقدار استفاده از سرباره، ۶۰ درصد بوده است [۲۸].





شکل ۲-۱۴ نمودار نرخ خودترمیمی در چرخه های مختلف برای مقادیر متنوع سرباره [۲۸]

## ۲-۷-۵ عرض ترک

یلدیز و آتاکان (۲۰۲۰)؛ تأثیر خاکستر بادی<sup>۱</sup> را به عنوان فیلر مخلوط آسفالتی بر بهبودی ویژگی

خودترمیمی مورد بررسی قرار دادند. مشخصات شیمیایی خاکستر بادی استفاده شده در جدول ۲-۲ مشاهده می شود.

جدول ۲-۲ ترکیبات شیمیایی خاکستر بادی (درصد) [۲۹]

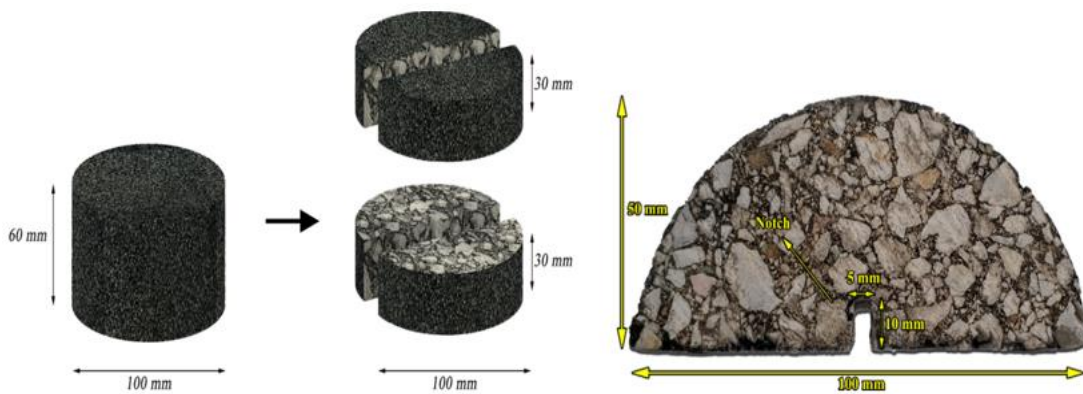
Components	Percentage	Components	Percentage
SiO <sub>2</sub>	46.6	Na <sub>2</sub> O	1.01
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	12.4	K <sub>2</sub> O	2.28
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	9.74	SO <sub>3</sub>	5.52
CaO	14.5	Ignition lost	1.08
MgO	7.23		

نوع مصالح سنگی در این پژوهش، سنگ آهک<sup>۲</sup> انتخاب شده است. مقدار وزنی فیلر از کل ۱۲۰۰ گرم مصالح سنگی، ۷۲ گرم بوده که در مخلوط کنترلی تمام این مقدار، فیلر آهکی و در مخلوط دیگر

<sup>۱</sup> Fly ash

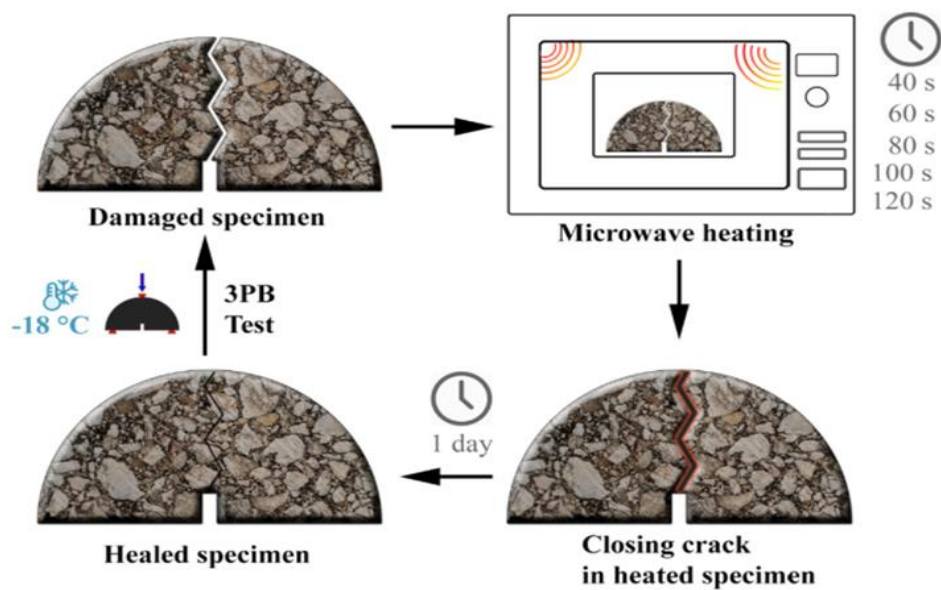
<sup>۲</sup> Lime stone

خاکستر بادی جایگزین شده است. نمونه های استوانه ای مارشال پس از ساخت، توسط دستگاه برش، به ۴ نمونه نیمه استوانه ای به منظور انجام آزمایش خمش سه نقطه ای تبدیل شدند (شکل ۲-۱۵). در این پژوهش به منظور فراهم نمودن گرمایش ماکروویو، دستگاهی با توان ۸۰۰ وات و فرکانس ۲۴۵۰ مگا هرتز بکار گرفته شده است. آزمایش خمش سه نقطه ای توسط دستگاهی با حداکثر توان ۵۰۰ کیلو نیوتن و نرخ بارگذاری ۰/۵ میلیمتر بر دقیقه و در دمای ۱۸- درجه سانتی گراد انجام گرفت. زمان های گرمایش ماکروویو ۴۰، ۶۰، ۸۰، ۱۰۰ و ۱۲۰ ثانیه انتخاب شده است. پس از گرمایش، همه نمونه ها به مدت ۱ روز تحت استراحت قرار گرفتند. یک فرآیند کامل سیکل ترمیم در شکل ۲-۱۶ آورده شده است. در این پژوهش رابطه عرض ترک و میزان ترمیم هم مورد تحلیل قرار گرفت. در نهایت آن ها به این نتیجه رسیدند که استفاده از خاکستر بادی به عنوان فیلر، نه تنها یک ماده جاذب امواج ماکروویو بوده، بلکه مطابق نمودار شکل ۲-۱۷ قابلیت ترمیم ترک هایی با عرض ۳۰۰ - ۱۰۰ میکرو متر در نمونه های آسفالتی را نیز دارد [۲۹].

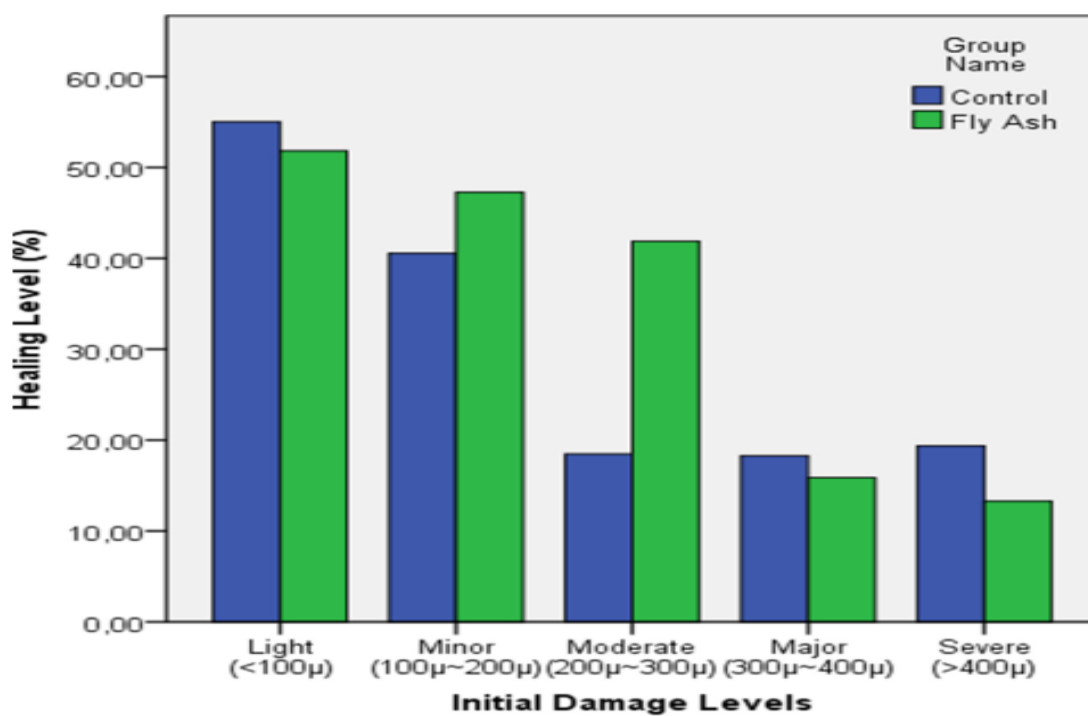


شکل ۲-۱۵ نمایی از تبدیل نمونه استوانه ای به ۴ نمونه نیمه استوانه ای با ابعاد شیار وسط

نمونه ها [۲۹]



شکل ۲-۱۶ نمایی از فرآیند ترمیم نمونه نیمه استوانه ای آسفالتی [۲۹]



شکل ۲-۱۷ نمودار نرخ ترمیم بر حسب عرض ترک برای هر دو نوع فیلر آهکی و خاکستر بادی [۲۹]

## ۲-۷-۶ طول ترک

لی و همکاران (۲۰۲۰)؛ به بررسی تأثیر همزمان میزان خرابی، نوع سنگدانه، دما و زمان بر عملکرد خودترمیمی مخلوط های آسفالتی پرداخته اند. آن ها برای بررسی تأثیر نوع سنگدانه، سرباره آهن گذاری<sup>۱</sup> را با نسبت های حجمی ۰، ۱، ۲ و ۴ درصد در کل سنگدانه ها جایگزین مصالح سنگی آهکی نموده اند. قیر مصرفی در این پژوهش با درجه نفوذ ۶۰-۷۰ بوده و از روش سوپریپو<sup>۲</sup> برای طرح اختلاط و تراکم نمونه های استوانه ای استفاده شده است. نمونه های استوانه ای آسفالتی برش داده شده و به نمونه های نیمه استوانه ای تبدیل گشته اند. به جهت بررسی میزان خودترمیمی، مطابق شکل ۲-۱۸ آزمایش خمش سه نقطه ای با سرعت بارگذاری ۵ میلیمتر بر دقیقه در دمای ۱۵ درجه سانتی گراد انجام گرفته است. محققین میزان (درجه) خرابی را به صورت طول ترک بر حسب درصد تعیین نموده اند که در این درجه بندی، طول ترک به ۳ مقدار ۳۰، ۵۰ و ۷۰ درصد تقسیم بندی شده است. در شکل ۲-۱۹ جزئیات آن مشاهده می گردد. شیوه گرمایش انتخابی در این مطالعه از نوع تابش فروسرخ<sup>۳</sup> بوده است. مطابق شکل ۲-۲۰ برای ایجاد این تابش از ۴ لامپ مادون قرمز در یک محفظه استفاده شده است. محفظه از خروج حرارت و اتلاف گرمای نمونه جلوگیری می کند. این فرآیند گرمایشی نسبت به روش امواج ماکروویو، شرایط محیطی را بهتر شبیه سازی می نماید. پس از بدست آمدن مقاومت خمشی اولیه نمونه ها، محققان به جهت ارزیابی تأثیر میزان دما و زمان ترمیم، دماهای ۴۰، ۵۰، ۶۰ و ۷۰ درجه سانتی گراد و زمان های ترمیم ۱۰، ۲۰ و ۳۰ دقیقه در نظر گرفته اند. با آزمایش مجدد خمش سه نقطه ای و محاسبه نرخ ترمیم تمامی نمونه ها مشخص شد که بهترین دما و زمان ترمیم به ترتیب ۶۰ درجه سانتی گراد و ۳۰ دقیقه بوده است. آن ها پی بردند که در دماهای بالاتر از ۶۰ درجه سانتی گراد مقدار

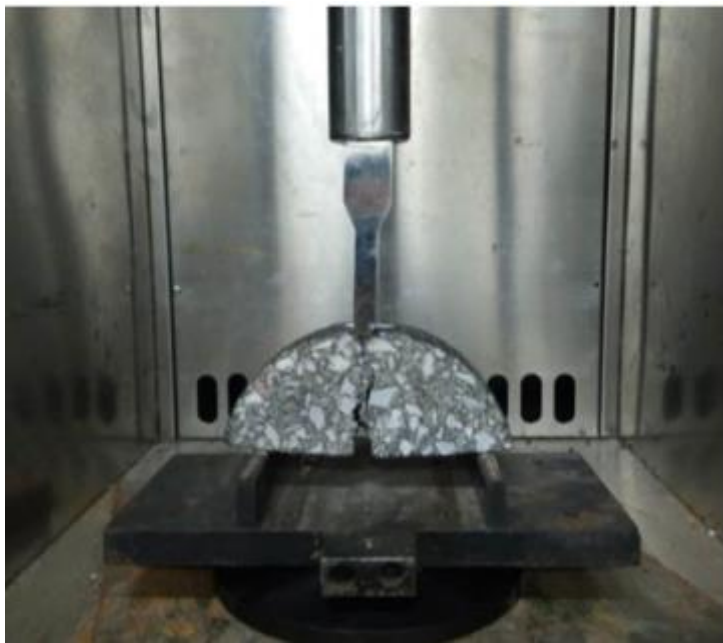
---

<sup>۱</sup> iron slag

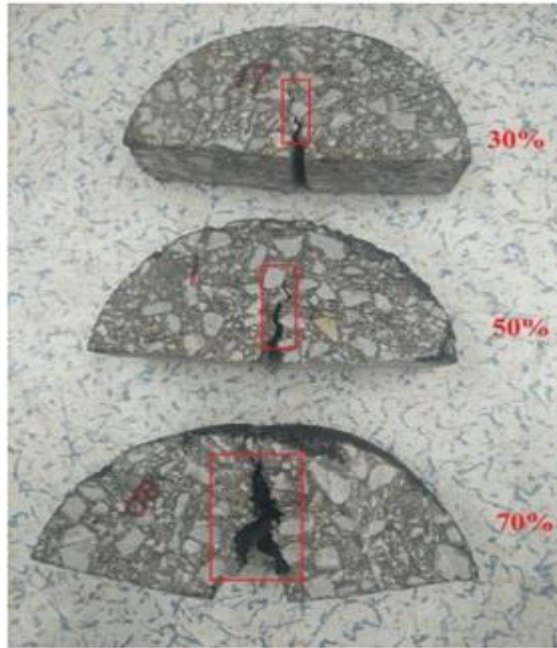
<sup>۲</sup> Superpave Method

<sup>۳</sup> Infrared radiation

ترمیم به دلیل پیرشدگی کاهش می‌یابد. زیرا پیرشدگی موجب افزایش سختی قیر و کاهش خاصیت روان‌شدگی آن می‌گردد. همچنین مشخص شد که طول ترک ۳۰ درصد، با مقدار ترمیم ۵۹/۲۴ درصد بالاترین نرخ خودترمیمی را به خود اختصاص داده است. از طرفی نمونه آسفالتی حاوی ۲ درصد سرباره بهترین عملکرد خودترمیمی را از خود نشان داده است. در نهایت هم برای یافتن تأثیرگذارترین عامل بر خودترمیمی از بین ۴ پارامتر مورد مطالعه در این تحقیق، از مدل آماری همبستگی استفاده گردید که نتایج آن در شکل ۲-۲۱ آورده شده است. طبق این نتایج بیشترین تأثیر را مقدار خرابی یا همان طول ترک داشته است و پس از آن به ترتیب دمای ترمیم، میزان استفاده از سرباره آهن‌گذاری و زمان ترمیم اثر گذار بوده اند [۳۰].



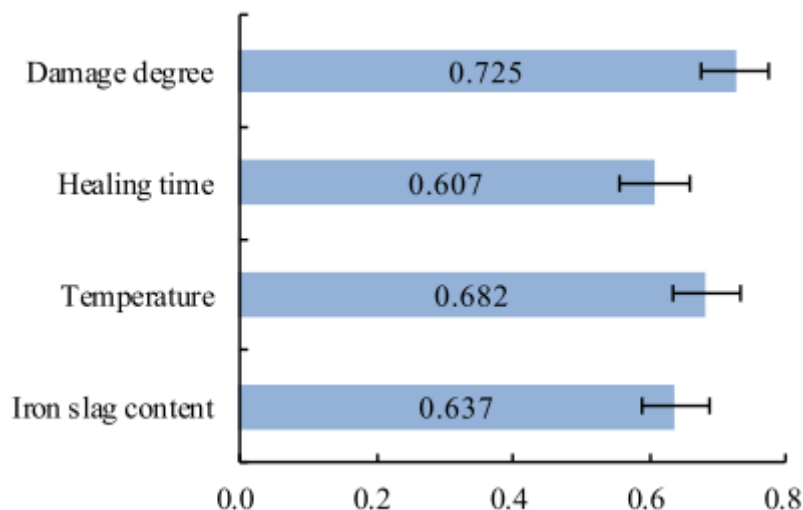
شکل ۲-۱۸ آزمایش خمش سه نقطه ای در دمای ۱۵ درجه سانتی‌گراد [۳۰]



شکل ۲-۱۹ تفکیک نمونه های نیمه استوانه ای بر اساس درصد طول ترک [۳۰]



شکل ۲-۲۰ محفظه گرمایش فرو سرخ به همراه ۴ لامپ مادون قرمز [۳۰]

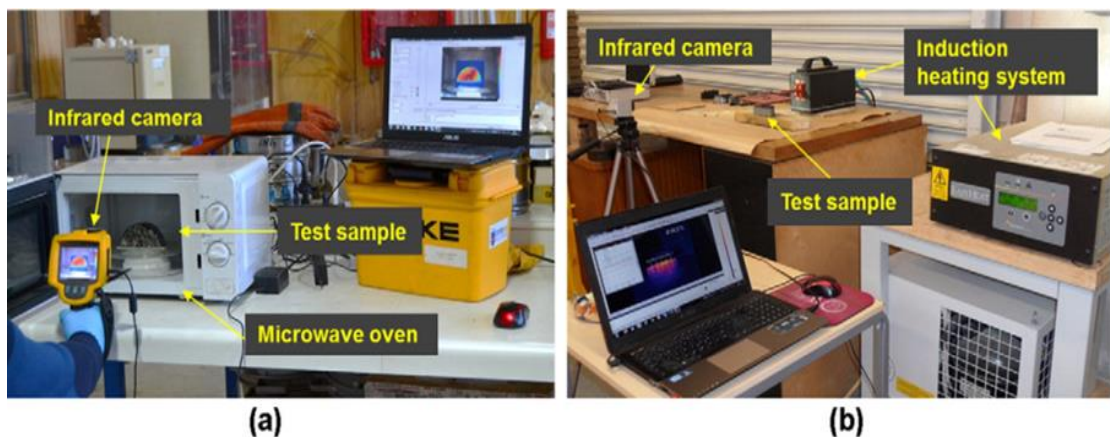


شکل ۲-۲۱ نتایج آزمون همبستگی برای تعیین میزان تأثیر هر یک از عوامل بر ترمیم [۳۰]

## ۲-۷-۷ نوع گرمایش

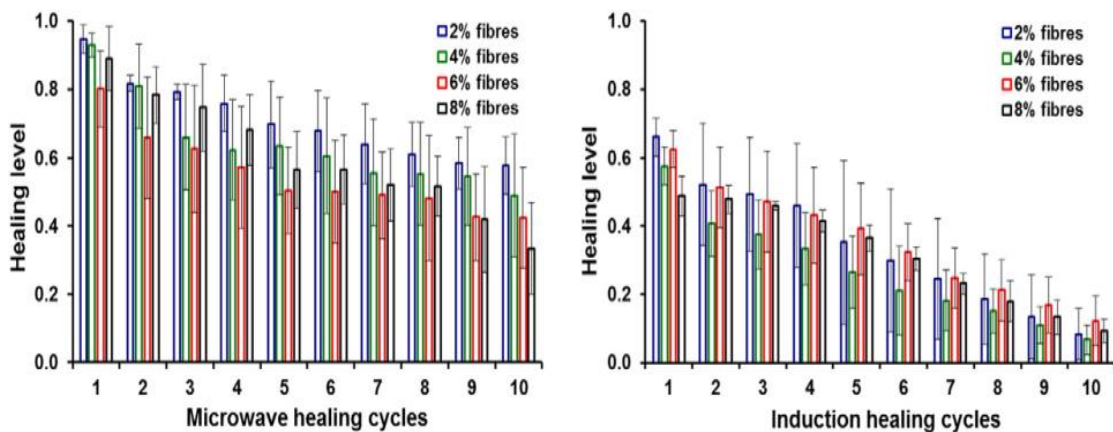
کانتریراس و گارسیا (۲۰۱۶)؛ تأثیر همزمان هر دو روش گرمایش تابش ماکروویو و القایی را بر روی خودترمیمی مخلوط های آسفالتی تحت ارزیابی قرار دادند. برای این منظور از الیاف فولادی در مقادیر ۰، ۲، ۴، ۶ و ۸ درصد استفاده شده است. نمونه های نیمه استوانه ای آسفالتی تحت آزمایش مقاومت خمشی سه نقطه ای با نرخ بارگذاری ۰/۵ میلیمتر بر دقیقه و در دمای ۲۰- درجه سانتی گراد قرار گرفته اند. برای تأمین منابع گرمایش؛ از یک عدد دستگاه ماکروویو با توان ۷۰۰ وات و فرکانس ۲/۴۵ گیگا هرتز با طول موج ۱۲۰ میلیمتر و از یک دستگاه القایی با توان ۶۰۰۰ وات و فرکانس ۳۵۰ کیلو هرتز استفاده شده است و دوربین مادون قرمز دمای نمونه ها را بعد از ۲۰، ۴۰، ۶۰، ۸۰، ۱۰۰ و ۱۲۰ ثانیه ثبت کرده است که چگونگی عملکرد این دو دستگاه به همراه تعیین دما توسط دوربین در شکل ۲-۲۲ مشاهده می گردد. طبق نتایج شکل ۲-۲۳ که مقادیر نرخ خودترمیمی را برای درصدهای مختلف الیاف فولادی در زمان ترمیم ۴۰ ثانیه ای برای هر دو شیوه گرمادهی نشان می دهد، مشخص گردید که امواج ماکروویو در ترمیم عملکرد بهتری داشته اند. محققین دلیل این موضوع را یکنواختی توزیع امواج ماکروویو در اطراف سطوح نمونه دانسته و بیان کرده اند که در روش القایی فقط قسمت هایی از نمونه که در مجاورت کوپل مغناطیسی قرار داشته اند، بیشتر گرم شده اند. همچنین آن ها در تفاوت بین این

دو شیوه گرمایشی اشاره کردند که در کوره القایی سنگدانه و قیر موجود در مخلوط آسفالتی به تنهایی و بدون افزودنی هیچ گونه گرمایی را جذب نمی‌کنند؛ در حالی که امواج ماکروویو قابلیت گرم نمودن مخلوط آسفالتی بدون افزودنی را به صورت محدود داشته و با اضافه کردن الیاف فرآیند گرمایش با سرعت بیشتری انجام می‌گیرد. با توجه به شکل ۲-۲۴ که میزان نرخ ترمیم بر حسب زمان های مختلف گرمایش به ازای ۴ درصد الیاف فولادی در ۵ سیکل را نشان می‌دهد، بهینه ترین زمان ترمیم، در روش ماکروویو ۴۰ ثانیه و در روش القایی ۸۰ ثانیه ارزیابی گردیده شد. در هر دو شکل ۲-۲۳ و ۲-۲۴ به وضوح دیده شد که با افزایش چرخه های ترمیم، میزان نرخ خودترمیمی در هر دو روش گرمایشی کاهش یافته است. تصاویر سی تی اسکن چند نمونه در قبل و بعد از گرمایش نشان دادند که این پدیده به خاطر تغییر در ساختار حفرات هوای نمونه اتفاق افتاده و مقادیر آن در برخی نقاط کاهش یا افزایش پیدا کرده است [۳۱].

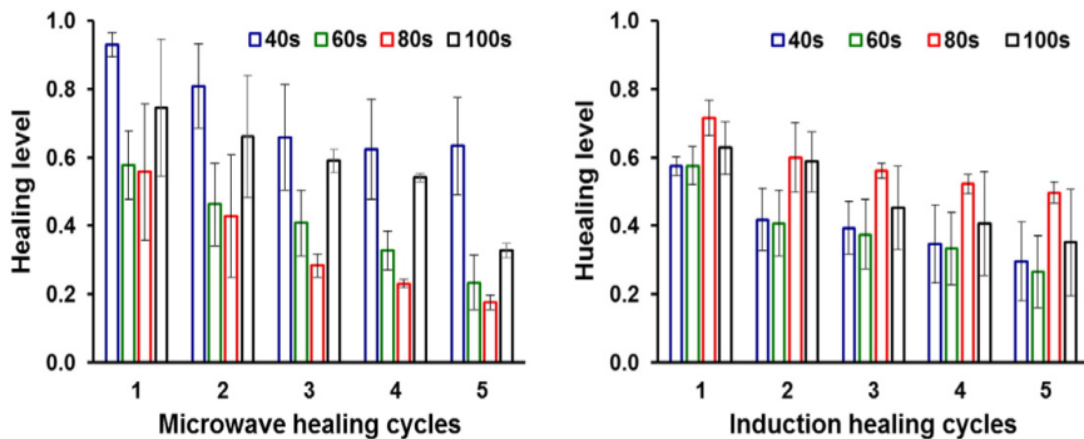


شکل ۲-۲۲ (a) ابزار دستگاه ماکروویو ، (b) ابزار دستگاه القایی [۳۱]





شکل ۲-۲۳ مقایسه مقادیر نرخ خودترمیمی در دو روش ماکروویو و القایی [۳۱]



شکل ۲-۲۴ مقایسه نرخ خودترمیمی بر حسب زمان های مختلف ترمیم به ازای ۴ درصد الیاف

فولادی در هر روش گرمادهی [۳۱]

یاماک و همکاران (۲۰۲۱)؛ تأثیر کپسول<sup>۱</sup> های دارای محتویات روغن های ضایعاتی<sup>۲</sup> را بر خودترمیمی ماستیک های آسفالتی<sup>۳</sup> مورد مطالعه قرار دادند. آن ها از پسماند روغن های گیاهی<sup>۴</sup> و

<sup>۱</sup> capsules

<sup>۲</sup> Waste oil

<sup>۳</sup> asphalt mastic

<sup>۴</sup> Waste vegetable oils

پسماند روغن‌های معدنی<sup>۱</sup> در ساخت کپسول‌ها استفاده کردند. منظور از روغن‌های گیاهی، روغن‌های آفتابگردان سوخته شده ناشی از پخت و پز و منظور از روغن‌های معدنی، روغن‌های سوخته ناشی از تعمیر و سرویس اتوموبیل‌ها بوده است. با انجام آزمایشات ویسکوزیته در ۲ دمای ۲۵ و ۴۰ درجه سانتی‌گراد مشخص گردید که ویسکوزیته مربوط به پسماند روغن‌های معدنی بیشتر از ویسکوزیته روغن‌های گیاهی پسماندی بوده است. در ساخت این کپسول‌ها از آلژینات سدیم<sup>۲</sup> که یک پلی‌ساکارید آنیونیک می‌باشد با مقادیر مختلف ۷/۵، ۱۰، ۱۵، ۱۷/۵ و ۲۲/۵ گرم استفاده گردیده است. مقادیر روغن پسماندی، آب و نسبت ترکیبی آن‌ها به جهت ساخت کپسول‌ها در جدول ۲-۳ نشان داده شده است.

جدول ۲-۳ مقادیر آب و روغن ضایعاتی به همراه نسبت آن‌ها در ساخت کپسول‌ها [۳۲]

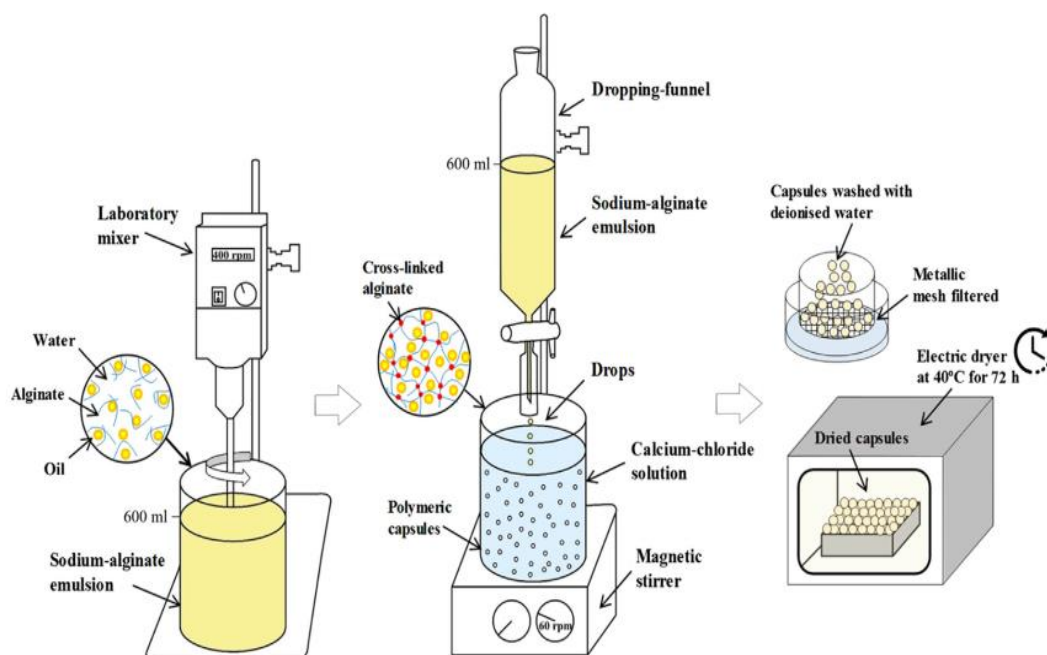
نسبت روغن آب	آب (میلی لیتر)	مقدار روغن پسماندی (میلی لیتر)
۰/۰۴	۵۷۵	۲۵
۰/۱	۵۵۰	۵۰
۰/۲	۵۰۰	۱۰۰
۰/۵	۴۰۰	۲۰۰
۱/۰	۳۰۰	۳۰۰

طبق شکل ۲-۲۵ به ازای هر یک از نسبت‌های روغن به آب در یک مخزن ۶۰۰ میلی‌لیتری آب به همراه روغن پسماندی ریخته شده و به مدت ۱ دقیقه با سرعت ۴۰۰ دور بر دقیقه با هم مخلوط شده‌اند. سپس مقادیر مختلف آلژینات سدیم به منظور ساخت کپسول‌های گوناگون به میکسر افزوده شده و عمل اختلاط به مدت ۱۰ دقیقه با سرعت ۴۰۰ دور بر دقیقه انجام گرفته تا عمل انحلال به طور کامل

<sup>۱</sup> waste mineral oils

<sup>۲</sup> sodium alginate (C<sub>6</sub>H<sub>7</sub>O<sub>6</sub>Na)

صورت گرفته باشد. در ۶۰۰ میلی لیتر آب، ۱۲ گرم کلسیم کلراید<sup>۱</sup> (۲ درصد) اضافه شده و عمل اختلاط با سرعت ۶۰ دور بر دقیقه انجام گرفته تا محلول کاملی به دست آید. سپس محلول آلژینات سدیم به همراه آب و روغن که از قبل تهیه شده است توسط قیف قطره چکان با دهانه ای به قطر ۳ میلی متر به صورت قطره در محلول کلسیم کلراید بدست آمده، چکانده شده است. در نهایت کپسول های آلژینات کلسیم ساخته شده در آب مقطر شسته و با قرار گیری در خشک کن الکتریکی به مدت ۷۲ ساعت در دمای ۴۰ درجه سانتی گراد، خشک شده اند.

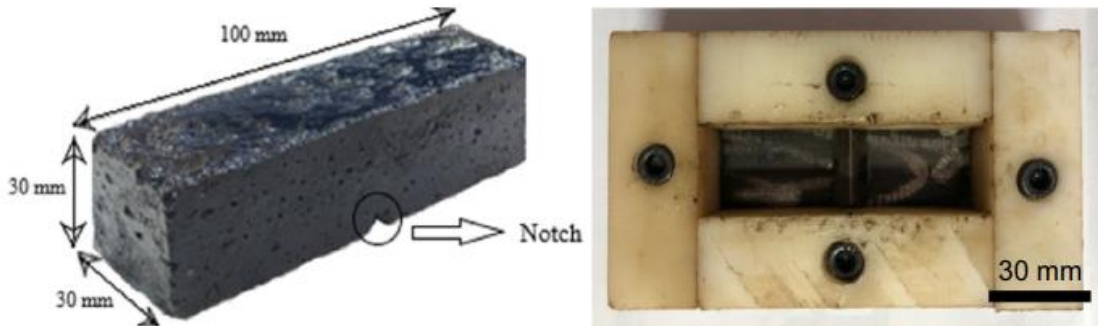


شکل ۲-۲۵ نمای شماتیک فرآیند تولید کپسول های آلژینات کلسیم [۳۲]

برای ساخت ماستیک آسفالتی قیر و سنگدانه به ترتیب ۱/۵ و ۳ ساعت در دمای ۱۸۰ درجه سانتی گراد قرار گرفته اند. ۸۵ درصد (۱۵۰ گرم) از ماستیک را سنگدانه و ۱۵ درصد (۲۶/۵ گرم) آن را قیر تشکیل داده است. پس از اختلاط قیر و سنگدانه به منظور ساخت ماستیک آسفالتی، کپسول های تهیه شده با مقادیر ۰/۲۵، ۰/۵، ۰/۷۵ و ۱/۰ درصد کل ماستیک، به آن اضافه شده اند. در نهایت مخلوط ماستیک آسفالتی آماده شده در یک قالب مستطیلی به ابعاد ۱۰۰×۳۰×۳۰ میلیمتر ریخته شده و یک

<sup>۱</sup> calcium chloride (CaCl<sub>2</sub>)

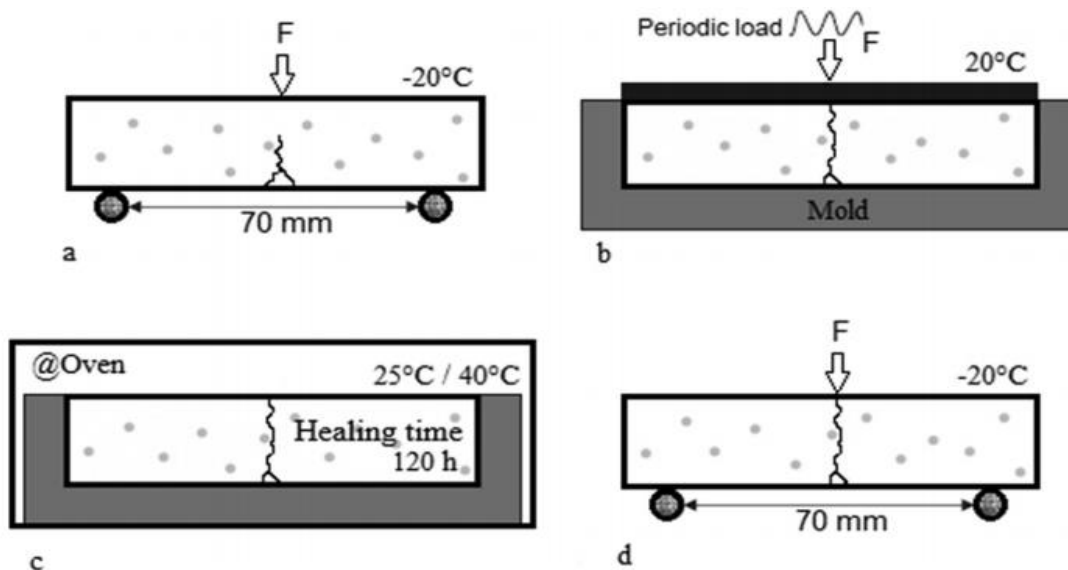
شیار مثلثی در وسط پایین نمونه تعبیه شده است. نمونه ها پس از خنک شدن در دمای محیط از درون قالب خارج گشته اند (شکل ۲-۲۶).



شکل ۲-۲۶ ابعاد نمونه ماستیک آسفالتی به همراه قالب ساخت آن [۳۲]

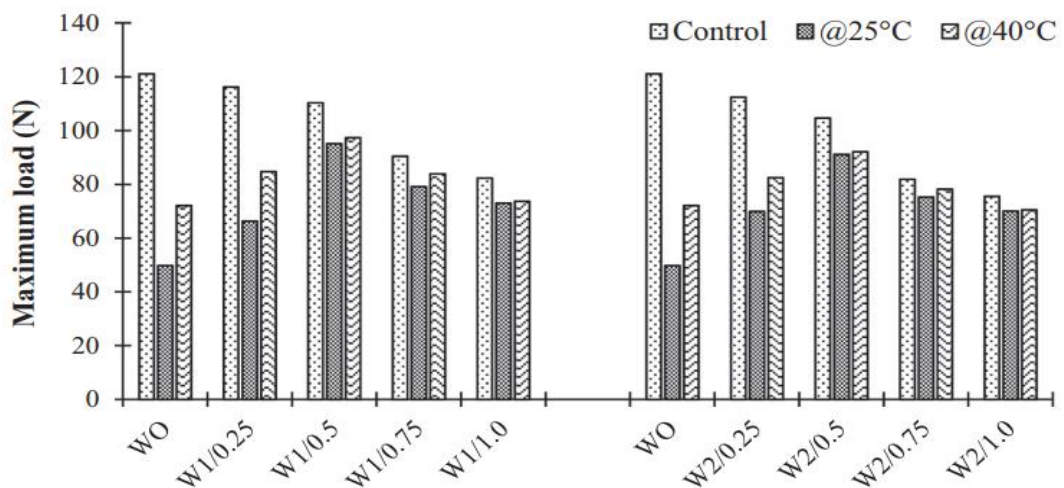
برای بررسی عملکرد خودترمیمی ماستیک های آسفالتی حاوی کپسول، تیر های آسفالتی به مدت حداقل ۴ ساعت در دمای ۲۰- درجه سانتی گراد قرار گرفته و سپس آزمایش خمش سه نقطه ای با سرعت بارگذاری ۳ میلیمتر بر دقیقه روی آن ها انجام گرفته است. اغلب کپسول ها در طی این فرآیند شکسته نشده اند. برای اطمینان از شکسته شدن کپسول ها و آزاد شدن روغن موجود در آن ها در تیر های ماستیکی که نقش جوانساز<sup>۱</sup> را دارند، این نمونه های تیری شکل ترک خورده مجدداً درون قالب قرار گرفته و به مدت ۲ ساعت در دمای ۲۰ درجه سانتی گراد تحت اعمال بار تک محوری سینوسی با فرکانس ۱ هرتز و نرخ ۳۵۰ دور بر دقیقه با حداکثر فشار تماسی ۶۰۰ کیلو پاسکال قرار گرفته اند. برای توزیع یکنواخت بار، روی نمونه یک صفحه فولادی قرار داده شده است. نمونه های برای رسیدن به ترمیم، به مدت ۱۲۰ ساعت در گرمخانه و در دمای ۲۵ و ۴۰ درجه سانتی گراد قرار داده شدند. به جهت تعیین میزان نرخ خودترمیمی، نمونه های ماستیک آسفالتی پس از طی فرآیند گرمایش، مجدداً به مدت ۴ ساعت در دمای ۲۰- درجه سانتی گراد قرار گرفته و آزمایش خمش سه نقطه ای روی آن ها انجام گرفته شد. چرخه کامل ترک - ترمیم در شکل ۲-۲۷ نشان داده شده است.

<sup>۱</sup> rejuvenating

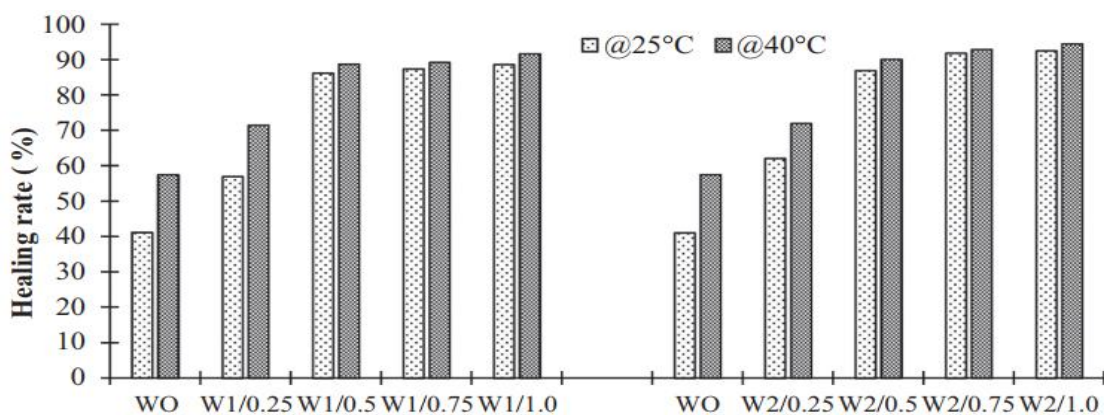


شکل ۲-۲۷ نمای کلی یک چرخه ترک - ترمیم در نمونه های ماستیک آسفالتی [۳۲]

طبق نتایج ارائه شده در شکل ۲-۲۸ و ۲-۲۹، محققین دریافتند که مخلوط هایی که حاوی حداقل ۰/۵ درصد کپسول جوانساز بوده اند، میزان نرخ خودترمیمی آن ها بیشتر از ۸۰ درصد بوده است. به طور کلی افزودن کپسول میزان ترمیم مخلوط های آسفالتی را افزایش داده و با بیشتر شدن درصد این کپسول ها، نرخ خودترمیمی نیز افزایش پیدا کرده است. دمای ۴۰ درجه سانتی گراد عملکرد ترمیم را بهتر نموده است. کپسول های حاوی پسماند روغن های معدنی ترمیم، عملکرد بهتری را از خود نشان داده اند. در نهایت آن ها پی بردند که کپسول های ساخته شده با ۵۰۰ میلی لیتر آب و ۱۰۰ میلی لیتر روغن پسماندی و ۱۷/۵ گرم آلزینات سدیم از منظر خودترمیمی بهترین بوده است [۳۲].



شکل ۲۸-۲ مقادیر بار حداکثری ماستیک های آسفالتی [۳۲]



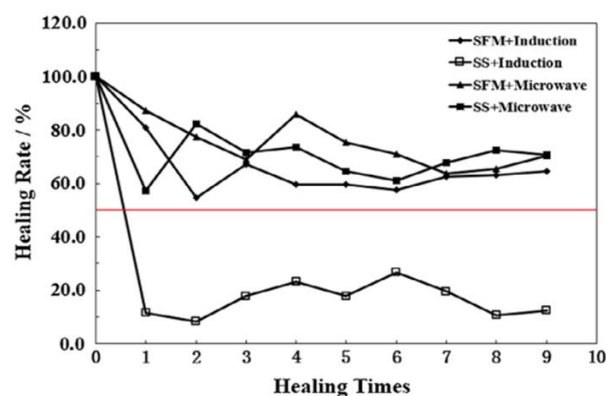
شکل ۲۹-۲ تغییرات نرخ خودترمیمی انواع مخلوط های آسفالتی [۳۲]

## ۲-۷-۸ میزان حرارت

سان و همکاران (۲۰۱۷)؛ عملکرد خودترمیمی مخلوط های آسفالتی داغ حاوی الیاف فولادی و سرباره را به صورت جداگانه مورد ارزیابی قرار دادند. برای گرمایش در این پژوهش از روش های گرمادهی امواج ماکروویو و کوره مغناطیسی القایی استفاده شده است. مصالح سنگی از نوع آندزیت<sup>۱</sup> بوده و سرباره نیز به صورت درشت دانه استفاده شده است. توان دستگاه ماکروویو ۸۰۰ وات و توان دستگاه القایی ۷۳۰۰ وات و فرکانس آن ۱۲۳ کیلو هرتز می باشد. آزمایش خمش سه نقطه ای با توان بار گذاری ۳۰۰

<sup>۱</sup> Andesite

نیوتن و نرخ بارگذاری ۱۰ نیوتن بر میلیمتر در دمای ۲۰- درجه سانتی گراد بر روی همه نمونه ها انجام گرفته و بعد از فرآیند گرمایشی، به نمونه ها ۲ ساعت استراحت داده شده است. بهترین دما برای ترمیم ۸۰ درجه سانتی گراد ارزیابی شده است. نتایج شکل ۲-۳۰ نشان داد که، گرمایش و به دنبال آن فرآیند ترمیم در روش ماکروویو نسبت به روش القایی به خصوص برای مخلوط های آسفالتی حاوی سرباره بهتر بوده است. اما ایجاد پدیده گرمایش بیش از حد<sup>۱</sup> به دلیل توزیع غیر یکنواخت افزودنی ها؛ همچنان یک مشکل اساسی در فرآیند ترمیم مخلوط های آسفالتی به ویژه در گرمایش به شیوه ماکروویو محسوب می گردد (شکل ۲-۳۱). به طور کلی کنترل دما در گرمایش به روش القایی آسان تر است. [۳۳].

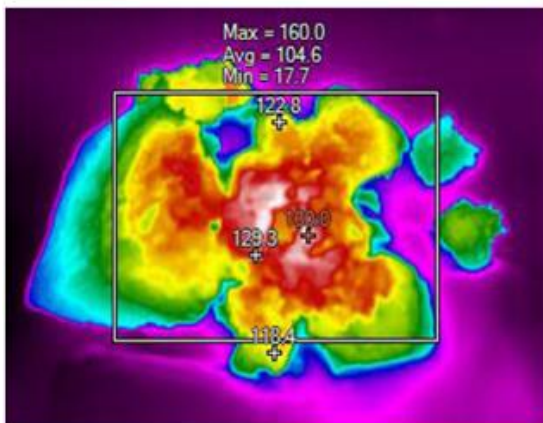


شکل ۲-۳۰ نرخ ترمیم انواع مخلوط های حاوی سرباره و الیاف فولادی با هر دو روش

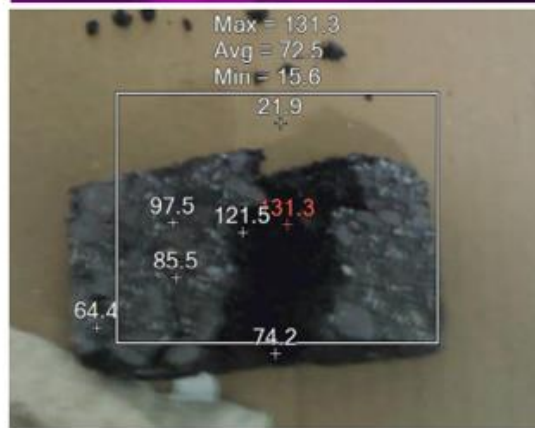
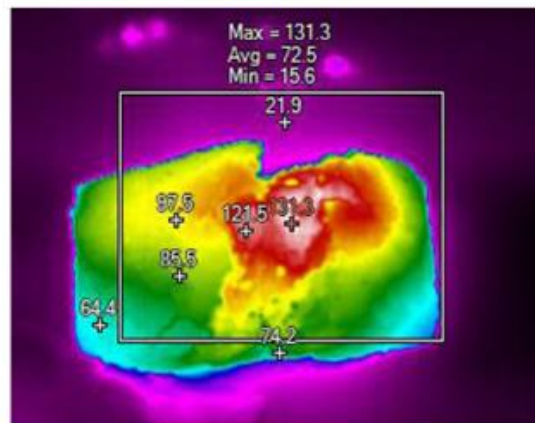
گرمایشی [۳۳]

<sup>۱</sup> overheating

Steel fiber modified asphalt mixture



Steel slag asphalt mixture



شکل ۲-۳۱ گسیختگی مخلوط های آسفالتی به دلیل گرمایش بیش از حد پس از ۱۲۰ ثانیه

گرمایش ماکروویو [۳۳]

## ۲-۸ سر باره

### ۲-۸-۱ مقدمه

از آن جایی که حدود ۸۵ الی ۹۰ درصد وزنی مخلوط های آسفالتی را مصالح سنگدانه ای تشکیل می دهد، بنابراین برای احداث جاده ها به حجم بسیار زیادی از مصالح سنگی نیاز است که عمدتاً از کوه ها و یا بستر رودخانه ها تأمین می گردد. تداوم این امر می تواند خطرات جدی برای محیط زیست در بر داشته باشد. استفاده از مواد ارزان تر و در عین حال مقاوم که بتوانند جایگزین مصالح آسفالتی باشند نه تنها به کاهش مستقیم هزینه ها کمک می کند بلکه با افزایش طول عمر روسازی به پایین آمدن هزینه های تعمیر و نگهداری نیز منجر می شود. از این گونه موارد جایگزین، می توان به سر باره های فولاد که



محصول جانبی و دور ریز کارخانه های ذوب فلزات می باشند اشاره کرد [۳۴].

## ۲-۸-۲ تعریف سرباره

سرباره ها معمولاً موادی هستند که در فرآیند ذوب فلزات به دست آمده و با توجه به نوع فلز مربوطه و شیوه عملیات تولیدی؛ دارای خصوصیات فیزیکی و شیمیایی گوناگونی می باشند. شناخته شده ترین و رایج ترین نوع سرباره، به هنگام تولید چدن در جریان ذوب سنگ آهن در حرارت ۱۲۵۰ تا ۱۵۵۰ درجه سانتی گراد بر اثر فعل و انفعالات بین مواد گدازآور، قشر معدنی سوخت و ناخالصی های اکسیدی موجود در فلز به وجود آمده و با توجه به ترکیبات شیمیایی ناخالصی ها؛ حالت اسیدی یا بازی پیدا می کند [۳۵].

## ۲-۸-۳ انواع سرباره

در سرباره ها بر اساس نوع روش ذوب و نحوه سرد کردن؛ خواص مختلفی ایجاد می شود که زمینه استفاده از آن ها را متفاوت خواهد کرد. به همین دلیل سرباره ها بر اساس کوره های ذوب به انواع گوناگونی تقسیم بندی می شوند که معروف ترین آن ها عبارتند از:

- سرباره های کوره بلند آهن گدازی<sup>۱</sup>
- سرباره های فولادی<sup>۲</sup>

## ۲-۸-۳-۱ سرباره کوره بلند آهن گدازی

این نوع از سرباره ها در طی فرآیند ساخت آهن خام (چدن) به دست آمده و دارای خصوصیات پوزولانی است که می توان از آن به عنوان جایگزین درصدی از سیمان در ساخت بتن استفاده کرد [۳۴].

---

<sup>۱</sup> Blast Furnace slag

<sup>۲</sup> Steel Slag

## ۲-۸-۳-۲ سرباره فولادی

در حقیقت سرباره فولاد، سنگدانه مصنوعی سخت، متراکم، مقاوم در برابر سایش، تمیز و تقریباً به رنگ سیاه می‌باشد، که از محصولات جانبی کارخانه جات فولاد سازی بوده و طی فرآیند ذوب فولاد به دست می‌آید. سرباره های ذوب شده در کوره در یک محوطه باز ریخته شده تا به حالت جامد تبدیل شوند [۳۶].

مشخصات فیزیکی این ماده نظیر؛ چگالی، میزان تخلخل و سایز ذرات با توجه سرعت و روش خنک سازی سرباره و همچنین ترکیبات شیمیایی آن نشأت می‌گیرد. به طور مثال؛ سرباره ای که عملیات خنک سازی آن با استفاده از آب انجام گرفته در مقایسه با سرباره ای که با هوا سرد شده، از تخلخلی بالاتر و میزان مقاومت ساییدگی کمتری برخوردار می‌باشد. سرباره عموماً ترکیبی از اکسید های آهن، منیزیم، آلومینیوم، سیلیکات و کلسیم است. سرباره حاصل از کوره های فولاد سازی، معمولاً در هوای آزاد سرد شده و در ظاهر خصوصیتی مشابه با سنگ های آذرین دارد [۳۶].

در شکل ۲-۳۲ نمونه ای از سنگدانه های سرباره فولادی در چند سایز مشاهده می‌گردد.



شکل ۲-۳۲ سرباره فولادی در چند سایز مختلف [۳۵]

## ۲-۸-۴ انواع سرباره های فولادی

سرباره های فولادی بر اساس نوع کوره ای که در آن تولید شده به سه دسته کلی زیر تقسیم بندی

می شوند :

● کوره قوس الکتریکی<sup>۱</sup>

● کوره اکسیژن - بازی<sup>۲</sup>

● کوره شعله ای<sup>۳</sup>

عملکرد کوره های مختلف در شیوه گرمایش و ذوب مشابه هم هست و فقط تفاوت هایی جزئی با هم دارند. ولی کوره قوس الکتریکی و کوره اکسیژن - بازی دو روش اصلی مورد استفاده به منظور تولید آهن خالص و فولاد می باشند. از آن جایی که عناصر غیر ضروری بسیاری که در سنگ آهن موجود هستند، مانند کربن و سیلیکون باید از فولاد مذاب جداسازی شوند و این کار توسط آهنک انجام می شود، بنابراین آهنک نقش بسیار مهمی را در هر دو نوع کوره ایفا می کند. در جهان؛ اکثر کارخانه جات تولید فولاد از روش کوره اکسیژن - بازی استفاده می کنند. اما در ایران؛ هر دو نوع کوره در تولید فولاد مورد استفاده قرار می گیرد [۳۷].

## ۲-۸-۴-۱ سرباره کوره قوس الکتریکی

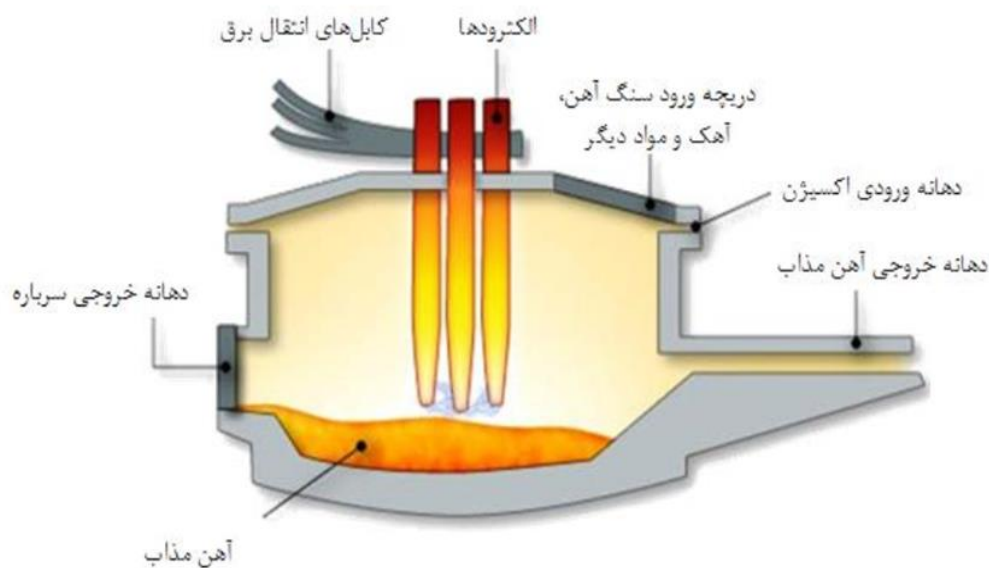
در این نوع کوره؛ آهن اسفنجی همراه با آهن قراضه و ضمن افزایش درجه خلوص فولاد پس جداسازی سرباره، مذاب باقی مانده در پاتیل های بزرگ به واحد های ریخته گیری منتقل می شوند. همچنین در این نوع از کوره ها، که در شکل ۲-۳۳ دیده می شود از جریان ولتاژ بالای تأمین شده توسط الکتروود های گرافیتی، به منظور تولید گرما به جهت ذوب سنگ آهن استفاده شده است [۳۴].

---

<sup>۱</sup> Electric Arc Furnace (EAF)

<sup>۲</sup> Basic Oxygen Furnace (BOF)

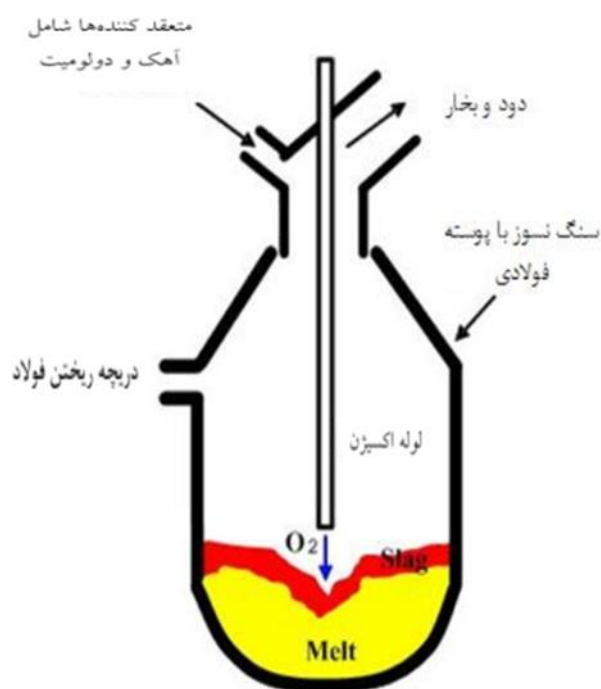
<sup>۳</sup> Open Hearth Furnace (OHF)



شکل ۲-۳۳ نمایی از عملکرد کوره قوس الکتریکی [۳۴]

## ۲-۸-۴-۲ سرباره کوره اکسیژن - بازی (کنورتور)

نظریه کاربرد اکسیژن تحت فشار روی فلز مذاب با وجود سرباره، توسط پرفسور روبرت دور سوئیسی برای اولین بار مطرح گردید و یک کنورتور سه تنی آزمایشی برای این منظور در سال ۱۹۴۷ ساخته شد و در سال ۱۹۴۸ در حدود یک تن فولاد به این صورت تولید گردید. بر اساس این آزمایش، یک کنورتور دو تنی نیز در لینز واقع در اتریش ساخته شد و اولین فولاد محصول آن به شکل موفقیت آمیزی در ۲۵ ژوئن ۱۹۹۴ به دست آمد. در این روش گاز اکسیژن تحت فشار، پس از عبور از داخل لوله ای که با آب سرد می‌شود، روی بار کنورتور وارد شده و آن را تصفیه می‌کند. طبق شکل ۲-۳۴ لوله اکسیژن به حالت قائم؛ در داخل کنورتور تا فاصله معینی از سطح فلز مذاب پایین آورده می‌شود. فشار اکسیژن عامل نفوذ آن به درون فلز مذاب و نیز سرباره شده و آن را متلاطم می‌نماید. آهک اضافه شده به کنورتور با ناخالصی های فلز مذاب، نظیر فسفر و گوگرد ترکیب شده و سرباره ای را تشکیل می‌دهد. این سرباره که به شکل کف است از روی سطح فلز مذاب جمع شده و سپس به کمک پاتیل حمل به داخل حوضچه هایی تخلیه می‌شود. در نهایت هم با پاشیدن آب بر روی این سرباره ها، آن ها را خنک و سرد می‌نمایند [۳۸].



شکل ۲-۳۴ نمایی از عملکرد کوره اکسیژنی [۳۴]

## ۲-۸-۴-۳ کوره شعله ای

آهن قراضه همراه با سنگ آهک به درون این نوع کوره ریخته شده و برای تولید ۳۰۰ تن فولاد، ۵ تا ۱۴ ساعت زمان لازم است. این در حالی است که، تولید همین میزان فولاد در کوره اکسیژن - بازی، ۴۵ دقیقه طول می کشد [۳۴].

## ۲-۸-۵ دلایل مهم کاربرد سرباره فولادی

حدوداً به ازای تولید هر یک تن فولاد، ۱۵۰ تا ۲۰۰ کیلوگرم سرباره فولاد تولید می گردد. از آن جایی که حجم تولید این محصول بسیار بالا است، لذا می تواند از نظر آلایندگی مشکلات فراوانی را ایجاد نماید. علاوه بر سرباره؛ گرد و غبار، لجن و پوسته های اکسیدی نیز به عنوان محصولات فرعی دیگر تولید شده در کارخانه جات فولاد سازی قابل ذکر هستند، اما سرباره همچنان به جهت میزان تولید بسیار بالاتر نسبت به سایر محصولات، بیشتر مورد توجه بوده است. با افزایش روز افزون تولید فولاد در عصر کنونی؛ دپو های بزرگی از سرباره در مجاورت کارخانه ها احداث شده، به گونه ای که

گاهی وسعت این دپو ها از مساحت خود کارخانه بیشتر است. این حجم عظیم سرباره از منظر محیط زیست یک تهدید بالقوه محسوب می‌شود. از آن جایی که دفن و امحای این میزان از ضایعات، به محدوده‌ی وسیعی از اراضی نیاز دارد که متأسفانه گاهی هم منجر به تغییر کاربری اراضی کشاورزی و منابع طبیعی می‌گردد، به همین خاطر می‌تواند صدمات جبران ناپذیری را به محیط زیست وارد نماید. مسأله دیگری که به یک دغدغه بسیار بزرگ برای دوستداران محیط زیست تبدیل شده است؛ موضوع وجود بعضی از فلزات سنگین در ترکیبات این پسماند است. زیرا به هنگام آمدن باران؛ آب حاصل از شسته شدن سرباره ها، حاوی برخی فلزات سنگین است که ورود این آب به منابع آب زیرزمینی می‌تواند یک تهدید خطرناک به حساب آید. همچنین همین عامل باران با آهک آزاد موجود در ترکیب این محصول؛ می‌تواند PH خاک ها را نیز تغییر دهند. علاوه بر این معضلات زیست محیطی که این پسماند ایجاد می‌کند، داشتن ویژگی های بارز مثبتی نظیر؛ وزن مخصوص بالا، گوشه داری، مقاومت ساییدگی بالا، بافت سطحی زبر که نسبت به مصالح سنگی طبیعی؛ مزایایی برای سرباره محسوب می‌گردد، باعث شده که این محصول ضایعاتی مورد توجه مهندسان عمران به ویژه مهندسين راهسازی قرار گیرد. به طور مثال، دو ویژگی بافت سطحی زبر و بالا بودن مقاومت ساییدگی سرباره، نشان می‌دهد که استفاده از آن در مناطقی که در معرض سایش بیشتری هستند؛ نظیر نواحی نزدیک به چهارراه ها و یا قوس های افقی، می‌تواند بسیار کاربردی باشد. همچنین ممکن است که گاهی منابع قرضه مصالح سنگی موجود در منطقه محدود باشد، که در این صورت به منظور حفظ منابع طبیعی، جلوگیری از ایجاد صدمات جبران ناپذیر به محیط زیست و نیز کاهش هزینه ها؛ موضوع جایگزینی مصالح، به خصوص مصالح بازیافتی، می‌تواند نقش بسزایی را بر عهده داشته باشد. به طور خلاصه و در قالب جمع بندی، عواملی نظیر تولید بسیار بالا، قیمت ارزان، هزینه های زیاد مربوط به نگهداری و انبار داری و همچنین حفظ و کاهش آلودگی های محیط زیست؛ انگیزه ها را برای بازیافت و استفاده مجدد از سرباره بالا برده است [۳۴].

امروزه در بسیاری از کشورهای توسعه یافته، نظیر انگلستان، آمریکا، استرالیا و بسیاری دیگر از کشورهای اروپایی؛ به طور میانگین حدود دو سوم از حجم سرباره تولیدی خود را بازیافت می‌کنند. به طور مثال، در سال‌های اخیر انگلستان ۱۰۰ درصد سرباره تولید شده‌ی خود را بازیافت کرده که از این مقدار ۹۸ درصد آن به عنوان سنگدانه در صنایع بتن و آسفالت استفاده می‌شود [۱۴]. همچنین در حال حاضر، چین از میزان ۱۷ میلیون تن سرباره تولیدی خود، ۸۰ درصد آن را مجدد استفاده کرده و تنها ۲۰ درصد را به صورت انباشته نگهداری می‌نماید [۳۹].

## ۲-۸-۶ کاربرد های رایج سرباره فولادی

رایج ترین کاربرد های سرباره فولادی، استفاده از آن در صنایع بتن و آسفالت می‌باشد که هر کدام را به صورت جداگانه مورد بررسی قرار می‌دهیم.

### ۲-۸-۶-۱ ساخت بتن

استفاده از سرباره در ساخت بتن بر اساس خاصیت پوزولانی به دو صورت خواهد بود. اگر سرباره خاصیت پوزولانی داشته باشد به صورت جایگزین نمودن بخشی از سیمان استفاده شده و اگر این خاصیت را دارا نباشد، به عنوان سنگدانه در ساخت بتن استفاده خواهد شد [۳۴].

### ۲-۸-۶-۲ ساخت آسفالت

استفاده از مصالح بازیافتی نظیر سرباره؛ به صورت جایگزین نمودن با مصالح طبیعی در صنعت راهسازی امری کاملاً رایج است. استفاده در لایه زیر اساس، لایه اساس و رویه های آسفالتی مانند، آسفالت سطحی و روکش آسفالتی از جمله موارد کاربرد این محصول در این صنعت می‌باشد. از آن جایی که استفاده از سرباره به خصوص در رویه های آسفالتی باید مورد تأیید آیین نامه ها و مقررات مربوطه قرار گیرد لذا باید تمامی خصوصیات و ویژگی های آن مورد تحقیق و بررسی قرار بگیرد. بنابراین در این قسمت می‌خواهیم با مروری بر تحقیقات پیشین؛ با برخی از مشخصات و موارد استفاده از این

محصول ضایعاتی، بیشتر آشنا شویم.

## ۲-۸-۷ مروری بر کارهای گذشته

### ۲-۸-۷-۱ بررسی برخی از خصوصیات سرباره فولادی

#### ۲-۸-۷-۱-۱ مشخصات فیزیکی و مکانیکی

سنگدانه های سرباره فولادی به لحاظ ظاهری تیز گوشه بوده و بافت سطحی زبری<sup>۱</sup> دارند. وزن مخصوص این مصالح به خاطر حضور اکسید فلزات سنگین در ترکیبات آن ها، از مصالح دیگر بیشتر است. همچنین از مهم ترین خصوصیات مکانیکی اینگونه سرباره ها می توان به زاویه داری<sup>۲</sup> بسیار خوب، سختی<sup>۳</sup> بالا، مقاومت بالا در برابر سایش<sup>۴</sup> و نیز بالا بودن مقاومت در برابر فشار و ضربه اشاره کرد؛ که تمامی این موارد نشان دهنده برتری این مصالح نسبت به مصالح طبیعی است [۴۰]. در جدول ۲-۴ به برخی از مشخصات فیزیکی سرباره فولادی و دیگر مصالح اشاره شده است.

جدول ۲-۴ مقایسه مشخصات فیزیکی سرباره فولادی با برخی دیگر از مصالح [۴۴]

مصالح طبیعی	سنگ بازالت	سرباره فولاد	خصوصیات
۲/۸ - ۲/۶	۲/۸	۳/۷ - ۳	چگالی حقیقی ( $\text{gr/cm}^3$ )
۱-۴	۱/۹	۳	جذب آب (%)
۱۸۰۰ - ۱۶۰۰	۱۵۲۰	۲۰۰۰ - ۱۷۰۰	وزن مخصوص ( $\text{Kg/m}^3$ )
-	۲۸	۱۱ - ۵	ضریب تورق (%)

<sup>۱</sup> Rough surface texture

<sup>۲</sup> Angularity

<sup>۳</sup> Stiffness

<sup>۴</sup> Abrasion resistance



## ۲-۸-۷-۱-۲ خصوصیات شیمیایی

داشتن فهم کاملی از ترکیبات شیمیایی سرباره فولادی می‌تواند، به بررسی مناسب بودن استفاده از آن در مخلوط آسفالتی کمک نماید. ترکیبات شیمیایی سرباره عموماً شامل اکسیدهای آهن، سیلیسیوم، منیزیم، آلومینیوم، تیتانیوم، کلسیم و منگنز می‌باشد. نسبت این ترکیبات با تفاوت در منبع ماده اولیه یا نوع کوره، تغییر می‌کند. حتی در یک کارخانه و با مواد اولیه و نوع کوره یکسان، بر اساس مقدار کربن فولاد تولیدی ترکیبات شیمیایی سرباره می‌تواند تغییر کند. به طور مثال، برای تولید فولاد کم کربن به اکسیژن، آهک و دولومیت بیشتری نیاز است و برای تولید فولاد پر کربن این نسبت معکوس می‌شود. که این تفاوت‌ها هم در ترکیبات شیمیایی سرباره‌ها تغییر ایجاد می‌کند [۴۱].

موضوع بسیار مهمی که در استفاده از سرباره باید مورد توجه قرار گیرد، حضور آهک آزاد<sup>۱</sup> و اکسید منیزیم<sup>۲</sup> در ترکیبات شیمیایی آن است. به این دلیل که آهک آزاد و اکسید منیزیم تمایل زیادی به هیدراته شدن<sup>۳</sup> دارند. نتیجه فرآیند هیدراته شدن نیز انبساط حجمی است. به همین خاطر؛ هیچگاه استفاده مستقیم سرباره فولادی به خصوص در مخلوط‌های آسفالتی توصیه نشده است. چون به محض رسیدن رطوبت به این دو ترکیب، هیدراته شده و تا ۱۰ درصد افزایش حجم پیدا می‌کنند. برای جلوگیری از مشکلات ناشی از انبساط حجمی؛ باید عملیات هیدراتاسیون در طی یک فرآیند هوازدهی انجام گیرد. به همین جهت، سرباره‌های فولادی را در هوای آزاد قرار داده، تا با رطوبت ناشی از بارش به صورت طبیعی یا با پاشیدن آب بر روی آن‌ها به شیوه مصنوعی فرآیند هیدراتاسیون صورت گیرد. این فرآیند ممکن است که تا ۱۲ ماه هم طول بکشد [۱۵، ۴۱].

جدول ۲-۵، به ترکیبات شیمیایی ۲ نوع سرباره حاصل از کوره اکسیژنی و قوس الکتریکی که در

---

<sup>۱</sup> Free – CaO (f-CaO)

<sup>۲</sup> MgO

<sup>۳</sup> Hydration

تعدادی از مقالات آورده شده است، به طور خلاصه اشاره دارد. همین طور که ملاحظه می‌گردد؛ میزان درصد آهک آزاد در سرباره های BOF بیشتر است.

جدول ۲-۵ مقایسه ترکیبات شیمیایی دو نوع سرباره فولادی در تعدادی از مقالات

Steel Slag type	CaO	MgO	SiO <sub>2</sub>	FeO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MnO	TiO <sub>2</sub>	Ref.
EAF	۲۵/۶	۷/۵	۱۸/۷	۳۵/۲	-	۲/۸	۰/۳۰	۱/۶	[۴۲]
EAF	۳۹/۴	۵/۷	۱۷/۳	-	۲۵/۳	۴/۲	-	-	[۴۳]
EAF	۲۹/۷	۱/۰	۱۶/۵	-	۲۵/۹	۲۶/۷	-	-	[۴۴]
EAF	۲۱/۸	۴/۴	۱۵/۰	-	۴۱/۶	۹/۰	۳/۶	۰/۷	[۴۵]
BOF	۴۴/۳	۵/۹	۱۳/۵	-	۲۰/۸	۲/۵	-	-	[۴۶]
BOF	۴۱/۳	۶/۹	۱۵/۶	۲۰/۰	-	۲/۲	۸/۹	۰/۵	[۴۷]
BOF	۴۲/۷	۵/۱۹	۱۹/۲	-	۲۳/۹	۳/۲۵	۱/۷۷	-	[۴۸]

مطلب دیگری که به خصوصیات شیمیایی سرباره فولادی مربوط می‌شود، PH آن می‌باشد. حضور اکسید کلسیم و نیز اکسید منیزیم در ترکیبات سرباره، باعث شده که این ماده ماهیتی بازی داشته باشد و مقدار PH آن بین ۸ - ۱۰ گزارش شده است. از طرف دیگر، به طور کلی PH قیر کمتر از ۷ می‌باشد که این نشان دهنده ماهیت اسیدی این ماده است. بنابراین اسیدی بودن ماهیت قیر و بازی بودن ماهیت سرباره فولادی باعث می‌شود که چسبندگی بین این دو تا حدودی بهبود یابد [۴۹].

نگرانی دیگری که در استفاده از سرباره فولادی وجود دارد، این است که به هنگام برش قطعات بزرگ سرباره و تبدیل آن‌ها به سنگدانه های ریز، یک لایه از مواد سیلیکاتی روی سنگدانه ها را پوشش داده و به هنگام قرارگیری سرباره در شرایط مرطوب؛ رسوبات کربنات کلسیم<sup>۱</sup> تشکیل می‌گردد. تشکیل این لایه نازک رسوبی موجب تضعیف چسبندگی بین سنگدانه های سرباره و قیر می‌شود. برای جلوگیری از

<sup>۱</sup> CaCO<sub>3</sub>

ایجاد چنین مشکلی به خصوص زمانی که از سرباره به صورت ریزدانه استفاده می‌شود، توصیه شده است که با موتور های جت آب<sup>۱</sup> فشار قوی برای زدودن این لایه استفاده گردد [۱۵، ۱۷].

## ۲-۸-۷-۱-۳ ویژگی های حرارتی

توانایی حفظ دما و نرخ سرد شدن؛ دو ویژگی حرارتی اصلی مصالح سنگی است که بر میزان افت دما در طی فرآیند های ساخت و حمل مخلوط های آسفالتی داغ تأثیر می‌گذارد. این ویژگی ها با اندازه گیری ثابت های رسانایی گرمایی<sup>۲</sup> و انتشار حرارتی<sup>۳</sup> ارزیابی می‌گردد. مصالحی که نرخ سرد شدن سریع دارند از این نظر مناسب نیستند. زیرا مخلوط های ساخته شده با چنین سنگدانه هایی ممکن است به دلیل افت سریع دما، به خصوص در شرایط آب و هوایی سرد، زمان کافی برای عملیات تراکم را نداشته باشند [۱۷].

لیو و همکاران (۲۰۱۷)؛ خصوصیات حرارتی مخلوط آسفالتی را با اندازه گیری ثابت های گرمایی با استفاده از ابزار لیزر حرارتی؛ ارزیابی نموده‌اند. آن ها مشاهده کردند که سنگدانه های سرباره فولادی در مقایسه با سنگدانه های طبیعی برای مدت زمان طولانی تری؛ گرما را در خود حفظ می‌کنند. دلیل این امر هم به خاطر وجود تعداد زیاد منافذ و حفرات در ساختار سرباره است که با مانع شدن از انتقال گرما، منجر به کاهش رسانایی گرمایی و نفوذ حرارتی می‌شود. در نتیجه این خصوصیات باعث می‌گردد که مخلوط آسفالتی حاوی سرباره فولادی، برای حفظ دمای مطلوب در حین فرآیند های ساخت، تراکم و حمل؛ انرژی گرمایی کمتری مصرف نماید [۵۰].

## ۲-۸-۷-۲ انواع کاربرد های سرباره فولادی در مخلوط آسفالتی

کاووسی و قاضی زاده (۲۰۱۴)؛ مشاهده کردند که بر اساس روش طراحی مارشال، جایگزینی ۲۵،

---

<sup>۱</sup> Water jets

<sup>۲</sup> Thermal conductivity

<sup>۳</sup> Thermal diffusivity

۵۰، ۷۵ و ۱۰۰ مصالح درشت دانه سرباره فولادی از نوع EAF با مصالح آهکی، مقدار قیر بهینه را از ۴/۶ درصد در مخلوط کنترلی به ۵/۲ درصد در مخلوط با ۱۰۰ درصد جایگزینی درشت دانه، افزایش داده است. همچنین مقدار قیر بهینه در مخلوطی که تماماً با سرباره ساخته شده بود؛ ۵/۷ درصد گزارش شده است. همچنین آن‌ها نتیجه گرفتند، که جایگزینی سرباره فولادی، استقامت مارشال<sup>۱</sup> و فضای خالی مصالح سنگی<sup>۲</sup> را افزایش داده است. اما روند مشخصی را برای مقدار روانی<sup>۳</sup> مشاهده نکردند [۵۱].

پاستو و بالدو (۲۰۱۱)؛ پی بردند که با جایگزینی ۰، ۳۰، ۶۰ و ۹۰ درصد سرباره فولادی نوع EAF با مصالح آهکی در بخش درشت دانه، مقدار قیر از ۴/۹ درصد در مخلوط کنترل به ۵/۳ درصد در مخلوط با ۹۰ درصد جایگزینی افزایش یافته است. همچنین آن‌ها مشاهده کردند که استفاده از سرباره، با افزایش استقامت مارشال و چگالی و نیز کاهش مقدار روانی همراه است [۵۲].

مسعودی و همکاران (۲۰۱۷)؛ با جایگزینی ۱۰۰ درصد بخش درشت دانه مصالح آهکی با سرباره فولادی در مخلوط آسفالتی، مشاهده کردند که هر ۴ عامل مقدار قیر بهینه، استقامت مارشال، مقدار روانی و وزن مخصوص حقیقی افزایش پیدا کرده است [۴۳].

گلی و همکاران (۲۰۱۷)؛ ۴ نوع مخلوط به شرح زیر طراحی نمودند :

(۱) مخلوط شماره ۱ : سرباره فولادی (درشت دانه و ریزدانه) ← مقدار قیر = ۵/۲ درصد

(۲) مخلوط شماره ۲ : سرباره فولادی (درشت دانه)، مصالح آهکی (ریزدانه) ← مقدار قیر = ۴/۶ درصد

(۳) مخلوط شماره ۳ : مصالح آهکی (درشت دانه و ریزدانه) ← مقدار قیر = ۴/۳ درصد

(۴) مخلوط شماره ۴ : سرباره فولادی (ریزدانه)، مصالح آهکی (درشت دانه) ← مقدار قیر = ۴/۷ درصد

آنها مشاهده نمودند که جایگزینی سرباره با افزایش مقدار قیر همراه است. جایگزینی در بخش ریزدانه نسبت به درشت دانه، درصد قیر را کمی بیشتر نموده است [۴۲].

<sup>۱</sup> Marshall Stability

<sup>۲</sup> Void Mineral Aggregate (VMA)

<sup>۳</sup> Flow value

فان و همکاران (۲۰۱۸)؛ بیان کردند که چون سنگدانه های سرباره فولادی، ساختاری متخلخل دارند، بنابراین با استفاده ی آن ها در مخلوط آسفالتی به طور طبیعی مقدار قیر افزایش پیدا می کند. حال برای آن که هزینه های تولید به دلیل مصرف بیشتر قیر به صورت غیر منطقی زیاد نشود، جایگزینی ۱۰۰ درصد سرباره به جای مصالح طبیعی هیچگاه توصیه نمی گردد. از طرفی به دلیل آن که مصرف قیر در جایگزینی بخش ریزدانه نسبت به درشت دانه بیشتر خواهد بود، لذا در بیشتر پژوهش ها از جایگزین نمودن این بخش صرف نظر شده است [۵۳].

با توجه به بررسی چند مقاله اخیر می توان بیان نمود که جایگزین نمودن سرباره فولادی (درشت دانه و ریزدانه) به جای مصالح طبیعی با افزایش مقدار قیر، استقامت مارشال، وزن مخصوص و VMA همراه بوده، اما در مورد تغییرات مقدار روانی مارشال نمی توان اظهار نظر قطعی نمود [۱۷].

## ۲-۸-۷-۳ تأثیر سرباره فولادی بر زمینه های عملکردی آسفالت

### ۲-۸-۷-۳-۱ مقاومت اصطکاکی<sup>۱</sup>

سطح روسازی باید از اصطکاک کافی و مناسبی برخوردار باشد، تا بتواند مقاومت در برابر لغزش وسایل نقلیه را فراهم نموده و از وقوع تصادفات مرگبار جلوگیری نماید. مقاومت اصطکاکی بین سطح راه و لاستیک ها ایجاد می شود. پژوهش های صورت گرفته در هر دو سطوح آزمایشگاهی و میدانی، نشان داده اند که مخلوط آسفالتی حاوی سرباره در مقایسه با مخلوط های آسفالتی داغ مرسوم، مقاومت اصطکاکی مشابه یا حتی بهتری داشته است [۱۷].

آسی (۲۰۰۷)؛ خصوصیات مقاومت اصطکاکی مخلوط های آسفالتی ساخته شده با مصالح سنگی آهنکی و سرباره فولادی را با هم مقایسه کرده است. گزارش شد که مخلوط آسفالتی با ۳۰ درصد سرباره فولادی نسبت به مخلوط کنترلی از مقاومت اصطکاکی بالاتری برخوردار بوده است [۵۴].

---

<sup>۱</sup> Skid resistance

شن و همکاران (۲۰۰۹)؛ ۰، ۲۵، ۵۰، ۷۵ و ۱۰۰ درصد از سرباره فولادی نوع BOF را جایگزین بخش درشت دانه کردند. آن ها پی بردند که با افزایش میزان درصد سرباره در مخلوط آسفالتی، مقاومت اصطکاکی نیز افزایش می یابد [۱۶].

## ۲-۸-۷-۳-۲ شیارشدگی

عموماً مقاومت شیارشدگی مخلوط های آسفالتی در روش های طراحی آزمایشگاهی، بر مبنای روانی مارشال در روش طراحی مارشال و حداکثر تعداد ژیراتوری<sup>۱</sup> در روش سوپریپو<sup>۲</sup>، مورد ارزیابی قرار می گیرد. محققین معمولاً عملکرد شیارشدگی را با آزمایشاتی نظیر مدول دینامیکی و چرخ دینامیکی هامبورگ<sup>۳</sup> توصیف نموده اند. مقالات متعددی نشان داده اند که با جایگزینی سرباره فولادی، عملکرد شیارشدگی مخلوط آسفالتی بهبود یافته است [۱۷].

عاملیان و همکاران (۲۰۱۸)؛ برای ارزیابی مقاومت شیارشدگی مخلوط های آسفالتی از آزمایشات بارگذاری محوری چرخه ای و چرخ دینامیکی هامبورگ استفاده کردند. آن ها مشاهده کردند که با جایگزینی بخش درشت دانه مصالح آهکی با سرباره فولادی نوع BOF، عملکرد شیارشدگی بهتر شده است [۵۵].

گلی و همکاران (۲۰۱۷)؛ مشاهده کردند که با جایگزینی بخش درشت دانه مخلوط آسفالتی با سرباره فولادی به جای مصالح آهکی، مقاومت شیارشدگی بهتر شده است. اما آن ها دریافتند که جایگزینی بخش ریزدانه سرباره، عملکرد شیارشدگی را نسبت به مخلوط آسفالتی مصالح آهکی، ضعیف تر نموده است. همچنین پی بردند که جایگزینی ۱۰۰ درصد مصالح آهکی با سرباره؛ بدترین عملکرد شیارشدگی را در بین تمامی مخلوط ها داشته است [۴۲].

---

<sup>۱</sup> N<sub>max</sub>

<sup>۲</sup> Superpave method

<sup>۳</sup> Hamburg Wheel Track (HWT)

ون و همکاران (۲۰۱۶)؛ با جایگزینی ۰، ۲۰، ۴۰ و ۶۰ درصد سرباره فولادی به جای مصالح بازالتی در مخلوط آسفالتی و انجام آزمایش چرخ دینامیکی هامبورگ مشاهده نمودند که مخلوط های دارای ۴۰ و ۶۰ درصد سرباره، کاهش چشمگیری در عمق شیار در آب ۵۰ درجه سانتی گراد داشته اند [۱۸].

## ۲-۸-۷-۳-۳ خستگی

تکرار بار چرخ های وسایل نقلیه موجب تشکیل ترک های ریزی در آسفالت شده که با توسعه و انتشار این ترک ها و به هم پیوستن آن ها، خرابی خستگی ایجاد می شود. خستگی از مهم ترین خرابی های روسازی انعطاف پذیر است. در سطح آزمایشگاهی مقاومت در برابر ترک خوردگی خستگی را با آزمایشاتی نظیر؛ خمش ۴ نقطه ای<sup>۱</sup>، خستگی کشش غیر مستقیم<sup>۲</sup> و کشش غیر مستقیم<sup>۳</sup> ارزیابی می کنند.

کاووسی و قاضی زاده (۲۰۱۴)؛ با جایگزینی سرباره فولادی EAF به جای مصالح آهکی به صورت درشت دانه با نسبت های ۲۵، ۵۰، ۷۵ و ۱۰۰ درصد و انجام آزمایش خمش ۴ نقطه ای با فرکانس ۱۰ هرتز و در دمای ۲۰ درجه سانتی گراد، نتیجه گرفتند که عمر خستگی با افزایش درصد جایگزینی سرباره، افزایش می یابد. اما با این وجود آن ها مشاهده کردند که، مخلوط آسفالتی ساخته شده با ۱۰۰ درصد سرباره (ریزدانه و درشت دانه) عملکرد خستگی ضعیف تری نسبت به جایگزینی فقط در بخش درشت دانه داشته است [۵۱].

زی و همکاران (۲۰۱۳)؛ با استفاده از سرباره فولادی BOF در بخش درشت دانه، به جای مصالح بازالتی و انجام آزمایش خستگی کشش غیر مستقیم، مشاهده کردند که عمر خستگی افزایش پیدا کرده است. همچنین آن ها پی بردند که رطوبت، مقاومت خستگی را کاهش می دهد، که با این وجود باز هم

---

<sup>۱</sup> Four-Point Bending Test

<sup>۲</sup> Indirect Tension Fatigue Test (ITFT)

<sup>۳</sup> Indirect Tension Test (IDT)

مخلوط های سرباره ای عملکرد بهتری را از خود نشان داده اند [۵۶].

پاستو و بالدو (۲۰۱۱)؛ با استفاده از سرباره فولادی نوع EAF با مقادیر ۳۰، ۶۰ و ۹۰ درصد به جای مصالح آهکی، مشاهده کردند که با افزایش درصد جایگزینی، مقاومت در برابر شکست خستگی نیز افزایش پیدا کرده است. آن ها دلیل این برتری را ویژگی گوشه داری بالای سنگدانه های سرباره که باعث چسبندگی بهتر با قیر می شود، بیان کردند [۵۲].

گلی و همکاران (۲۰۱۷)؛ سرباره فولادی EAF را در سه حالت فقط درشت دانه، کل مصالح (درشت دانه و ریزدانه) و فقط ریزدانه جایگزین مصالح آهکی نمودند. آن ها مشاهده کردند که نه تنها عمر خستگی با جایگزینی درشت دانه کاهش پیدا کرده بلکه این کاهش در حالت جایگزینی کل مصالح بیشتر هم شده است. همچنین آن ها پی بردند که ضعیف ترین عملکرد خستگی مربوط به جایگزینی قسمت ریزدانه سرباره بوده است [۴۲].

آسی و همکاران (۲۰۰۷)؛ به منظور ارزیابی عمر خستگی مخلوط آسفالتی حاوی سرباره، مقادیر ۲۵، ۵۰، ۷۵ و ۱۰۰ درصد از این مصالح را به جای مصالح آهکی استفاده کردند. آن ها به طور کلی نتیجه گرفتند که استفاده از سرباره، عمر خستگی را نسبت به مصالح آهکی افزایش می دهد. اما آن ها مشاهده کردند که با افزایش میزان درصد سرباره، مقاومت خستگی کاهش پیدا می کند [۵۷].

## ۲-۸-۷-۳-۴ حساسیت رطوبتی

خرابی رطوبتی یکی از مهم ترین چالش هایی است که تمامی فعالان عرصه راهسازی با آن رو به رو هستند. خرابی رطوبتی به دلیل ضعف در چسبندگی قیر و سنگدانه و یا پیوستگی ضعیف قیر در مخلوط آسفالتی به دلیل حضور رطوبت اتفاق می افتد. پژوهشگران برای ارزیابی حساسیت رطوبتی مخلوط های آسفالتی از آزمایشاتی نظیر نسبت استقامت مارشال<sup>۱</sup>، نسبت مقاومت کششی<sup>۲</sup> (شاخص حساسیت

<sup>۱</sup> Retained Marshall Stability (RMS)

<sup>۲</sup> Tensile Strength Ratio (TSR)



رطوبتی) ، نسبت مدول بر جهندگی<sup>۱</sup>، آب جوشان<sup>۲</sup> و ... استفاده کرده اند [۱۷]. در ادامه به بررسی تعدادی مقاله پیرامون عملکرد سرباره فولادی در حساسیت رطوبتی می‌پردازیم.

حسامی و همکاران (۲۰۱۵)؛ سرباره فولادی نوع EAF را در قسمت های درشت دانه، ریزدانه و کل مصالح (ریزدانه و درشت دانه) جایگزین مصالح آهکی نمودند. برای ارزیابی حساسیت رطوبتی از ۴ شاخص؛ نسبت استقامت مارشال، نسبت مقاومت کششی، نسبت مدول بر جهندگی و نسبت انرژی شکست<sup>۳</sup> استفاده نمودند. آن ها مشاهده کردند که افزودن سرباره مقاومت در برابر خرابی رطوبتی را کاهش می‌دهد. همچنین آن ها نشان دادند که جایگزین نمودن بخش درشت دانه کمترین کاهش و بخش ریزدانه بیشترین مقدار کاهش را در کلیه معیار ها داشته است [۵۸].

امیری و همکاران (۲۰۱۳)؛ در سه بخش ریزدانه، درشت دانه و کل مصالح، سرباره فولادی EAF را به جای مصالح طبیعی آهکی استفاده کردند. برای ارزیابی حساسیت رطوبتی نیز از آزمایش لاتمن اصلاح شده<sup>۴</sup> استفاده شد. طبق نتایج شکل ۲-۳۵ آن ها بیان کردند که، جایگزین کردن سرباره به صورت درشت دانه و کل مصالح (ریزدانه و درشت دانه)، شاخص TSR را نسبت به مصالح تمام آهکی کاهش داده در حالی که بخش ریزدانه با افزایش همراه بوده است [۵۹].

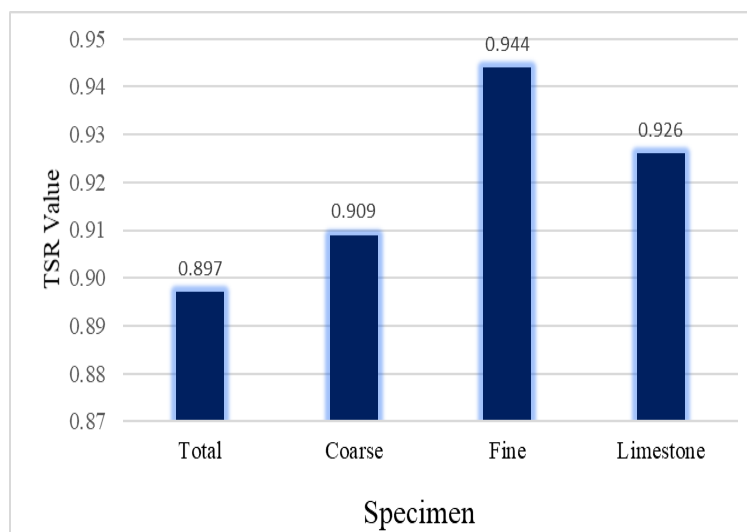
---

<sup>۱</sup> Resilient Modulus Ratio (RMR)

<sup>۲</sup> Boiling water test

<sup>۳</sup> FractureEnergyRatio(FER)

<sup>۴</sup> Modified Lottman test



شکل ۲-۳۵ نمودار تغییرات شاخص TSR در نمونه های مختلف سرباره و مصالح آهکی [۵۹]

عاملیان و همکاران (۲۰۱۸)؛ به منظور ارزیابی حساسیت رطوبتی مخلوط های آسفالتی از ۴ نوع مصالح سنگدانه ای سنگ آهکی، گرانیت، کوارتزیت و سرباره فولادی نوع BOF استفاده کردند. استفاده از سرباره به صورت جایگزینی بخش درشت دانه به جای مصالح آهکی بوده است. نتایج حاصل از آزمایش لاتمن اصلاح شده نشان داد که مخلوط آسفالتی حاوی سرباره بیشترین مقاومت را برابر حساسیت رطوبتی در بین تمامی نمونه های داشته است. نتایج آزمایش آب جوشان نیز نتیجه گیری فوق را تأیید کرده است [۵۵].

چن و وی (۲۰۱۶)؛ دریافتند که جایگزینی بخش درشت دانه سرباره فولادی نوع BOF به جای مصالح آهکی، شاخص TSR را به میزان ۱۰/۳ درصد افزایش داده که نشان دهنده بهبودی مقاومت در برابر خرابی رطوبتی می باشد [۶۰].

## ۲-۹ گل قرمز

### ۲-۹-۱ مقدمه

آلومینیوم سومین عنصر فراوان در پوسته زمین بوده که در میان فلزات، بیشترین نرخ رشد مصرف را در طی سه دهه اخیر داشته است. آلومینیوم فلزی بسیار کاربردی در صنایع مختلف است. آلومینیوم

از سنگ معدن بوکسیت استخراج می‌شود. بوکسیت یک ماده معدنی غنی از مواد آلی است که در نتیجه هوازدگی سنگ های مختلف نظیر شیل و مارن به دست می‌آید. بوکسیت به سنگ معدنی اطلاق می‌گردد که مجموع هیدرو اکسیدها یا اکسیدهای آلومینیوم<sup>۲</sup>، آهن و تیتانیوم<sup>۱</sup> موجود در آن بیش از ۵۰ درصد بوده و هیدرو اکسید آلومینیوم<sup>۲</sup> بیشترین مقدار را دارد. عمده ترین میزان سنگ بوکسیت دنیا؛ در کشورهای استرالیا، برزیل، چین، گینه، هند و جامائیکا وجود دارد که شکل ۲-۳۶ نقشه میزان و نحوه توزیع آن را نشان می‌دهد [۶۱].



شکل ۲-۳۶ کشورهای اصلی تولید کننده بوکسیت در جهان [۶۱]

ذخایر بوکسیت ایران در حدود ۳۹ میلیون تن است که تقریباً ۰/۱ درصد از کل ذخایر بوکسیت دنیا را به خود اختصاص داده است. این ذخایر در شمال شرق، شمال، شمال غرب، مرکز و جنوب غرب کشور

<sup>۱</sup> Ti

<sup>۲</sup> Al(OH)<sub>3</sub>

پراکنده شده اند. با وجود آن که ذخایر بوکسیت در ایران چندان زیاد نیست اما از عمده ترین معادن بوکسیت فعال در ایران می توان به؛ معادن بوکسیت قشلاق در استان مازندران، بوکسیت جاجرم و بوکسیت گوش کمر در استان خراسان، بوکسیت صدر آباد در استان یزد، بوکسیت لاتریتی زان و بوکسیت شاه بلاغی در استان تهران و بوکسیت بیگلر در استان قزوین اشاره کرد [۶۱].

## ۲-۹-۲ آشنایی با آلومینا و فرآیند تولید آن

شمش آلومینیوم از پودر سفید رنگ اکسید آلومینیوم با نام تجاری آلومینا<sup>۱</sup> تولید می گردد (شکل ۲-۳۷). آلومینا طی فرآیند بایر<sup>۲</sup> از سنگ بوکسیت حاصل می شود. همان طور که در شکل ۲-۳۸ دیده می شود در فرآیند بایر؛ سنگ بوکسیت خرد شده پس از این که مورد شست و شو قرار گرفت به همراه محلول سدیم هیدرو اکسید<sup>۳</sup> (سود سوز آور) وارد اتوکلاو تحت فشار شده و دمای ۱۷۰ - ۲۴۰ درجه سانتی گراد به آن اعمال می شود. این فرآیند در شرایط متلاطم مکانیکی به مدت ۲ تا ۸ ساعت طول می کشد تا واکنش های لازم صورت گیرد. در طی این واکنش ها هیدرو اکسیدهای آلومینیوم در هیدرو اکسید سدیم حل شده و نمک آلومینیوم<sup>۴</sup> شکل می گیرد. مقدار فشار و دمای اتوکلاو و نیز میزان غلظت هیدرو اکسید سدیم با توجه به نوع کانی های تشکیل دهنده بوکسیت می تواند تغییر کند. در همین مرحله، ناخالصی های موجود در بوکسیت مانند؛ اکسید تیتانیوم<sup>۵</sup>، اکسید سیلیسیوم<sup>۶</sup>، اکسید آهن<sup>۷</sup> و غیره تغلیظ شده و به صورت ثقیلی، تحت عنوان پسماند گل قرمز ته نشین می شود. برای تسریع در عملیات رسوب گذاری مقداری هیدرو اکسید آلومینیوم خالص به نمک آلومینیوم اضافه شده تا در نهایت پودر سفید رنگ آلومینا در انتهای فرآیند حاصل شود. از آن جایی که سود سوز آور تجاری برای این

---

<sup>۱</sup> Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>

<sup>۲</sup> Bayer process

<sup>۳</sup> NaOH

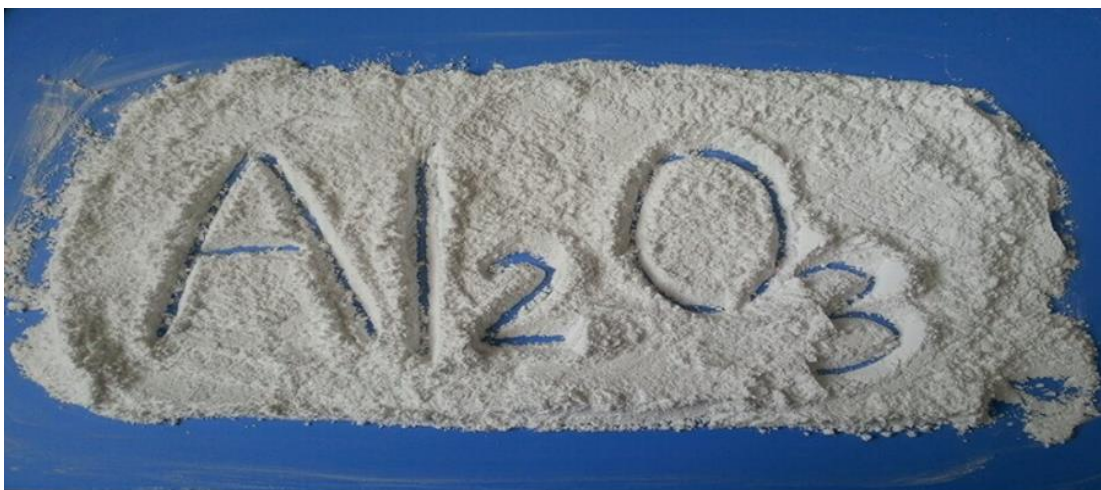
<sup>۴</sup> NaAl(OH)<sub>4</sub>

<sup>۵</sup> TiO<sub>2</sub>

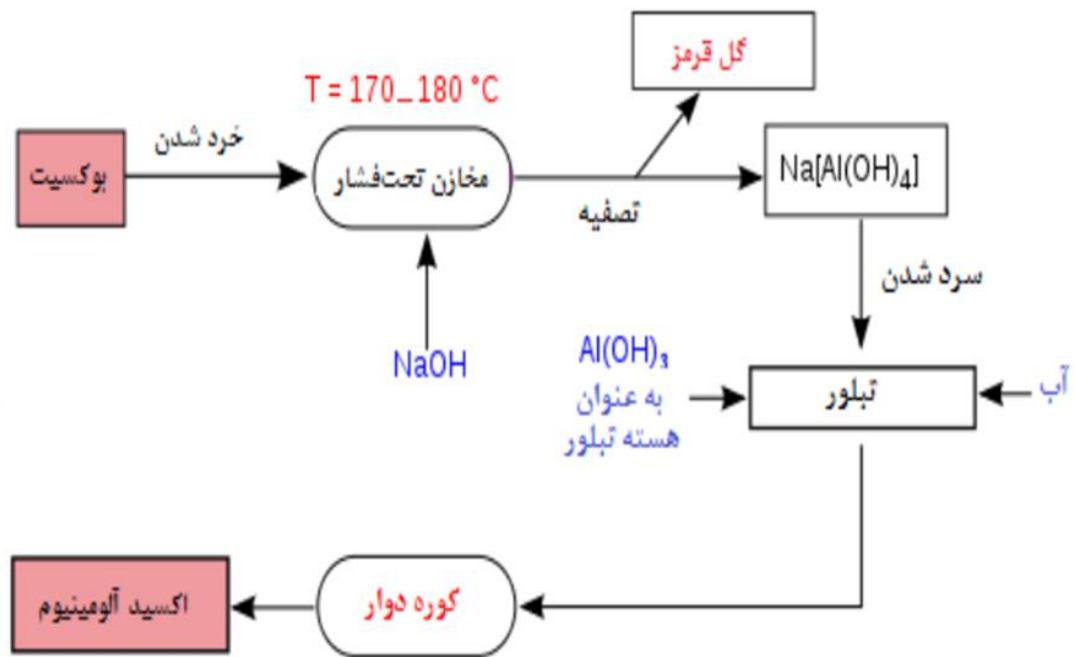
<sup>۶</sup> SiO<sub>2</sub>

<sup>۷</sup> Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>

حجم از مصرف، مقرون به صرفه نمی‌باشد، بنابراین با واکنش بین کربنات سدیم و هیدرو اکسید کلسیم طبق رابطه ۱-۲، مقدار سود مورد نیاز در همان اتوکلاو انحلال بوکسیت تولید می‌گردد. برای رسیدن به غلظت مورد نیاز سود؛ به محلول ترکیب شده با آب به میزان کافی آهک اضافه می‌گردد [۶۱].



شکل ۲-۳۷ تصویر پودر سفید رنگ آلومینیوم اکسید (آلومینا)



شکل ۲-۳۸ دیاگرام شماتیک تولید اکسید آلومینیوم (آلومینا) در فرآیند بایر [۶۱]

## ۲-۹-۳ آشنایی با گل قرمز و میزان تولید آن در جهان

گل قرمز که پسماند بوکسیت هم نامیده می‌شود؛ در حقیقت یک محصول جانبی است که در طی فرآیند استخراج آلومینا از بوکسیت تولید می‌گردد. این پسماند به دلیل دارا بودن مقدار بالایی از اکسید آهن، قرمز رنگ است. بسته به نوع ماده اولیه، بعضی از محققین میزان گل قرمز تولید شده به ازای تولید هر تن آلومینا را، ۱ - ۱/۵ تن و برخی دیگر ۱ - ۲/۵ تن بیان کرده اند. تعدادی از پژوهش‌ها هم این مقدار را ۳۵ - ۴۰ درصد کل بوکسیت دانسته اند. کل مقدار گل قرمز تولیدی در سراسر جهان در سال ۲۰۱۵، نزدیک به ۱۶۰ میلیون تن بوده است. چین به عنوان یک تولیدکننده بزرگ جهانی در سال ۲۰۱۶، حدود ۸۸ میلیون تن گل قرمز تولید کرده است. گزارش شده است که چین به عنوان یک کشور توسعه یافته و پیشرو در حوزه بازیافت پسماندها، فقط ۴ درصد از گل قرمز را مجدد به کار گرفته و مابقی را دفن می‌کند. قلیایی بودن بالا، حضور فلزات سنگین و عناصر رادیو اکتیو کمیاب؛ باعث شده که دفن گل قرمز موجب آلودگی آب‌های زیرزمینی گردد. از طرفی انباشته کردن آن روی سطح

زمین هم مشکل ساز است، زیرا ذرات ریزدانه آن به راحتی توسط باد پراکنده شده و موجب آلودگی هوا می‌شود. این مسائل به یک چالش بزرگ محیط زیستی تبدیل شده که بسیاری از کشورهای تولید کننده انبوه این پسماند، نظیر آمریکا، هند، چین، ژاپن، استرالیا، برزیل و یونان با آن رو به رو هستند. حتی دفن کردن ایمن این پسماند هم هزینه زیادی را به دولت‌ها تحمیل می‌کند. جدول ۲-۶ میزان تولید و هزینه های دفن ایمن گل قرمز را در چند کشور نشان می‌دهد [۶۲].

جدول ۲-۶ میزان تقریبی تولید سالانه گل قرمز به همراه هزینه مربوط به دفع آن در برخی از کشورها [۶۲]

نام کشور	گل قرمز تولید شده در سال (میلیون تن)	هزینه دفع ایمن در سال (میلیون دلار)
چین	۸۸	۸۸۰
استرالیا	۳۰	۳۰۰
برزیل	۱۰/۶	۱۰۶
هند	۴/۷۱	۴۷/۱
یونان	۰/۷	۷

کلید حل مشکلات زیست محیطی مربوط به گل قرمز، توسعه فناوری هایی است که بتوان به این پسماند به عنوان یک ماده مصرفی نگاه کرد. برای نیل به این هدف برخی کشورها از آن برای بازیابی فلزات نادر، ساخت سرامیک و آجر، برخی افزودنی های صنعتی و غیره استفاده کرده اند اما گزارش شده است که در سال ۲۰۱۶ کمتر از ۴ درصد از آن مورد استفاده قرار گرفته است. برای این که بتوان از این پسماند ضایعاتی در حوزه های دیگر هم استفاده نمود باید با خصوصیات و ترکیبات تشکیل دهنده این ماده بیشتر آشنا شد [۶۲]. در جدول ۲-۷ ترکیبات شیمیایی اصلی تشکیل دهنده گل قرمز برخی از کشورها آورده شده است.

جدول ۲-۷ ترکیبات شیمیایی مهم گل قرمز تولیدی برخی از کشورها [۶۲]

نام کشور	مهمترین ترکیبات شیمیایی					
	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	Na <sub>2</sub> O	CaO
چین	۲۵/۴۸	۱۱/۷۷	۲۰/۵۸	۴/۱۴	۶/۵۵	۱۳/۹۷
برزیل	۱۹/۰۰	۳۸/۰۰	۱۹/۹۰	۳/۸۳	۸/۵۸	۰/۸۷
هند	۱۸/۰۰	۵۱/۰۰	۴/۶۰	۹/۸۰	۵/۳۰	۱/۸۰
یونان	۴۰/۸۰	۱۹/۹۵	۶/۸۰	۵/۸۰	۲/۷۰	۱۲/۶۰

## ۲-۹-۴ مروری بر کارهای انجام شده با گل قرمز

یکی از حوزه‌هایی که می‌توان از گل قرمز در آن استفاده نمود، صنعت راهسازی است. تاکنون تحقیقاتی پیرامون استفاده از این پسماند به عنوان فیلر در قیر و یا در مخلوط آسفالتی صورت گرفته است. در این تحقیقات تا حدودی تأثیرات مورفولوژی<sup>۱</sup> و رئولوژیکی<sup>۲</sup> گل قرمز بر قیر بررسی شده است ولی هنوز ابعاد گسترده استفاده از آن به طور کامل ارزیابی نشده و نیاز به پژوهش‌ها و تحقیقات بیشتری دارد. در ادامه به مروری بر مطالعات صورت گرفته در این رابطه می‌پردازیم.

لیانگ یائو و همکاران (۲۰۲۰)؛ به منظور تحلیل خصوصیات قیر حاوی گل قرمز؛ مقادیر ۰، ۲۵، ۵۰، ۷۵ و ۱۰۰ درصد این ماده را جایگزین پودرسنگ آهک نمودند. آن‌ها مشاهده کردند که با افزایش مقدار گل قرمز درجه نفوذ قیر کاهش و نقطه نرمی افزایش پیدا می‌کند. در آزمایش ویسکوزیته چرخشی<sup>۳</sup> انجام گرفته در دمای ۱۳۵ درجه سانتی‌گراد مقادیر ۷۵ و ۱۰۰ درصد گل قرمز بیشترین

<sup>۱</sup> Morphology

<sup>۲</sup> Rheologicaly

<sup>۳</sup> Rotational Viscosity (RV)



ویسکوزیته را داشته اند. نتایج آزمایش رئومتر تیر خمشی<sup>۱</sup> نشان داد که، سختی خزشی<sup>۲</sup> با افزایش مقدار درصد گل قرمز افزایش یافته است. همچنین آن ها همین نتیجه را در آزمایش رئومتر برش دینامیکی<sup>۳</sup> گرفتند. چون با افزایش مقدار گل قرمز؛  $G^*$ <sup>۴</sup> افزایش و  $\sin(\delta^\circ)$ <sup>۵</sup> کاهش پیدا کرده است. با توجه به همین نتیجه می توان گفت که مخلوط دارای گل قرمز، مقاومت شیارشدگی بالایی خواهد داشت. آن ها پی بردند که قلیایی بودن گل قرمز به دلیل داشتن مقدار بالای اکسید سدیم؛<sup>۶</sup> چسبندگی بین قیر و سنگدانه را افزایش خواهد داد. آن ها ۷۵ و ۱۰۰ درصد را بهترین مقادیر بیان نمودند [۶۳]. شکل ۲-۳۹ روند تخلیه دوغاب گل قرمز تا مرحله جمع آوری آن را در کارخانه آلومینای ژوانگ ژو چین نشان می دهد.



شکل ۲-۳۹ (۱) تخلیه دوغاب گل قرمز، (۲) محل انباشت گل قرمز، (۳) پودر گل قرمز [۶۳]

ژانگ و همکاران (۲۰۱۸)؛ به منظور بررسی تأثیرات گل قرمز به عنوان جایگزینی به جای فیلرهای معدنی در مخلوط های آسفالتی از مقادیر ۰، ۲۵، ۵۰، ۷۵ و ۱۰۰ درصد استفاده کردند. آن ها دریافتند که گل قرمز  $G^*$  و نقطه نرمی قیر را افزایش اما درجه نفوذ را کاهش داده است [۱۹]. لیما و ثابوز (۲۰۱۶)؛ به منظور ارزیابی تغییر شکل دائمی مخلوط های آسفالتی حاوی گل قرمز، از فیلرهای پودر سنگ و گل قرمز به میزان ۷ درصد استفاده کردند. گل قرمز مصرفی هم مربوط به کارخانه تولید آلومینیوم برزیل بوده است. نتایج آزمایش چرخ های پنوماتیکی صاف، نشان داد که عمق شیار

<sup>۱</sup> Bending Beam Rheometry (BBR)

<sup>۲</sup> Creep Stiffness (S)

<sup>۳</sup> Dynamic Shear Rheometry (DSR)

<sup>۴</sup> complex shear module

<sup>۵</sup> phase angle

<sup>۶</sup> Na<sub>2</sub>O

مخلوط آسفالتی حاوی گل قرمز کمتر بوده است. این پدیده بیان کننده مقاومت بالای گل قرمز در برابر تغییر شکل دائمی است. همچنین آن ها مشاهده کردند که میزان قیر مصرفی از ۴/۷ درصد در مخلوط حاوی پودر سنگ به ۴/۴ درصد در مخلوط حاوی گل قرمز کاهش پیدا کرده است که دلیل این موضوع را نیز بالا بودن مساحت سطح ویژه فیلر پودر سنگ دانسته اند [۶۴].

ژانگ و همکاران (۲۰۱۹)؛ برای مقایسه رفتار رئولوژیکی و حساسیت رطوبتی ماستیک های آسفالتی، از ۴ نوع فیلر پودر سنگ آهک، گل قرمز، خاکستر بادی و آهک هیدراته<sup>۱</sup> استفاده کردند. نتایج مورفولوژی حاصل از دستگاه اسکن میکروسکوپ الکترونی<sup>۲</sup> نشان داد که، گل قرمز بافتی زبر و درشت داشته است. نتایج دستگاه طیف سنجی فلورسانس اشعه ایکس<sup>۳</sup> بیان داشت که میزان اکسید سدیم در گل قرمز نسبت به سه فیلر دیگر بیشتر بوده که بیان کننده قلیایی بودن این پسماند می باشد. آن ها در بررسی رفتار رئولوژیکی حاصل از آزمایش رئومتر برش دینامیکی پی بردند که  $G^*$  و  $\delta^\circ$  که نشان دهنده رفتار الاستیک آسفالت است، به ترتیب در گل قرمز نسبت به پودر سنگ آهک بیشترین و کمترین مقدار بوده است. به همین جهت آن ها نتیجه گرفتند که چون  $G^*/\sin(\delta^\circ)$  در دمای ۷۰ درجه سانتی گراد نشان دهنده مقاومت در برابر شیارشدگی و نیز  $G^* \cdot \sin(\delta^\circ)$  در دمای ۳۰ درجه سانتی گراد بیان کننده پارامتر خستگی است؛ بنابراین ماستیک حاوی گل قرمز نسبت به ماستیک حاوی پودر سنگ آهک از مقاومت خوبی در برابر تغییر شکل های دائمی برخوردار بوده اما عمرخستگی آن کمتر بوده است. از طرفی برای بررسی مقاومت چسبندگی ماستیک ها نسبت به بستر های سنگی آهکی و بازالتی، طبق شکل ۲-۴۰ از میخچه های فولادی و دستگاه کششی<sup>۴</sup> در دو حالت خشک و مرطوب استفاده کردند که نتایج نشان داد، ماستیک آسفالتی گل قرمز در حالت خشک بیشترین مقاومت را داشته است. اما در

---

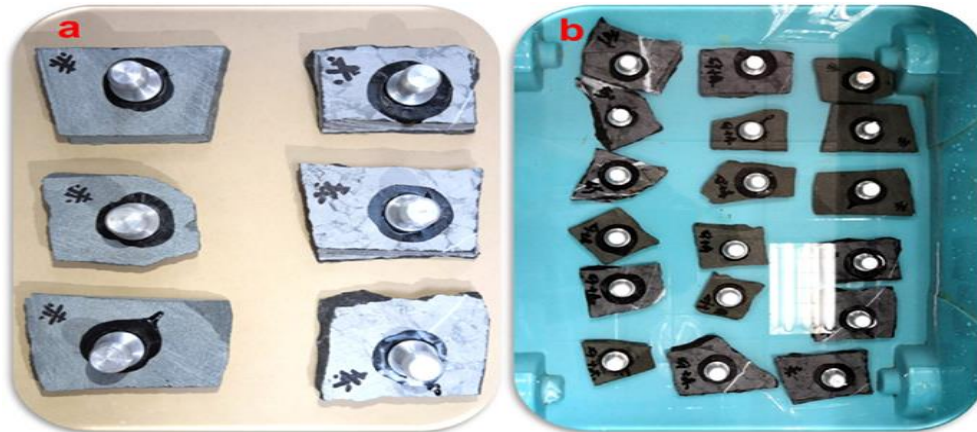
<sup>۱</sup> Hydrated Lime (HL)

<sup>۲</sup> Scan Electron Microscopy (SEM)

<sup>۳</sup> X-ray fluorescence spectroscopy (XRF)

<sup>۴</sup> Bonding strength

حالت مرطوب نسبت به پودر سنگ آهک عملکرد ضعیفی داشته که این موضوع با افزودن آهک هیدراته جبران گردیده است. همچنین بستر بازالتی مقاومت چسبندگی بهتری داشته است [۶۵].



شکل ۲-۴۰ تصویر نمونه های ماستیک - بسترسنگی (a) حالت خشک ، (b) حالت مرطوب [۶۵]

## ۲-۱۰ گل کربناته<sup>۱</sup>

### ۲-۱۰-۱ نگاهی به تولید گل کربناته در کارخانه قند و شکر شاهرود

این کارخانه در جاده مغان شهرستان شاهرود قرار دارد. با توجه به مصاحبه ای که با مسئول محترم کارخانه انجام گرفت، مشخص شد که ظرفیت اسمی کارخانه ۱۱۰۰ تن چغندر قند در روز است. ایشان بیان کردند که پس از عملیات عصاره گیری چغندر قند، به منظور تصفیه شربت خام و جداسازی مواد قندی به آن شیرآهک<sup>۲</sup> افزوده می‌گردد. آهک مورد نیاز برای تهیه شیرآهک در کارخانه قند و شکر شاهرود، روزانه حدود ۷۰ تن است که تأمین این میزان آهک از بازار مقرون به صرفه نمی‌باشد. به همین دلیل در خود کارخانه کوره آهک پزی وجود دارد. از یک معدن معتبر که میزان خلوص سنگ آهک<sup>۳</sup>

<sup>۱</sup> Press Mud Cake or Carbonation Cake

<sup>۲</sup> Ca(OH)<sub>2</sub>

<sup>۳</sup> CaCO<sub>3</sub>

آن حدود ۹۷ درصد است، سنگ آهک تهیه شده و در کوره آهک پزی با پخت سنگ آهک، آهک<sup>۱</sup> و گاز کربنیک<sup>۲</sup> به دست می‌آید. از ترکیب آهک با آب، شیرآهک مورد نیاز برای تصفیه شربت خام تهیه می‌گردد. در حقیقت هدف از افزودن شیرآهک جذب ناخالصی‌ها و مواد غیر قندی موجود در شربت خام و تصفیه کامل آن می‌باشد. شربت آهک خورده تحت گاز CO<sub>2</sub> قرار گرفته و وارد مخزن قیفی شکل ته نشین ساز می‌شود. قسمت رقیق شده شربت در بالای مخزن قرار می‌گیرد و شیرآهک به صورت گل رسوبی وارد دستگاه فیلتراسیون شده تا گل کربنات کلسیم<sup>۳</sup> به عنوان پسماند از چرخه تصفیه شربت چغندر قند خارج گردد. این گل کربنات کلسیم که اصطلاحاً به آن گل کربناته یا کیک کربناته هم گفته می‌شود، همان پسماندی است که برای کارخانه جات تولید قند و شکر به عنوان ضایعات محسوب شده و توجه ما را برای استفاده به عنوان افزودنی در مخلوط آسفالتی به خود جلب کرده است. کارخانه قند و شکر شاهرود که در مقایسه با سایر کارخانه جات کشور یک واحد کوچک تولیدی محسوب می‌گردد، روزانه ۷۰ تن گل کربناته تولید می‌کند. این محصول فرعی، بدون هیچ گونه استفاده‌ای در محیط کارخانه انباشه و دپو می‌شود که سطح وسیعی را اشغال می‌نماید. تولید حجم زیاد این پسماند دغدغه‌ای است که کارخانه‌های قند و شکر با آن رو به رو هستند و تنها راه حل این مشکل بازیافت و استفاده مجدد آن می‌باشد.

## ۲-۱۰-۲ مرور برخی از کاربردهای گل کربناته

آزدمیر و همکاران (۲۰۲۱)؛ برای ارزیابی خواص رئولوژیکی قیر در دمای متوسط و بالا؛ از کیک کربناته با مقادیر ۰، ۵، ۱۰ و ۱۵ درصد وزنی قیر استفاده کردند. آن‌ها برای این منظور آزمایشات درجه نفوذ، نقطه نرمی، ویسکوزیته چرخشی و رئومتر برش دینامیکی را انجام دادند. مشاهده شد که افزودن

---

<sup>۱</sup> CaO

<sup>۲</sup> CO<sub>2</sub>

<sup>۳</sup> CaCO<sub>3</sub>

کیک کربناته درجه نفوذ و نقطه نرمی را افزایش داده که این موضوع نشان دهنده کاهش حساسیت قیر حاوی این افزودنی نسبت به دما است. نتایج آزمایش ویسکوزیته در دمای ۱۳۵ درجه سانتی گراد نیز نشان داد که افزودن ۱۵ درصد کیک کربناته بیشترین مقدار ویسکوزیته را داشته است. آن ها همچنین با توجه به نتایج آزمایش رئومتر برش دینامیکی دریافتند که استفاده از ۱۵ درصد کیک کربناته بیشترین مقاومت در برابر شیارشدهگی و کمترین مقدار  $\delta^\circ$  را داشته است. در نهایت آن ها پیشنهاد دادند که به جهت اطمینان از استفاده این پسماند در مخلوط های آسفالتی داغ می توان پارامتر های دیگری مانند خستگی، خرابی رطوبتی و ترک خوردگی در دمای پایین را نیز بررسی نمود [۶۶].

## ۱۱-۲ خلاصه نتایج فصل دوم

نتایج تحقیقات و کارهای پژوهشی انجام گرفته در مقالات ارائه شده ی این فصل، به طور خلاصه در

جدول ۸-۲ آورده شده است

جدول ۸-۲ خلاصه نتایج مرور کارهای گذشته

نویسندگان	موضوع تحقیق	پارامترهای مورد بررسی	خلاصه نتایج
کاظمی و همکاران (۲۰۲۱)	بررسی عملکرد خودترمیمی قیرهای اصلاح شده با پلیمر پلی یورتان	مقدار درصدی پلیمر - دمای ترمیم - زمان ترمیم	با افزایش درصد پلیمر، نرخ ترمیم افزایش یافته است. دمای بهینه؛ ۴۵ درجه زمان بهینه؛ ۶ ساعت
گنجه ای و افلاکی (۲۰۱۶)	بررسی تأثیر نانو سیلیکا و استایرن- بوتادین-استایرن بر خودترمیمی	مقدار درصدی افزودنی ها - زمان استراحت	بهترین ترکیب شامل ۲ درصد نانو سیلیکا و ۳ درصد استایرن-بوتادین-استایرن می باشد. زمان استراحت بهینه؛ ۱ هفته
کانتریراس و توره (۲۰۱۷)	ارزیابی تأثیر زمان های مختلف گرمایش ماکروویو بر خصوصیات خودترمیمی مخلوط های آسفالتی	زمان های مختلف گرمایش ماکروویو - درصد های متنوع الیاف فلزی	زمان بهینه ترمیم؛ ۴۰ ثانیه درصد بهینه الیاف فلزی؛ ۴ و ۶ درصد

بهترین نوع مصالح سنگی؛ سرباره فولادی			
بهترین سایز ذرات؛ ۴/۷۵ - ۹/۵ میلیمتر مقدار بهینه؛ ۶۰ درصد	انواع مختلف مصالح سنگی - سایز ذرات سنگدانه - درصد استفاده	بررسی تأثیر نوع و اندازه ذرات سنگدانه بر خودترمیمی	لو و همکاران (۲۰۲۰)
خاکستر بادی توانایی ترمیم ترک هایی با عرض ۱۰۰-۳۰۰ میکرو متر را داشته است.	نوع فیبر - عرض ترک	بررسی تأثیر خاکستر بادی بر عملکرد خودترمیمی با ارزیابی عرض ترک	یلدیز و آتاکان (۲۰۲۰)
بهترین نوع مصالح سنگی؛ سرباره آهن			
درصد بهینه سرباره آهن؛ ۲درصد زمان بهینه ترمیم؛ ۳۰ دقیقه دمای بهینه ترمیم؛ ۶۰ درجه	نوع سنگدانه و مقدار آن - دمای و زمان ترمیم - طول ترک	بررسی تأثیر مقدار خرابی بر حسب میزان طول ترک بر عملکرد خودترمیمی	لی و همکاران (۲۰۲۰)
عملکرد گرمایش ماکروویو در ترمیم مخلوط های آسفالتی حاوی الیاف فولادی بهتر بوده است.	نوع گرمایش - زمان ترمیم - مقدار الیاف فولادی	مقایسه تأثیر دو روش گرمایشی تابش امواج ماکروویو و کوره القایی بر خودترمیمی	کانتیریراس و گارسیا (۲۰۱۶)
با افزایش مقدار کپسول جوانساز در مخلوط، خودترمیمی افزایش پیدا می کند. پسماند روغن های معدنی بهتر بوده است. دمای بهینه ترمیم؛ ۴۰ درجه	نوع کپسول - درصد کپسول در مخلوط - نوع روغن ضایعاتی - دمای ترمیم	تأثیر کپسول های جوانساز حاوی روغن های ضایعاتی بر خودترمیمی ماستیک های آسفالتی	یاماک و همکاران (۲۰۲۱)
گرمایش القایی در ترمیم مخلوط های آسفالتی حاوی سرباره فولادی عملکرد ضعیفی داشته است. گرمایش ماکروویو به مدت ۱۲۰ ثانیه موجب گسیختگی نمونه آسفالتی حاوی سرباره فولادی می گردد.	نوع گرمایش - زمان گرمایش	بررسی عملکرد مخلوط های آسفالتی داغ حاوی الیاف فولادی و سرباره فولادی	سان و همکاران (۲۰۱۷)
با افزایش درصد سرباره درشت دانه؛ مقدار قیر بهینه و استقامت مارشال افزایش می یابد.	سایز سنگدانه های سرباره - درصد سرباره	تأثیر سرباره فولادی نوع EAF بر مخلوط آسفالتی	کاووسی و قاضی زاده (۲۰۱۴)

فان و همکاران (۲۰۱۸)	بررسی تأثیر سرباره ریزدانه بر عملکرد مخلوط آسفالتی	سایز سنگدانه های سرباره	نسبت به بخش درشت دانه؛ مقدار قیر بهینه را بیشتر افزایش می‌دهد.	جایگزینی بخش ریزدانه سرباره فولادی
شن و همکاران (۲۰۰۹)	ارزیابی تأثیر سرباره فولادی نوع BOF بر مقاومت اصطکاکی مخلوط های آسفالتی	سایز سنگدانه سرباره - مقدار سرباره	افزایش میزان درصد سرباره درشت دانه در مخلوط آسفالتی؛ مقاومت اصطکاکی را افزایش می‌دهد.	افزایش میزان درصد سرباره درشت دانه
عاملیان و همکاران (۲۰۱۸)	ارزیابی مقاومت شیار شدگی مخلوط های آسفالتی حاوی سرباره فولادی	نوع سرباره - سایز سنگدانه سرباره	شیارشدگی بهبود می‌یابد.	با جایگزینی بخش درشت دانه مصالح آهنی با سرباره فولادی نوع BOF ، عملکرد
زی و همکاران (۲۰۱۳)	تأثیر سرباره فولادی نوع BOF بر عملکرد خستگی آسفالت	سایز سنگدانه های سرباره - نوع مصالح سنگی	با جایگزینی بخش درشت دانه سرباره به جای مصالح بازالتی؛ عملکرد خستگی مخلوط آسفالتی بهبود می‌یابد.	با جایگزینی بخش درشت دانه سرباره به
پاستو و بالدو (۲۰۱۱)	تأثیر سرباره فولادی نوع EAF بر مقاومت خستگی مخلوط های آسفالتی	درصد استفاده از سرباره - نوع مصالح سنگی	مقاومت در برابر شکست خستگی نیز افزایش پیدا کرده است.	با افزایش درصد جایگزینی به جای مصالح آهنی؛ مقاومت در برابر شکست
گلی و همکاران (۲۰۱۷)	بررسی عمر خستگی مخلوط های آسفالتی حاوی سرباره فولادی نوع EAF	سایز های مختلف سرباره - نوع مصالح سنگی	حالت مربوط به جایگزینی بخش ریزدانه بوده است.	جایگزینی در سه حالت درشت دانه، کل مصالح و ریزدانه به جای مصالح آهنی؛ مقاومت خستگی را کاهش داده است. بدترین حالت مربوط به جایگزینی بخش ریزدانه بوده است.
حسامی و همکاران (۲۰۱۵)	بررسی تأثیر سرباره فولادی نوع EAF بر حساسیت رطوبتی مخلوط های آسفالتی	سایز سنگدانه های سرباره - نوع مصالح سنگی	می‌گردد.	افزودن سرباره در هر سه بخش درشت دانه، ریزدانه و کل مصالح به جای مصالح آهنی؛ موجب افزایش خرابی رطوبتی

امیری و همکاران (۲۰۱۳)	ارزیابی حساسیت رطوبتی مخلوط های آسفالتی حاوی سرباره فولادی EAF	سایز های مختلف سرباره - نوع مصالح سنگی	جایگزینی فقط در بخش ریزدانه مقاومت رطوبتی را نسبت به مصالح آهکی بهبود داده است.
چن و وی (۲۰۱۶)	بررسی تأثیر سرباره فولادی BOF بر حساسیت رطوبتی مخلوط آسفالتی	نسبت شاخص حساسیت رطوبتی	جایگزینی بخش درشت دانه سرباره فولادی نوع BOF به جای مصالح آهکی؛ مقاومت رطوبتی افزایش داده است.
لیانگ یائو و همکاران (۲۰۲۰)	بررسی تأثیر گل قرمز بر خصوصیات عملکردی قیر	درجه نفوذ، نقطه نرمی، ویسکوزیته، سختی	با افزایش درصد فیلر گل قرمز در مقایسه با فیلر پودرسنگ آهک؛ درجه نفوذ کاهش، نقطه نرمی، ویسکوزیته و سختی افزایش پیدا می کند.
ژانگ و همکاران (۲۰۱۸)	بررسی تأثیرات گل قرمز به عنوان جایگزینی به جای فیلرهای معدنی در آسفالت	رئومتر برش دینامیکی، نقطه نرمی، درجه نفوذ	گل قرمز؛ $G^*$ و نقطه نرمی قیر را افزایش درحالی که درجه نفوذ را کاهش می دهد
لیما و ثایوز (۲۰۱۶)	ارزیابی تغییر شکل دائمی مخلوط های آسفالتی حاوی گل قرمز	تغییر شکل دائمی	افزودن گل قرمز مقاومت مخلوط آسفالتی را در برابر تغییر شکل دائمی بالا می برد.
ژانگ و همکاران (۲۰۱۹)	مقایسه رفتار رئولوژیکی و حساسیت رطوبتی ماستیک های آسفالتی ساخته شده با فیلر های مختلف	خصوصیات مورفولوژی - شیارشدگی - خستگی - حساسیت رطوبتی	گل قرمز بافتی زبر و درشت دارد. مقاومت شیارشدگی را بهبود می دهد. در خستگی و رطوبت عملکرد ضعیفی داشته است.
آزدمیر و همکاران (۲۰۲۱)	ارزیابی خواص رئولوژیکی قیر حاوی گل کربناته در دمای متوسط و بالا	درجه نفوذ - نقطه نرمی - ویسکوزیته	گل کربناته درجه نفوذ، نقطه نرمی و ویسکوزیته قیر را در دمای ۱۳۵ درجه افزایش داده است.



فصل سوم:

تئوری ها و آزمایشات

## ۳-۱ مقدمه

روسازی آسفالتی مرسوم ترین نوع روسازی مورد استفاده در ساخت راه های شریانی اصلی و فرعی، جاده ها، پارکینگ ها و فرودگاه ها است که شیوه طراحی، نحوه ساخت و اجرا و نیز مدیریت تعمیر و نگهداری آن مورد توجه مهندسين راه و ترابری می باشد. مخلوط های آسفالتی را بر اساس دمای ساخت، به ۴ گروه تقسیم بندی کرده اند [۶۷]:

- ◀ مخلوط آسفالتی داغ<sup>۱</sup> (۱۵۰ - ۱۹۰ درجه سانتی گراد)
- ◀ مخلوط آسفالتی گرم<sup>۲</sup> (۱۰۰ - ۱۴۰ درجه سانتی گراد)
- ◀ مخلوط آسفالتی نیمه گرم<sup>۳</sup> (۶۰ - ۱۰۰ درجه سانتی گراد)
- ◀ مخلوط آسفالتی سرد<sup>۴</sup> (۰ - ۴۰ درجه سانتی گراد)

در این پژوهش مخلوط آسفالتی داغ مبنای ساخت نمونه ها بوده است. از آن جایی که یک مخلوط آسفالتی به طور کلی از سه بخش سنگدانه، فیلر و قیر تشکیل یافته است؛ بنابراین آشنایی با مشخصات آن ها می تواند به طراحی بهتر نمونه ها کمک شایانی نماید. به همین جهت در این فصل، ابتدا مشخصات مصالح مصرفی را مورد بررسی قرار می دهیم. سپس با توجه به این که هدف اصلی این تحقیق مبحث خودترمیمی مخلوط های آسفالتی است، به بررسی آزمایش آن و نیز آزمایشات مربوط به حساسیت رطوبتی و شیارشدگی خواهیم پرداخت.

---

<sup>۱</sup> Hot Mix Asphalt (HMA)

<sup>۲</sup> Warm Mix Asphalt (WMA)

<sup>۳</sup> Half-Warm Mix Asphalt (HWMA)

<sup>۴</sup> Cold Mix Asphalt (CMA)

## ۲-۳ مشخصات مصالح مصرفی

### ۱-۲-۳ خصوصیات مصالح سنگی طبیعی

مصالح سنگی استفاده شده در این پژوهش به ۲ دسته کلی، طبیعی و مصنوعی تقسیم بندی می‌شوند. مصالح طبیعی که از نوع آهکی نیز می‌باشد، از معدنی در شهر میامی استان سمنان تهیه گردیده است. مصالح مصنوعی این تحقیق نیز شامل سرباره فولادی، گل قرمز و گل کربناته می‌باشد که به ترتیب از کارخانه ذوب آهن فولاد مبارکه اصفهان، کارخانه آلومینا جاجرم استان خراسان شمالی و کارخانه قند و شکر شاهرود استان سمنان گرد آوری شده اند. لازم به توضیح است که سرباره فولادی به صورت سنگدانه و دو ماده دیگر به صورت فیلر در این پژوهش استفاده شده است.

اطلاعات مربوط به کیفیت مصالح سنگی آهکی از معدن مذکور دریافت و نتایج آن در جدول ۱-۳

گردآوری شده است.

جدول ۳-۱ مشخصات مربوط به کیفیت مصالح سنگی

نتایج آزمایش			مشخصات	آزمایش
فیلر	ماسه ۰-۶ میلیمتر	مخلوط درشت دانه		
-	۹۳	-		ارزش ماسه ای AASHTO-T176
-	-	B	نوع دانه بندی	درصد افت وزنی در مقابل سایش به روش لس آنجلس AASHTO-T96
-	-	۵۰۰	تعداد دور	
-	-	۲۳	درصد سایش	
N.P	N.P	-	دامنه خمیری PI	حدود اتربرگ AASHTO-T89,90
-	-	-	حد خمیری PL	
غیرقابل تعیین	غیرقابل تعیین	-	حد روانی LL	
-	-	-	دریک وجه	درصد شکستگی مصالح سنگی روی الک شماره ۴
-	-	۸۸	در دو وجه	ASTM-5821
-	-	بیش از ۹۵		درصد اندود قیر به مصالح سنگی AASHTO-T1۸۲
-	-	۱۱	تطویق	درصد تطویل و تورق BS-812
-	-	۷	تورق	
-	۰/۲۲	-	ریزدانه	درصد افت وزنی در سولفات سدیم
-	-	۰/۶۱	درشت دانه	AASHTO-T104

همچنین نتایج آزمایشات مربوط به تعیین مقادیر وزن مخصوص و میزان درصد جذب آب مصالح

سنگی، در جدول ۳-۲ آورده شده است.

جدول ۳-۲ مقادیر وزن مخصوص و میزان درصد جذب آب مصالح سنگی

درصد جذب آب	وزن مخصوص (گرم بر سانتیمتر مکعب)		مشخصات
	حقیقی	ظاهری	
۱/۱	۲/۷۶۰	۲/۸۴۵	مصالح سنگی مانده روی الک شماره ۸ AASHTO-T85
۱/۵	۲/۷۴۰	۲/۸۵۷	مصالح سنگی عبوری از الک شماره ۸ و مانده روی الک شماره ۲۰۰ AASHTO-T84
-	۲/۷۹۰		مصالح سنگی عبوری از الک شماره ۲۰۰ AASHTO-T100
-	۲/۷۵۶		وزن مخصوص حقیقی مخلوط مصالح سنگی (G <sub>sb</sub> )

### ۳-۲-۲ سرباره فولادی

سرباره استفاده شده در این پژوهش از کارخانه فولاد مبارکه اصفهان فراهم گردیده است که از نوع کوره قوس الکتریکی می باشد. مهم ترین ترکیبات شیمیایی به دست آمده از آزمایش XRF برای مصالح آهکی و سرباره در جدول ۳-۳ مشاهده می شود.

جدول ۳-۳ ترکیبات شیمیایی مصالح سنگی آهکی و سرباره ای

نوع مصالح	ترکیبات شیمیایی (درصد)								
	Free CaO	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	MnO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	MgO	CaO	Others
سرباره	۰/۲	۲	۱	۵	۲۷	۱۶	۵	۴۰	۳/۴
آهکی	-	۰/۱	۰/۰۳	۰/۲	۰/۴	۹	۶/۲	۴۵	۵/۳

همان گونه که در جدول ۳-۳ مشاهده می گردد، مقدار آهک آزاد موجود در سرباره ۰/۲ درصد می باشد که این رقم خیلی کمتر از میزان این ترکیب در سرباره های تازه تولید شده است. بنابراین

می‌توان اطمینان داشت که این سرباره فرآیند عمل آوری و هوازدگی را به خوبی طی کرده و امکان افزایش حجم ناشی از هیدراتاسیون وجود ندارد.

### ۳-۲-۳ مشخصات گل قرمز

گل قرمز مصرفی در این پایان نامه از کارخانه آلومینا جاجرم که در ۵ کیلومتری شمال شرقی شهر جاجرم و در جنوب شرقی استان خراسان شمالی قرار گرفته است، تهیه شده است. ترکیبات شیمیایی مهم گل قرمز که نتیجه آزمایش XRF است در جدول ۳-۴ نشان داده شده است. از این ماده ضایعاتی به صورت فیلر در ساخت نمونه های آسفالتی استفاده گردیده است.

جدول ۳-۴ ترکیبات شیمیایی تشکیل دهنده گل قرمز کارخانه بوکسیت جاجرم

نوع مصالح	ترکیبات شیمیایی (درصد)						
	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	CaO	Na <sub>2</sub> O	TiO <sub>2</sub>	MgO
گل قرمز	۲۶/۵۵	۱۸/۸۱	۱۵/۳۲	۱۵/۴۰	۵/۱۸	۶/۰۸	۰/۹۶

### ۴-۲-۳ مشخصات گل کربناته

گل کربناته یا گل کربنات کلسیم مورد استفاده در این تحقیق از کارخانه قند و شکر واقع در جاده مغان شهرستان شاهرود استان سمنان تهیه گردیده است. همان طور که قبلاً بیان شد؛ این ماده پسماند کارخانه جات تولید شکر از چغندر قند است که در طی مراحل تصفیه شربت خام به دست می‌آید. در این پژوهش از این ماده به صورت ذرات عبوری از الک شماره ۲۰۰ استفاده شده است. آنالیز ترکیبات شیمیایی این ماده ضایعاتی که با استفاده دستگاه XRF1800 تعیین و توسط شرکت مذکور ارائه شده به صورت جدول ۳-۵ است.

جدول ۳-۵ ترکیبات شیمیایی گل کربناته کارخانه شکر (قند) شاهرود

نوع مصالح	ترکیبات شیمیایی (درصد)										
	SrO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MnO	CaO	K <sub>2</sub> O	SO <sub>3</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	LOI
گل کربناته	۰/۰۶	۰/۶۰	۰/۰۱	۴۹/۵۴	۰/۰۳	۰/۷۲	۰/۰۴	۰/۵۸	۰/۱۳	۰/۹۶	۴۷/۳۰

در شکل ۱-۳ مصالح ضایعاتی استفاده شده در این پژوهش ملاحظه می‌گردد.



شکل ۱-۳-۱ نمایی کلی از ۳ نوع مصالح به ترتیب (۱) سرباره، (۲) گل قرمز و (۳) گل کربناته

### ۳-۲-۵ خصوصیات قیر

قیر مورد استفاده در این تحقیق، با درجه نفوذ ۷۰ - ۶۰ بوده که از شرکت نفت پاسارگاد تهران

فراهم گردیده است. مهم ترین مشخصات آن به شرح جدول ۳-۶ است.

جدول ۳-۶ نتایج آزمایش های انجام شده بر روی قیر مصرفی

نتایج	واحد اندازه گیری	استاندارد آزمایش	نوع آزمایش
۱/۰۳	گرم بر سانتی متر مکعب	ASTM D70	وزن مخصوص در دمای ۲۵ درجه سانتی گراد
۶۲	درجه سانتی گراد	ASTM D5	درجه نفوذ در دمای ۲۵ درجه سانتی گراد
۴۹	درجه سانتی گراد	ASTM D36	نقطه نرمی (گلوله و حلقه)
۳۰۸	درجه سانتی گراد	ASTM D92	درجه اشتعال (رو باز-کلوند)
۱۰۰	سانتی متر	ASTM D113	مقدار کشش در دمای ۲۵ درجه سانتی گراد
۸۱۰	سانتی استوکس	ASTM D2170	ویسکوزیته کینماتیک در دمای ۱۲۰ درجه سانتی گراد
۴۲۰	سانتی استوکس	ASTM D2170	ویسکوزیته کینماتیک در دمای ۱۳۵ درجه سانتی گراد
۲۳۲	سانتی استوکس	ASTM D2170	ویسکوزیته کینماتیک در دمای ۱۵۰ درجه سانتی گراد
حساسیت حرارتی قیر			
-۱/۱۲	-	-	PI بر حسب درجه نفوذ در ۲۵ درجه سانتی گراد و نقطه نرمی
-۰/۵۶	-	-	PVN بر حسب درجه نفوذ در ۲۵ درجه سانتی گراد و ویسکوزیته بر حسب سانتی استوکس در دمای ۱۳۵ درجه سانتی گراد

### ۳-۳ دانه بندی مصالح سنگی

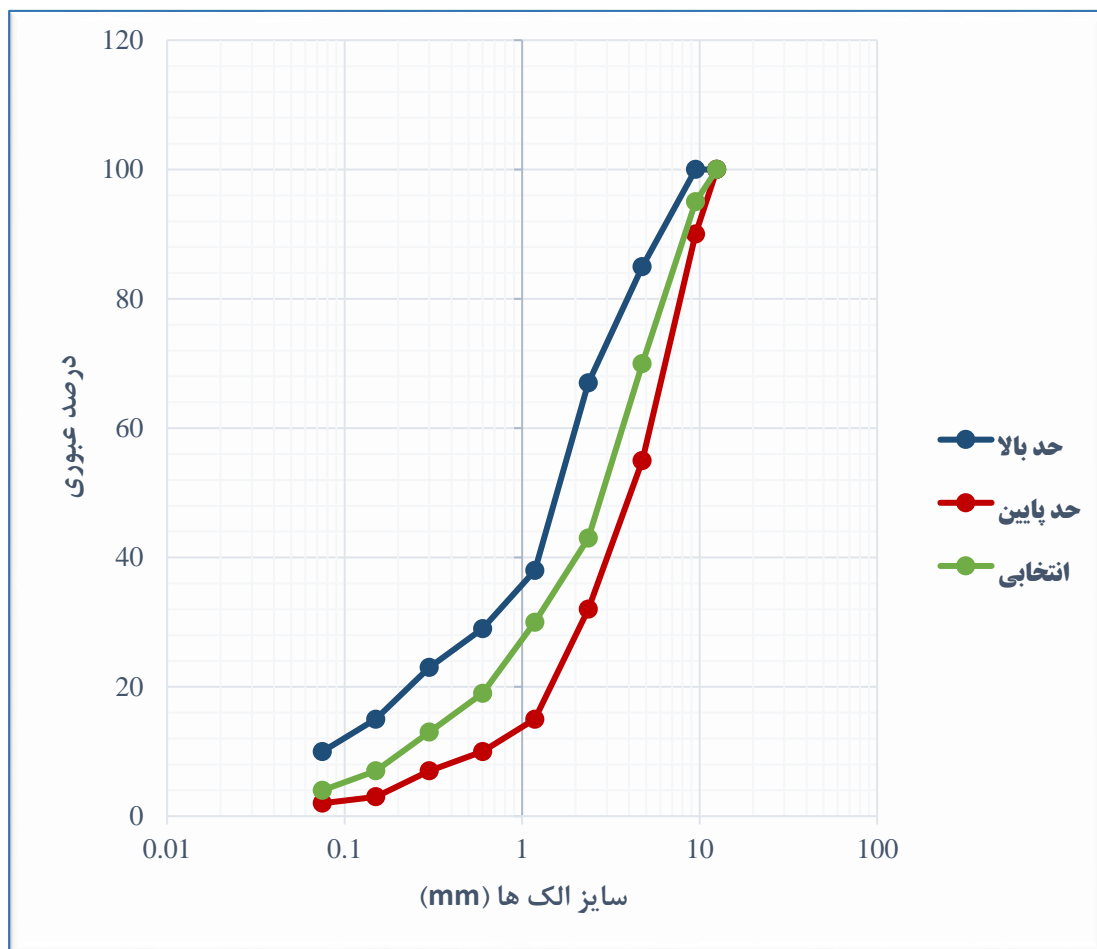
دانه بندی مصالح سنگی از مهم ترین پارامتر های تأثیرگذار بر استقامت، دوام و توان باربری روسازی آسفالتی است. دانه بندی همچنین به طور قابل توجهی بر خصوصیات حجمی و عملکرد مکانیکی بتن آسفالتی تأثیر می گذارد. سنگدانه ها با توجه به موقعیت قرار گیری در لایه های مختلف روسازی، نیازمند دانه بندی خاصی هستند که این انواع دانه بندی توسط آیین نامه ها، استانداردها و یا نشریه های مختلف هر کشوری ارائه شده است. در کشور ما انواع مختلف دانه بندی مصالح سنگی را می توان در آیین نامه



روسازی آسفالتی راه های ایران یا همان نشریه ۲۳۴ مشاهده نمود. این نشریه به طور کلی ۳ نوع دانه بندی پیوسته، باز و متخلخل را برای انواع مخلوط های آسفالتی پیشنهاد داده است. دانه بندی نوع پیوسته مد نظر این پژوهش بوده است. دانه بندی پیوسته بتن آسفالتی بر اساس وضعیت قرار گیری سنگدانه در لایه های مختلف به ۷ گروه تقسیم شده که ما در این پایان نامه از دانه بندی شماره ۵ که مربوط به لایه رویه یا توپکا است، استفاده نموده ایم. جدول ۳-۷ درصد عبوری انتخابی برای هر سایز سنگدانه نشان می دهد. برای انتخاب دانه بندی مطلوب، آیین نامه برای هر سایز الک حدودی را به عنوان درصد عبوری بیان کرده که به صورت ۲ منحنی قابل ترسیم اند. بنابراین منحنی دانه بندی انتخابی باید در بین ۲ منحنی و ترجیحاً در وسط قرار گیرد. منحنی های حدود آیین نامه ای به همراه منحنی درصد عبوری انتخابی در پژوهش حاضر، در شکل ۳-۲ مشاهده می گردد.

جدول ۳-۷ دانه بندی مصالح سنگی

اندازه الک	درصد عبوری آیین نامه	درصد عبوری انتخابی
۱۲/۵ میلیمتر (۱/۲ اینچ)	۱۰۰	۱۰۰
۹/۵ میلیمتر (۳/۸ اینچ)	۹۰-۱۰۰	۹۵
۴/۷۵ میلیمتر (شماره ۴)	۵۵-۸۵	۷۰
۲/۳۶ میلیمتر (شماره ۸)	۳۲-۶۷	۴۳
۱/۱۸ میلیمتر (شماره ۱۶)	-	۳۰
۰/۶ میلیمتر (شماره ۳۰)	-	۱۹
۰/۳ میلیمتر (شماره ۵۰)	۷-۲۳	۱۳
۰/۱۵ میلیمتر (شماره ۱۰۰)	-	۷
۰/۰۷۵ میلیمتر (شماره ۲۰۰)	۲-۱۰	۴



شکل ۳-۲ نمودار دانه بندی مورد استفاده در پایان نامه

### ۳-۴ آزمایش های انجام گرفته در پژوهش

به منظور بررسی تأثیر انواع مختلف مواد و مصالح بر خصوصیات عملکردی مخلوط آسفالتی نظیر تعیین درصد قیر بهینه، شاخص خودترمیمی، حساسیت رطوبتی و شیارشدگی؛ با توجه به امکانات و ابزار موجود در آزمایشگاه، آزمایشاتی در این پژوهش صورت گرفت که خلاصه آن ها در جدول ۳-۸ آمده است.

جدول ۳-۸ آزمایش های انجام گرفته در این پژوهش

نام آزمایش	استاندارد آزمایش	ابعاد و شرایط نمونه ها	هدف آزمایش
مارشال	ASTM D 1559	نمونه های استوانه ای با قطر ۴ اینچ و ارتفاع ۲/۵ اینچ	تعیین درصد قیر بهینه
خمش سه نقطه ای	ASTM D 8044	نمونه های نیمه استوانه ای با قطر حدود ۱۰۰ میلیمتر و ارتفاع ۵۰ میلیمتر و ضخامت حدود ۳۰ میلیمتر	تعیین شاخص خودترمیمی
کشش غیرمستقیم لاتمن اصلاح شده	AASHTO T 283	نمونه های استوانه ای با قطر ۴ اینچ و ارتفاع ۲/۵ اینچ با مقدار هوای ۷ درصد	تعیین حساسیت رطوبتی
شاخص مارشال	ASTM D 1559	نمونه های استوانه ای با قطر ۴ اینچ و ارتفاع ۲/۵ اینچ	بررسی مقاومت در برابر تغییر شکل پلاستیک و شیارشدگی

### ۳-۴-۱ آزمایش مارشال ASTM D 1559

برای طراحی بهینه و ساخت مخلوط های آسفالتی روش های متنوعی وجود دارد. هدف اصلی در کلیه این روش ها، یافتن بهترین طرح اختلاط بین سنگدانه و قیر در مخلوط آسفالتی می باشد. در حقیقت اگر مقدار درصدی قیر نسبت به سنگدانه که دو جزء اصلی تشکیل دهنده یک بتن آسفالتی هستند به درستی تعیین گردد، مخلوط ساخته شده از پایداری و استحکام بالایی در برابر بارهای وارده برخوردار می شود. یکی از این روش ها، طرح اختلاط مارشال است که برای اولین بار در سال ۱۹۳۰ توسط آقای بروس مارشال<sup>۱</sup> مطرح گردید. طراحی و ساخت مخلوط های آسفالتی داغ این پژوهش بر مبنای همین روش بوده است. برای ساخت نمونه آسفالتی به روش مارشال ابتدا مخلوط آسفالتی داغ

<sup>۱</sup> Marshall Bruce

داخل قالب استوانه ای با قطر ۴ اینچ (۱۰۱/۶ میلی‌متر) و ارتفاع ۲/۵ اینچ (۶۳/۵ میلی‌متر) ریخته شده و سپس قالب به همراه مخلوط آسفالتی درون آن، در زیر چکش تراکم قرار گرفته تا وزنه ۱۰ پوندی (۴/۵ کیلوگرمی) از ارتفاع ۴۵ سانتی متری روی آن فرود آمده و عمل تراکم انجام گیرد. شکل ۳-۳ چکش تراکم مارشال در دو حالت اتوماتیک و دستی که هر دو در آزمایشگاه موجود هستند را نشان می‌دهد. تعداد ضربات چکش بسته به نوع شبیه سازی شرایط ترافیکی برای نمونه آسفالتی متفاوت بوده و حداکثر تعداد آن ۷۵ ضربه در دو وجه نمونه می‌باشد. لازم به ذکر است که این روش برای مخلوط هایی که حداکثر اندازه سنگدانه در آن ها ۲۵ میلی‌متر است قابل استفاده بوده و برای مخلوط هایی با اندازه سنگدانه بزرگتر از روش اصلاح شده مارشال که در آن ابعاد قالب بزرگتر است، استفاده می‌گردد.

رویکرد این طرح اختلاط به جهت تعیین درصد قیر بهینه بدین صورت است که ابتدا نمونه هایی با درصد قیرهای مختلف (۴، ۴/۵، ۵، ۵/۵، ۶، ۶/۵ درصد) با ۳ تکرار از هر کدام ساخته شده و پارامترهای میزان درصد هوا، وزن مخصوص و استقامت و روانی مارشال محاسبه می‌گردد. در نهایت درصد قیرهای متناظر با ۴ درصد هوا، حداکثر وزن مخصوص و استقامت مارشال محاسبه گشته که میانگین این مقادیر اگر حدود ارائه شده توسط آیین نامه را مرتفع سازد به عنوان درصد قیر بهینه قلمداد می‌گردد.



شکل ۳-۳ (۱) چکش تراکم اتوماتیک مارشال ، (۲) چکش تراکم دستی مارشال

### ۳-۴-۲ آزمایش خمش سه نقطه ای ASTM D 8044

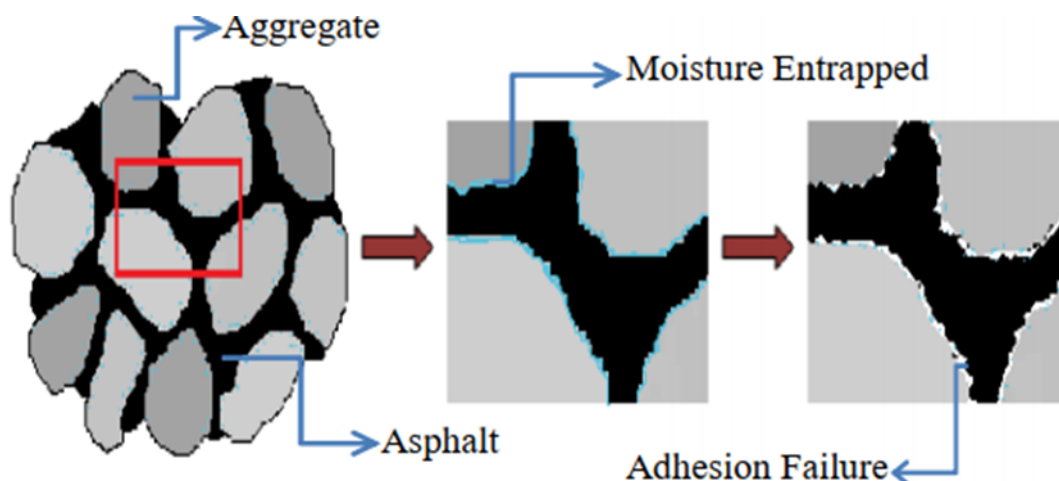
آزمایش خمش سه نقطه ای بر روی نمونه های نیمه استوانه ای به منظور بررسی میزان خودترمیمی مخلوط های آسفالتی در این پژوهش انجام گرفته است. این آزمایش با نرخ بارگذاری ۵ میلیمتر بر دقیقه انجام شده است. از آن جایی که شکست نمونه ها باید به صورت ترد می بود، نمونه ها به مدت ۲۴ ساعت در داخل فریزر با دمای ۲۰- درجه سانتی گراد قرار گرفتند. برای انجام این آزمایش طبق شکل ۳-۴ ، از دستگاه تک محوری با ظرفیت ۵ تن استفاده شد. در این دستگاه جا به جایی قائم توسط یک عدد سنسور کرنش سنج با دقت ۰/۰۱ میلیمتر اندازه گیری می شود. نیروی قائم هم به وسیله یک لودسل ۵ تنی با دقت ۰/۱۵ کیلوگرم تأمین می گردد. دیتا های برداشتی از طریق یک دیتالاگر ۸ کاناله به کامپیوتر منتقل و در محیط نرم افزاری Vira Data Soft پردازش می شوند.



شکل ۳-۴ دستگاه تک محوری با ظرفیت ۵ تن

### ۳-۴-۳ آزمایش کشش غیر مستقیم لاتمن اصلاحی AASHTOT 283

شرایط آب و هوایی از جمله عوامل تأثیر گذار بر دوام و پایداری روسازی های آسفالتی است. یکی از مهم ترین خرابی هایی که روسازی های انعطاف پذیر با آن مواجه اند و برگرفته از شرایط آب و هوایی است، خرابی رطوبتی می باشد. در طی این خرابی رطوبت چسبندگی بین قیر و سنگدانه را تضعیف نموده و به مرور زمان جدا شدن قیر و عریان شدگی سنگدانه ها می گردد (شکل ۳-۵). این آسیب سال هاست که به عنوان یک نگرانی مهم در بین مهندسين روسازی مطرح بوده است. از سال ۱۹۲۰، محققان به دنبال آزمایشاتی هستند که بتوانند مخلوط های آسفالتی را از نظر پتانسیل عریان شدگی ارزیابی نمایند. لاتمن اصلاح شده با استاندارد AASHTO T283 از جمله این آزمایشات می باشد که برای بررسی و ارزیابی خرابی رطوبتی ابداع گردیده است [۶۸].



شکل ۳-۵ تصویر شماتیک محصور شدن رطوبت بین قیر و سنگدانه در یک مخلوط آسفالتی [۶۸]

در این تحقیق از همین روش استفاده گردیده است. به طور کلی این روش میزان حساسیت رطوبتی را بر اساس شاخصی بیان می‌کند که این شاخص، نسبت میانگین مقاومت کششی غیر مستقیم نمونه های گروه مرطوب به خشک است. به همین خاطر نمونه های آسفالتی به ۲ دسته کلی خشک و مرطوب تقسیم شده و برای هر نمونه ۶ تکرار که ۳ تا از آن ها مربوط به حالت خشک و ۳ تای دیگر مربوط به حالت مرطوب است؛ ساخته می‌شود. لازم به ذکر است طبق آیین نامه، میزان هوای موجود در نمونه ها باید حدود ۷ درصد باشد که رسیدن به این مقدار با تنظیم تعداد ضربات چکش مارشال به هنگام تراکم امکان پذیر است. در این تحقیق نیز برای دستیابی به ۷ درصد حفرات هوا؛ کلیه نمونه ها با ۳۵ ضربه و فقط نمونه های حاوی سرباره با ۲۸ ضربه ساخته شده اند. در شیوه لاتمن اصلاح شده ۲ گام اشباع سازی و چرخه ذوب و یخ نهفته شده که برای هر کدام شرایط خاصی مطرح شده است. نمونه هایی که برای حالت مرطوب تفکیک شده اند باید این پروسه را به صورت کامل طی نمایند. درجه اشباع باید بین ۷۰-۸۰ درصد باشد که در این پژوهش با تنظیم فشار خلأ و زمان اشباع این امر نائل گردیده است. همان گونه که در شکل ۳-۶ دیده می‌شود، نمونه های استوانه ای اشباع شده درون کیسه پلاستیکی گذاشته شده و به مدت ۱۶ ساعت داخل فریزر با دمای ۱۸- درجه سانتی گراد قرار گرفتند تا عملیات

انجماد انجام گیرد. پس از طی این زمان؛ نمونه ها به مدت ۲۴ ساعت در حمام آب ۶۰ درجه گذاشته شدند تا بدین صورت فرآیند ذوب هم انجام گرفته باشد. پس از آن که نمونه ها چرخه ذوب و یخ را سپری کردند؛ کلیه نمونه ها برای انجام آزمایش کشش غیر مستقیم مهیا گشتند. برای انجام این آزمایش در دمای ۲۵ درجه سانتی گراد و با سرعت بارگذاری ۵۰ میلیمتر بر دقیقه، دستگاه جک فشاری ساخت Zwick آلمان به همراه قالب کشش غیر مستقیم به کار گرفته شده است (شکل ۳-۷). پس از برداشت نیروی لازم برای شکست هر نمونه؛ مقدار مقاومت کششی برای هر نمونه با توجه به رابطه ۳-۱ محاسبه گردیده است.

$$S_t = \frac{2000 P}{\pi t D} \quad (\text{رابطه ۳-۱})$$

که در رابطه فوق :

$S_t$  : مقاومت کششی (کیلو پاسکال)

$P$  : حداکثر نیرو (نیوتن)

$t$  : ضخامت نمونه (میلیمتر)

$D$  : قطر نمونه (میلیمتر)

برای محاسبه شاخص حساسیت رطوبتی؛ متوسط مقاومت کششی گروه خشک و مرطوب ( $S_t$ ) هر

نمونه تعیین گردید و در نهایت از رابطه ۳-۲ استفاده شد.

$$TSR = \frac{S_{t \text{ مرطوب}}}{S_{t \text{ خشک}}} \quad (\text{رابطه ۳-۲})$$





شکل ۳-۶ تصویری از سیکل ذوب و یخ نمونه های اشباع



شکل ۳-۷ نمایی از آزمایش مقاومت کششی غیر مستقیم نمونه آسفالتی با دستگاه جک فشاری

### ۳-۴-۴ آزمایش شاخص مارشال

این آزمایش طبق استاندارد ASTM D1559 با نرخ بارگذاری ۵۰/۸ میلی‌متر بر دقیقه و در دمای ۶۰ درجه سانتی‌گراد انجام گرفته است. برای تأمین این دما، نمونه‌ها به مدت ۴۰ دقیقه در حمام آب با دمای ۶۰ درجه سانتی‌گراد قرار گرفته‌اند. در حقیقت خروجی آزمایش مارشال ۲ پارامتر مهم استقامت مارشال (کیلونیوتن) و روانی مارشال (میلی‌متر) می‌باشد که نسبت استقامت به روانی را، اصطلاحاً شاخص مارشال یا ضریب مارشال<sup>۱</sup> می‌نامند که طبق رابطه ۳-۳ محاسبه می‌گردد. از این شاخص می‌توان برای بررسی میزان مقاومت نمونه‌های آسفالتی در برابر تغییر شکل پلاستیک یا حتی شیارشدگی استفاده کرد. هر چه میزان این ضریب بیشتر باشد، نشان می‌دهد که مخلوط از سختی بالاتری برخوردار بوده و مقاومت بیشتری در برابر شیارشدگی دارد. در این تحقیق از دستگاه یونیورسال شرکت Zwick آلمان با ظرفیت ۱۵ تن؛ برای انجام این آزمایش استفاده گردید که در شکل ۳-۸ مشاهده می‌شود.

$$\text{ضریب مارشال} = \frac{\text{استقامت (KN)}}{\text{روانی (mm)}} \quad (\text{رابطه ۳-۳})$$

---

<sup>۱</sup> Marshall Quotient (MQ)



شکل ۳-۸ تصویر جک مارشال و نحوه قرارگیری نمونه در آن

### ۳-۵ نحوه ساخت نمونه

در این پژوهش برای ساخت نمونه، ابتدا مصالح سنگی توسط دستگاه شیکر و سری الک ها با توجه به دانه بندی مذکور؛ الک شده اند. دو نوع مصالح گل قرمز و گل کربناته چون به صورت پودر بودند، در قالب ذرات عبوری از الک شماره ۲۰۰ (فیلر) استفاده شده اند. اما در مورد سرباره که تاکنون پژوهش های زیادی روی آن انجام گرفته و انواع مختلف دانه بندی سنگدانه های آن بکار گرفته شده؛ این مطلب حائز اهمیت است که چون هدف اصلی پژوهش حاضر بررسی خودترمیمی مخلوط های آسفالتی است و طی تحقیقاتی که توسط لو و همکاران (۲۰۲۰) انجام گرفت؛ مشخص گردید که جایگزینی حجمی ۶۰ درصد سرباره درشت دانه با سایز عبوری از الک ۳/۸ اینچ و مانده روی الک شماره ۴ (۹/۵-۴/۷۵ میلیمتر) بهترین عملکرد را در این حوزه داشته است [۲۸]. به همین خاطر نتایج این تحقیقات مبنای کار این پژوهش قرار گرفت. مصالح سنگی پس از توزین و جایگزینی حجمی (برای نمونه هایی که حاوی سایر مصالح هم بودند) به مدت ۲۴ ساعت در گرمخانه با دمای ۱۷۰ درجه سانتی گراد قرار گرفتند تا به خوبی خشک شوند. از آن جایی که قیر ۶۰-۷۰ مورد استفاده در این تحقیق از شرکت نفت پاسارگاد

تأمین گردیده، با ارائه مشخصات قیر و داشتن ویسکوزیته در چند دمای مختلف، دمای اختلاط ۱۵۵ درجه سانتی گراد تعیین شده است. به همین جهت ظروف قیر توزین شده به مدت ۱/۵ ساعت در همین دما قرار گرفته اند. سنگدانه ها به همراه قیر مذاب در مخزن میکسر با هم مخلوط شده و پس از اختلاط کامل؛ به درون قالب مارشال چرب شده ریخته شدند. سپس قالب به همراه مخلوط محتوی آن به منظور تراکم در زیر چکش مارشال قرار گرفتند. تعداد ضربات در نظر گرفته شده به جهت ساخت نمونه های لازم برای آزمایشات مارشال و خودترمیمی، ۷۵ ضربه بوده است. برای ساخت نمونه های حساسیت رطوبتی همان گونه در بخش ۳-۴-۳ هم اشاره شد، میزان حفرات هوای موجود در این نمونه ها طبق استاندارد AASHTO T283 باید ۷ درصد باشد و رسیدن به این مقدار هم تنها با تنظیم تعداد ضربات امکان پذیر است. بنابراین با ساخت نمونه های بسیار و سعی و خطای انجام گرفته، در نهایت مشخص گردید که برای نمونه های بدون سرباره با ۳۵ ضربه و برای نمونه های حاوی سرباره با ۲۸ ضربه می توان به مقدار هوای ۷ درصد دست یافت. در جدول ۳-۹ تعداد ضربات اعمال شده بر هر دو وجه نمونه ها آورده شده است. پس از تراکم، نمونه ها به وسیله جک از داخل قالب های مارشال بیرون آورده شدند.

جدول ۳-۹ تعداد ضربات چکش برای ساخت نمونه ها در آزمایش های مختلف

نوع نمونه ها	تعداد ضربات		
	آزمایش حساسیت رطوبتی	آزمایش خودترمیمی	آزمایش مارشال
بدون سرباره	۳۵	۷۵	۷۵
با حضور سرباره	۲۸	۷۵	۷۵

انواع ترکیبات اصلی مصالح برای ساخت نمونه های متنوع آسفالتی مطابق جدول ۳-۱۰ بوده است.

جدول ۳-۱۰ انواع ترکیبات تشکیل یافته بین سنگدانه ها به صورت درصد حجمی در پژوهش

نام مخلوط	سنگدانه طبیعی آهکی		سرباره	گل قرمز	گل کربناته
	مانده روی الک شماره ۴ (%)	عبوری از الک شماره ۲۰۰ (%)			
L	۱۰۰	۱۰۰	-	-	-
SL	۴۰	۱۰۰	۶۰	-	-
LR50	۱۰۰	۵۰	-	۵۰	-
LR100	۱۰۰	-	-	۱۰۰	-
LP50	۱۰۰	۵۰	-	-	۵۰
LP100	۱۰۰	-	-	-	۱۰۰
SLR50	۴۰	۵۰	۶۰	۵۰	-
SLR100	۴۰	-	۶۰	۱۰۰	-
SLP50	۴۰	۵۰	۶۰	-	۵۰
SLP100	۴۰	-	۶۰	-	۱۰۰
LR50P50	۱۰۰	-	-	۵۰	۵۰
SLR50P50	۴۰	-	۶۰	۵۰	۵۰

شکل ۳-۹ تعدادی از نمونه های مارشال ساخته شده در طی این تحقیق را نشان می دهد.



شکل ۳-۹ تصویری از نمونه های استوانه ای مارشال ساخته شده

### ۳-۶ ساخت نمونه های نیمه استوانه ای (SCB)

برای بررسی میزان خودترمیمی مخلوط های آسفالتی مختلف در پژوهش حاضر؛ باید آزمایش خمش سه نقطه ای روی نمونه های نیمه استوانه ای انجام می گرفت. به همین جهت نمونه های استوانه ای ساخته شده با انواع ترکیبات سنگدانه ای، با استفاده از دستگاه برش سنگ با دقت بالا، برش داده شدند به گونه ای که از هر نمونه استوانه ای، ۴ نمونه نیمه استوانه ای به دست آمد. هر نمونه به طور متوسط

۱۰۰ میلیمتر قطر و حدوداً ۳۰ میلیمتر ضخامت داشته است. برای هر نمونه یک شکاف<sup>۱</sup> در میانه آن به ضخامت ۲/۵ میلیمتر و عمق ۱۰ میلیمتر تعبیه شد. لازم به ذکر است برای آن که شکاف دقیقاً در وسط نمونه ایجاد شود و خطای حاصل از برشکاری به حداقل ممکن برسد، از یک قالب فلزی به منظور ثابت نگه داشتن نمونه نیمه استوانه ای برش خورده بهره برده شد (شکل ۳-۱۰). چون فرآیند برشکاری همراه با آب بوده است؛ نمونه ها به مدت ۴ روز در دمای محیط نگهداری شدند تا رطوبت حاصل از برشکاری را از دست داده و به طور کامل خشک شوند.



شکل ۳-۱۰ (۱) برش نمونه استوانه ای (۲) ایجاد شکاف در وسط نمونه (۳) نمونه نیمه استوانه ای نهایی

### ۳-۷ نحوه آزمایش خودترمیمی و سیکل های مربوط به آن

به طور کلی مفهوم ترمیم؛ به معنای نسبت مقاومت ثانویه (بعد از ترمیم) به مقاومت اولیه نمونه است. برای بررسی پدیده ترمیم می توان از آزمایشات گوناگونی بهره گرفت که در این تحقیق آزمایش خمش سه نقطه ای بکار گرفته شده است. پس از آن که نمونه های نیمه استوانه ای رطوبت ناشی از فرآیند برشکاری را از دست داده و به طور کامل خشک گردیدند، از آن جایی که دمای آزمایش ۲۰- درجه سانتی گراد بوده است؛ نمونه ها به مدت ۲۴ ساعت در داخل فریزر قرار گرفتند تا برای یک

<sup>۱</sup> Notch

شکست ترد آماده شوند. فقط برای آن که نمونه ها میزان زیادی از رطوبت فریزر را جذب نکنند، با کسپه پلاستیکی درون فریزر جای داده شده اند. برای انجام آزمایش خمش سه نقطه ای، قالب مخصوصی که در آن فاصله بین ۲ تکیه گاه تحتانی ۸ سانتیمتر و تکیه گاه فوقانی در میانه این فاصله قرار می گرفت، طراحی و ساخته شده است. برای انجام آزمایش نیز از دستگاه تک محوری با ظرفیت ۵ تنی موجود در آزمایشگاه ژئوتکنیک کمک گرفته شد. نحوه قرار گیری نمونه نیمه استوانه ای به همراه قالب خمش سه نقطه ای در دستگاه تک محوری در شکل ۳-۱۱ قابل ملاحظه است.



شکل ۳-۱۱ آزمایش خمش سه نقطه ای با دستگاه تک محوری و قالب ساخته شده

با شکست هر نمونه و تبدیل شدن آن به ۲ قسمت مجزا، اطلاعات مربوط به نیروی شکست و جابه جایی (کرنش) از طریق دیتالاگر به کامپیوتر منتقل شده و با نرم افزار مخصوص پردازش می شود. پس از شکست کلیه نمونه ها و ثبت مقاومت اولیه شان، ۴ ساعت در دمای محیط استراحت داده شدند. سپس نمونه ها برای انجام عملیات ترمیم آماده گشتند. روش گرمایشی استفاده شده در این پژوهش، استفاده از امواج ماکروویو بوده است. به همین خاطر یک عدد دستگاه ماکروویو ۴۰ لیتری سامسونگ

مدل J5133 با توان ۸۰۰ وات و فرکانس ۲۴۵۰ مگا هرتز برای تحقیقات پژوهش حاضر فراهم گردیده است. نمونه های نیمه استوانه ای بر اساس نوع مصالحی که درون آن ها وجود داشت، تحت گرمایش ماکروویو در زمان های مختلف ۷، ۱۵، ۳۰، ۶۰، ۹۰، ۱۲۰ و ۱۵۰ ثانیه قرار گرفتند. بلافاصله بعد از اعمال گرمایش ماکروویو، دمای نمونه با استفاده از دوربین حرارتی مدل NEC-AVIO-R300SR-HD با دقت ۱ درجه سانتی گراد مشاهده و ثبت گردیده است (شکل ۳-۱۲). سپس دو قطعه چسبیده شده نمونه بیرون آورده شد و برای ترمیم بهتر، کشی به ضخامت یک سانتی متر به دور نمونه انداخته شده تا وظیفه اعمال نیروی همه جانبه به نمونه را بر عهده داشته باشد. نمونه ها بعد از این مرحله به مدت ۲۴ ساعت تحت استراحت قرار گرفتند تا حداکثر میزان ترمیم را تجربه نمایند. پس از گذشت این زمان، برای فراهم شدن شرایط شکست بعدی؛ نمونه ها مجدداً با کیسه پلاستیکی به مدت ۲۴ ساعت درون فریزر با دمای ۲۰- درجه سانتی گراد قرار گرفته اند، که با انجام آزمایش خمش سه نقطه ای بر روی نمونه های ترمیم یافته و ثبت نیروی شکست آن ها، اولین چرخه ترمیم به اتمام رسیده است. ۷ چرخه (سیکل) ترمیم در پژوهش حاضر در نظر گرفته شد و میزان شاخص ترمیم<sup>۱</sup> در هر چرخه، با استفاده از رابطه ۳-۴ تعیین گردید.

$$HL = \frac{F_i}{F_o} \quad (\text{رابطه ۳-۴})$$

که در رابطه فوق :

HL : میزان ترمیم (سطح ترمیم) نمونه

F<sub>o</sub> : حداکثر نیروی شکست اولیه (مقاومت اولیه) نمونه

F<sub>i</sub> : حداکثر نیروی شکست نمونه بعد از i امین چرخه

---

<sup>۱</sup> Healing Level





شکل ۳-۱۲ تصویر فرآیند گرمایش ماکروویو و ثبت دمای نمونه با دوربین حرارتی



## فصل چہارم:

### تخلیل و تفسیر نتائج

## ۴-۱ مقدمه

در این فصل به تحلیل و تفسیر نتایج حاصل از آزمایش های انجام گرفته در این پژوهش پرداخته می شود. با توجه به آن که در پژوهش حاضر ۴ آزمایش صورت گرفته، نتایج آن ها را می توان به صورت زیر فهرست کرد.

(۱) نتایج مربوط به تعیین درصد قیر بهینه

(۲) نتایج میزان خودترمیمی در مخلوط های مختلف

(۳) تعیین مقدار شاخص حساسیت رطوبتی برای هر یک از مخلوط های آسفالتی

(۴) بررسی نتایج مربوط به شاخص (ضریب) مارشال و مقاومت در برابر شیار شدگی

## ۴-۲ بررسی نتایج

### ۴-۲-۱ درصد قیر بهینه

برای تعیین این درصد، عواملی چون درصد هوای نمونه<sup>۱</sup>، وزن مخصوص حقیقی نمونه<sup>۲</sup>، میزان استقامت و روانی مارشال<sup>۳</sup> و فضای خالی موجود در مصالح سنگی<sup>۴</sup> مورد نیاز بود. به همین خاطر پارامترهایی نظیر؛ وزن خشک نمونه، وزن غوطه وری نمونه، وزن نمونه اشباع با سطح خشک<sup>۵</sup>، حداکثر وزن مخصوص نمونه<sup>۶</sup>، وزن مخصوص مصالح سنگی<sup>۷</sup> تعیین گشتند. بعد از محاسبه کلیه این پارامترها و ترسیم نمودارهای مربوطه، درصد قیر بهینه برای نمونه ها بدست آمد که پس از کنترل آن ها با ضوابط آیین نامه ای، این مقادیر نهایی گشتند. لازم به ذکر است که یکی از ضوابط مهم آیین نامه، وجود ۴

---

<sup>۱</sup> P<sub>a</sub> (%)

<sup>۲</sup> Bulk specific gravity of compacted mix (G<sub>mb</sub>)

<sup>۳</sup> Marshall Stability & Flow

<sup>۴</sup> Voids in Mineral Aggregate (VMA)

<sup>۵</sup> Saturated surface-dry (SSD)

<sup>۶</sup> Maximum specific gravity of compacted mix (G<sub>mm</sub>)

<sup>۷</sup> Bulk specific gravity of aggregate (G<sub>sb</sub>)

درصد هوا در نمونه های آسفالتی متراکم شده می باشد که در این تحقیق نیز مبنای کار قرار گرفته است. در تحقیق حاضر برای تعیین این درصد؛ نمونه ها به ۲ دسته با و بدون سرباره تقسیم شده اند که مقادیر مربوط به آن ها در جدول ۴-۱ قابل مشاهده است.

جدول ۴-۱ مقادیر درصد قیر بهینه انواع نمونه ها

نام نمونه	درصد قیر بهینه
L	۴/۹
LR50	۴/۹
LR100	۴/۹
LP50	۴/۹
LP100	۴/۹
LR50P50	۴/۹
SL	۵/۲
SLR50	۵/۲
SLR100	۵/۲
SLP50	۵/۲
SLP100	۵/۲
SLR50P50	۵/۲

در این جدول L معرف مصالح سنگی آهکی (Lime Stone)، S معرف سرباره (Steel Slag)، R نمایانگر گل قرمز (Red Mud Waste) و P بیانگر گل کربناته (Press Mud Waste) می باشد. تنها مصالحی که میزان درصد قیر را تغییر داده، سرباره بوده است. همان طور که در جدول فوق مشاهده می شود، سرباره مقدار درصد قیر بهینه را نسبت مصالح طبیعی حدود ۰/۳ درصد افزایش داده است. این افزایش مصرف قیر نیز به دلیل بالا بودن تخلخل ذاتی این گونه مصالح می باشد که در پژوهش های متعدد انجام گرفته روی این سنگدانه ها؛ به آن اشاره گردیده است.

#### ۴-۲-۲ نتایج خودترمیمی

خودترمیمی یکی از ویژگی های مخلوط آسفالتی است که در دهه های اخیر به عنوان یک موضوع

داغ و پر طرفدار در جوامع علمی مهندسی راه و ترابری مطرح بوده و مورد توجه محققین قرار گرفته است. هدف اصلی تحقیق حاضر نیز بررسی همین موضوع می‌باشد. در ترمیم مسأله ای که بسیار حائز اهمیت است، تعیین سطح (نرخ) ترمیم می‌باشد که مقاومت نمونه پس از ترمیم را با مقاومت اولیه نمونه مقایسه می‌کند. حال هر چه میزان این شاخص بیشتر باشد؛ مخلوط آسفالتی از توانایی بالاتری در ترمیم برخوردار بوده و مشکلات مربوط به تعمیر و نگهداری کمتر می‌گردد. در زمینه آزمایشگاهی؛ انتخاب شیوه آزمایش، نوع نمونه و ابعاد آن و همچنین روش ترمیم، ۳ رکن اساسی حوزه خودترمیمی می‌باشند. منظور از روش ترمیم، نوع گرمایش است. چون مفهوم ترمیم آن است که، قیر با پذیرفتن حرارت روان شده و بتواند ترک های رخ داده ناشی از شکست را پر نماید. بنابراین انتخاب نوع گرمایش در فرآیند ترمیم نقش بسیار مهمی را ایفا می‌کند. پس از انتخاب نوع گرمایش مسأله ای که پیرو آن اهمیت پیدا خواهد کرد، انتخاب نوع مصالح یا افزودنی هایی است که بتوانند با پذیرفتن گرما به زود گرم کردن و روان شدن قیر کمک کرده و عملیات ترمیم را تسریع ببخشند. اگر روش گرمایشی استفاده از حرارت مستقیم باشد، نقش نوع مصالح چندان به چشم نخواهد آمد؛ اما اگر روش های گرمایش القایی یا امواج ماکروویو مد نظر باشد، مهم ترین وظیفه بر عهده مصالح و افزودنی هاست. در کوره های القایی فلزات بسیار سریع گرم می‌شوند و مواد دارای خاصیت قطبی و عناصر فلزی به خوبی امواج ماکروویو را جذب می‌نمایند. از آن جایی که قیر به تنهایی هیچ کدام از این خصوصیات را ندارد، بنابراین عدم انتخاب صحیح مصالح برای این دو روش گرمایشی عملاً کار بی فایده ای محسوب می‌گردد. نوع گرمایش مورد استفاده در این تحقیق، امواج ماکروویو بوده است. به همین جهت ۲ نوع مصالح سرباره فولادی و گل قرمز به دلیل دارا بودن ترکیبات فلزی در ساختارشان و داشتن قابلیت جذب امواج ماکروویو؛ در این پژوهش انتخاب گردیده اند. بنابراین نمونه های آسفالتی ساخته شده به منظور بررسی خاصیت خودترمیمی بر اساس ترکیبات این مصالح بوده است. مطلب مهم دیگر، تعیین تعداد چرخه های ترمیم است که در پژوهش های مختلف، متفاوت می‌باشد. اما معمولاً به منظور بررسی بهتر و دقیق تر توانایی

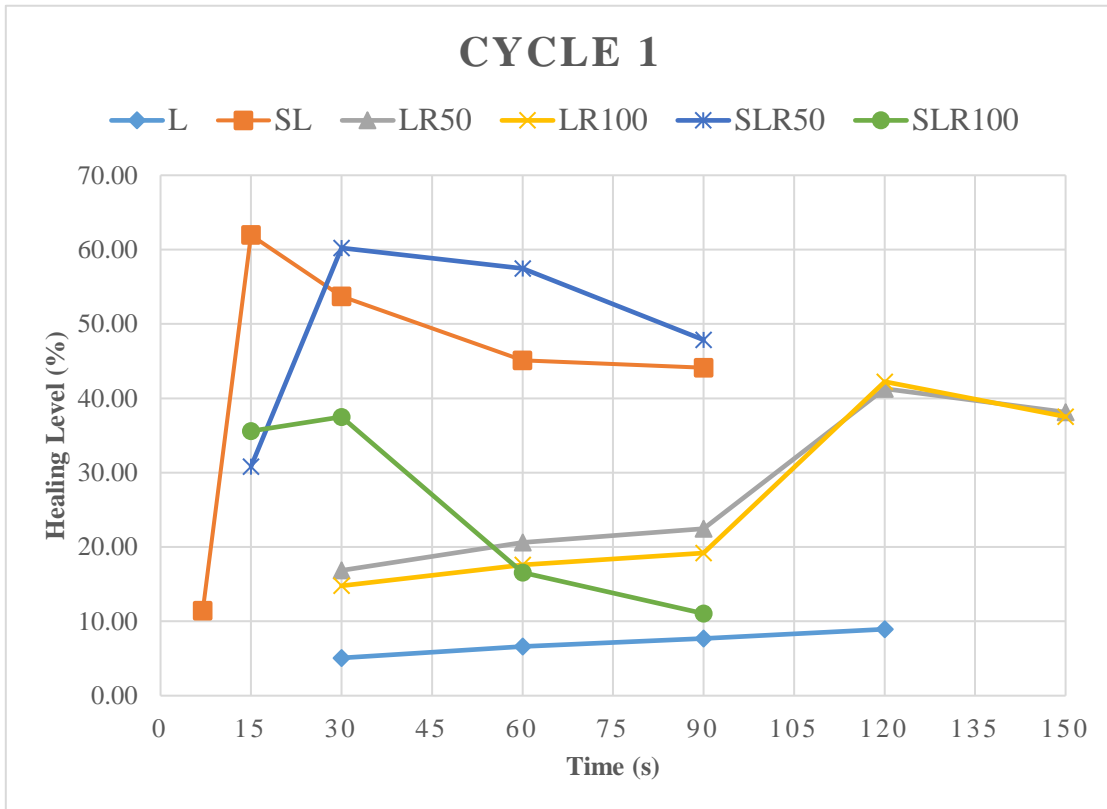
ترمیم، ۷ چرخه (سیکل) ترمیم در نظر گرفته می‌شود. در پژوهش حاضر نیز ۷ چرخه ترمیم مورد نظر بوده است. در بررسی خودترمیمی یک مخلوط آسفالتی ۲ پارامتر زمان بهینه ترمیم و دمای بهینه ترمیم از اهمیت بالایی برخوردارند که به مقایسه میزان ترمیم انواع مخلوط‌ها کمک می‌نمایند. از آن جایی که فقط ۲ نوع مصالح سرباره فولادی و گل قرمز در حیطة ترمیم کمک کننده بودند، بنابراین تنها نمونه‌هایی که ناشی از ترکیبات آن‌ها بوده‌اند، مورد بررسی قرار گرفته‌اند. این نمونه‌ها به همراه زمان‌های گرمایش در جدول ۴-۲ آورده شده است.

جدول ۴-۲ انواع نمونه‌های خودترمیمی ساخته شده به همراه زمان‌های گرمایش

نام نمونه	محتوی ترکیب	زمان‌های گرمایش (ثانیه)
L	Lime	۳۰، ۶۰، ۹۰ و ۱۲۰
LR50	Lime + 50% Red Mud	۳۰، ۶۰، ۹۰، ۱۲۰ و ۱۵۰
LR100	Lime + 100% Red Mud	۳۰، ۶۰، ۹۰، ۱۲۰ و ۱۵۰
SL	Slag + Lime	۷، ۱۵، ۳۰، ۶۰ و ۹۰
SLR50	Slag+Lime+50% Red Mud	۱۵، ۳۰، ۶۰ و ۹۰
SLR100	Slag+Lime+100% Red Mud	۱۵، ۳۰، ۶۰ و ۹۰

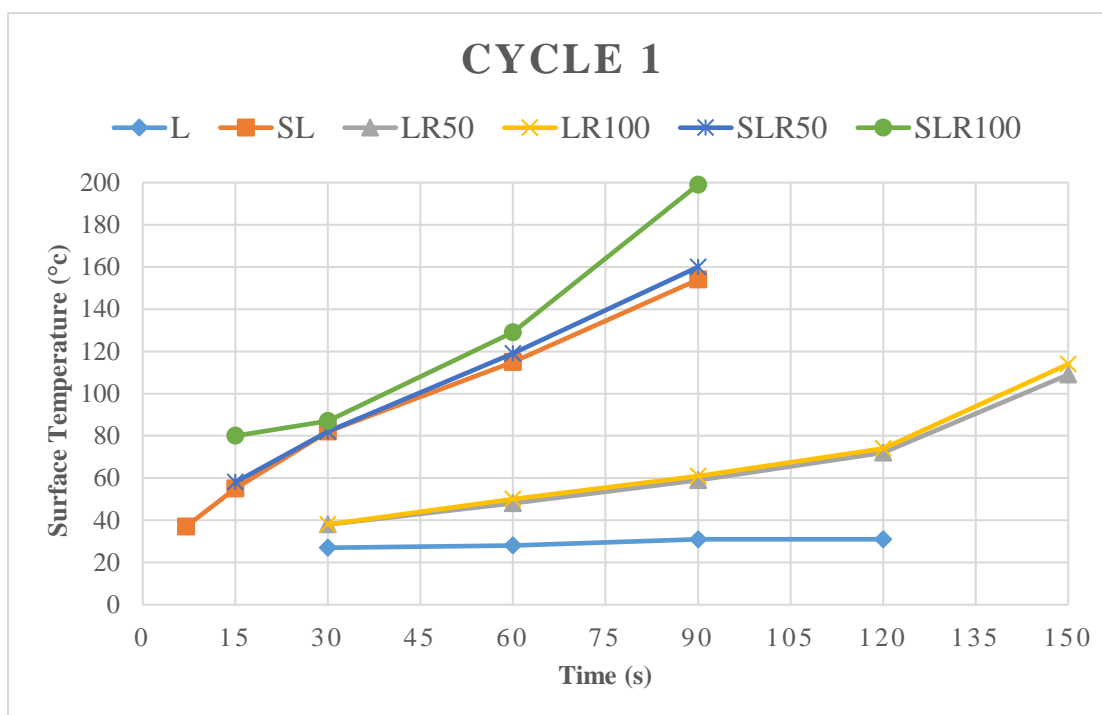
همان‌طور که از جدول ۴-۲ پیداست، مدت زمان‌های انتخابی برای گرمایش ماکروویو در نمونه‌های حاوی سرباره، پایین‌تر بوده است که دلیل این موضوع قابلیت بالای سرباره در جذب امواج ماکروویو و گرم شدن سریع آن می‌باشد. در زمان‌های بیشتر از ۹۰ ثانیه، دمای این نمونه‌ها تا حدی بالا رفته که موجب سوختگی قیر و حتی گسیختگی نمونه می‌شود. سایر پژوهش‌های صورت گرفته توسط محققین مختلف در زمینه خودترمیمی بر روی سنگدانه‌های سرباره، این مطلب را تأیید می‌نمایند. آن‌ها در پژوهش‌های خود به صراحت بیان کرده‌اند که ترمیم مخلوط‌های حاوی سرباره در زمان‌های پایین رخ می‌دهد [۳۳].

در ادامه نتایج مربوط به نرخ ترمیم و دمای ترمیم در زمان‌های گرمایشی مختلف را برای هر نمونه در هر سیکل بررسی خواهیم کرد.



شکل ۴-۱ نمودار میزان نرخ ترمیم نمونه ها در زمان های مختلف گرمایش برای سیکل اول ترمیم





شکل ۲-۴ نمودار دمای ترمیم نمونه ها در زمان های مختلف گرمایش برای سیکل اول ترمیم

در این سیکل؛ همان طور که از نمودارهای شکل ۱-۴ مشاهده می شود، بیشترین مقادیر نرخ ترمیم متعلق به دو ترکیب SL و SLR<sup>۵۰</sup> می باشد. همچنین طبق شکل ۲-۴ بالاترین مقادیر دما مربوط به ترکیب SLR<sup>۱۰۰</sup> است. برای هر نمونه از ترکیب، زمان و دمای بهینه به شرح جدول ۳-۴ است.

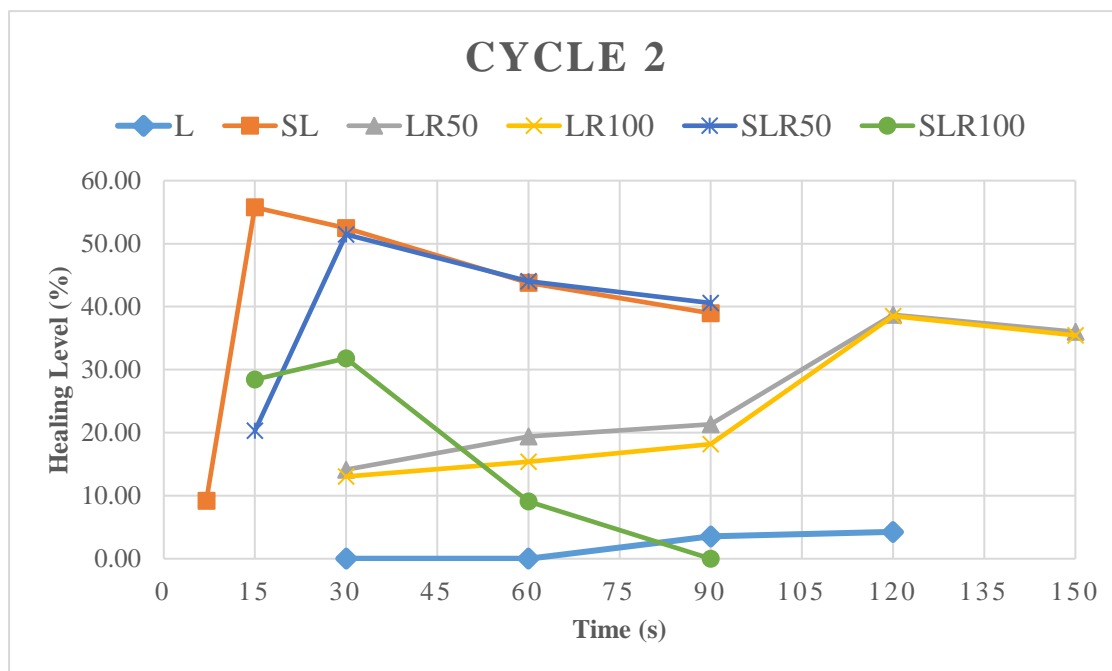
جدول ۳-۴ زمان و دمای بهینه ترمیم برای انواع نمونه ها در سیکل اول ترمیم

نام نمونه	بهترین نرخ ترمیم (%)	زمان بهینه ترمیم (s)	دمای بهینه ترمیم (°C)
L	۸/۹۴	۱۲۰	۳۱
LR50	۴۱/۲۹	۱۲۰	۷۲
LR100	۴۲/۲۴	۱۲۰	۷۴
SL	۶۱/۹۵	۱۵	۵۵
SLR50	۶۰/۲۲	۳۰	۸۲
SLR100	۳۷/۵۰	۳۰	۸۷

با توجه به جدول ۳-۴ می توان بیان کرد؛ نمونه شاهد که تنها با مصالح آهکی ساخته شده، با وجود ۱۲۰ ثانیه زمان ترمیم، نرخ ترمیم آن کمتر از ۱۰ درصد بوده که مقدار بسیار کمی محسوب می شود. اما در همین مدت زمان، استفاده از ۵۰ و ۱۰۰ درصد گل قرمز به عنوان فیلر توانسته میزان نرخ ترمیم

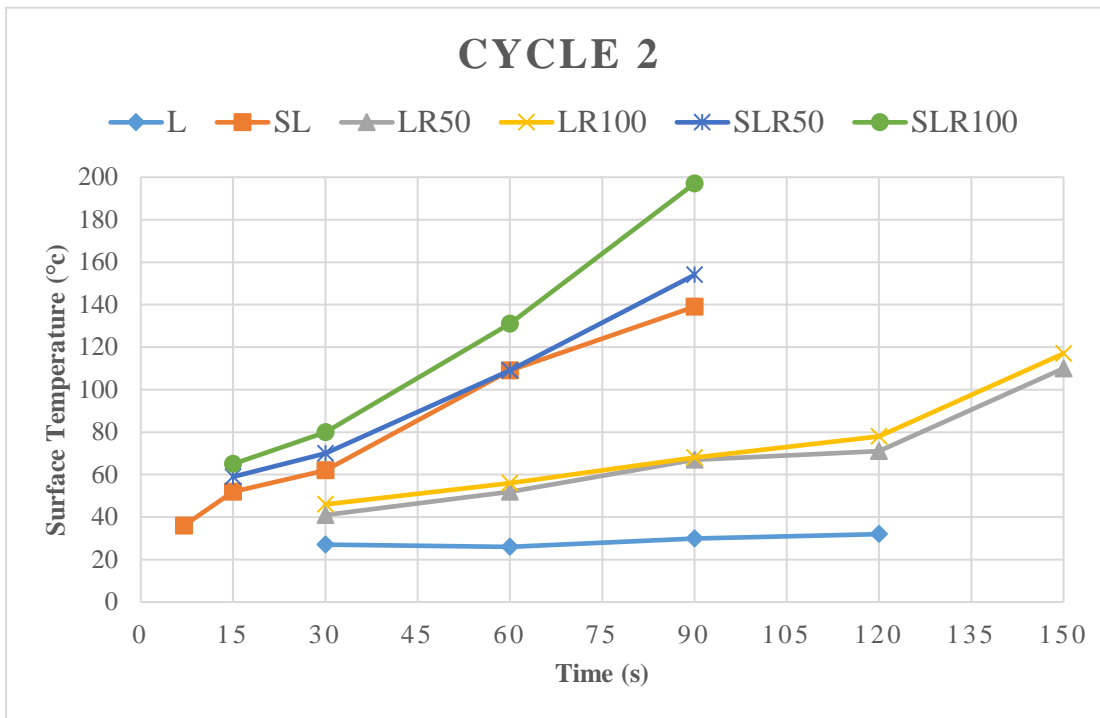
را نسبت به نمونه شاهد، به ترتیب ۳۲/۳۵ و ۳۳/۳ درصد افزایش داده و به مقادیر ۴۱/۲۹ و ۴۲/۲۴ درصد برساند. این نتایج بیانگر آن است که عملکرد گل قرمز به تنهایی رضایت بخش بوده است. استفاده از سرباره به تنهایی هم سبب شده که نمونه آسفالتی حاوی آن، با گذشت زمان ۱۵ ثانیه بالاترین سطح ترمیم را تجربه نماید. با این حال طبق نتایج جدول ۳-۴ موضوعی که برخلاف تصور است، ترکیب سرباره و گل قرمز می‌باشد. زیرا افزودن گل قرمز به مخلوط محتوی سرباره نسبت به نمونه حاوی سرباره تنها، موجب شده که علیرغم افزایش زمان ترمیم، نرخ ترمیم کاهش پیدا کند. این بدان معنی است که که خود سرباره به تنهایی کافی بوده است. در نهایت هم با توجه به نتایج ترمیم برای نمونه‌های LR50 ، LR100 و SLR50 ، SLR100 می‌توان بیان نمود که استفاده از گل قرمز به میزان ۵۰ درصد، بهتر و بهینه تر بوده است.

(۲) سیکل دوم ترمیم



شکل ۳-۴ نمودار میزان نرخ ترمیم نمونه ها در زمان های مختلف گرمایش برای سیکل دوم

ترمیم



شکل ۴-۴ نمودار دمای ترمیم نمونه ها در زمان های مختلف گرمایش برای سیکل دوم ترمیم

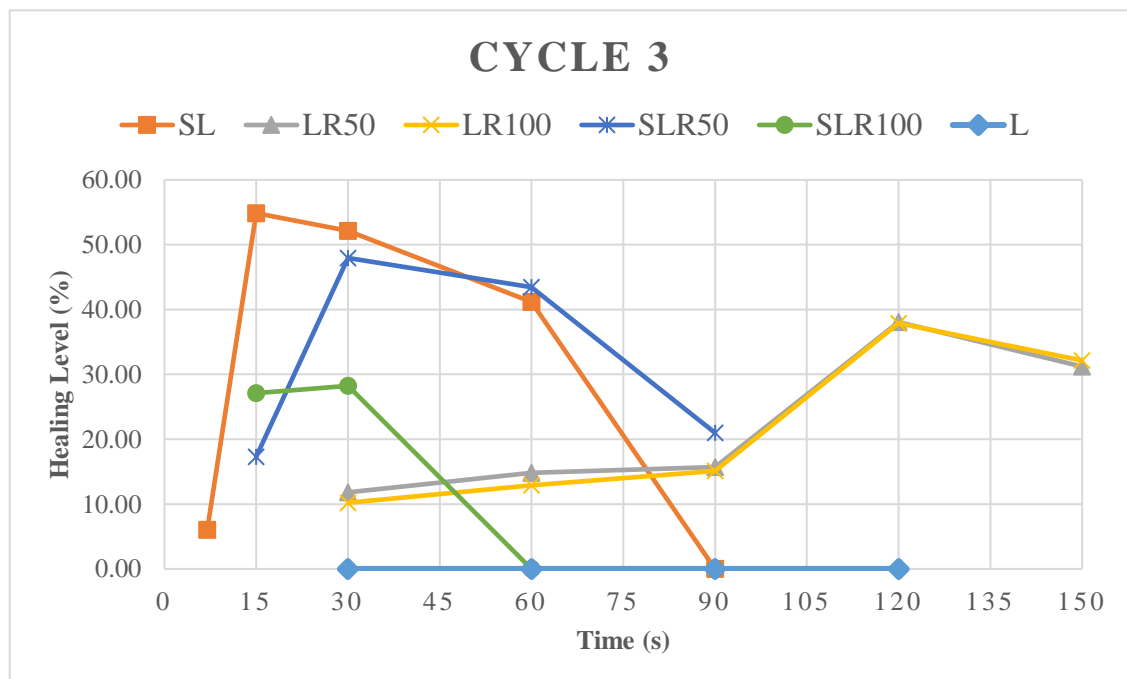
همان گونه که در شکل ۳-۴ مشاهده می گردد به طور کلی، SL و SLR50 بالاترین مقادیر ترمیم را به خود اختصاص داده اند. همچنین با توجه به شکل ۴-۴ SLR100 در زمان های مختلف ترمیم بیشترین دماها را داشته است. فقط با توجه به نمودار ترمیم در این سیکل، مطلبی که باید اشاره شود آن است که نمونه های شاهدی (مصالح آهکی) که تحت گرمایش با ۲ زمان ۳۰ و ۶۰ ثانیه بودند، ترمیمی در آن ها رخ نداد و از این سیکل به بعد آن ها حذف شده اند. علاوه بر این نمونه ای از SLR100 که تحت زمان گرمایش ۹۰ ثانیه ای بوده، به دلیل تحمل گرما بیش از حد ناشی از سیکل قبلی و این سیکل، به طور کامل گسیخته شد و به فرآیند ترمیم نرسید و این نمونه در همین سیکل از دست داده شد. به همین خاطر نرخ ترمیم این نمونه ها صفر در نظر گرفته شده است. زمان و دمای بهینه ترمیم برای هر نمونه مطابق جدول ۴-۴ است.

جدول ۴-۴ زمان و دمای بهینه ترمیم برای انواع نمونه ها در سیکل دوم ترمیم

نام نمونه	بهترین نرخ ترمیم (%)	زمان بهینه ترمیم (s)	دمای بهینه ترمیم (°C)
L	۴/۲۶	۱۲۰	۳۲
LR50	۳۸/۷۱	۱۲۰	۷۱
LR100	۳۸/۵۱	۱۲۰	۷۸
SL	۵۵/۷۵	۱۵	۵۲
SLR50	۵۱/۴۶	۳۰	۷۰
SLR100	۳۱/۸۰	۳۰	۸۰

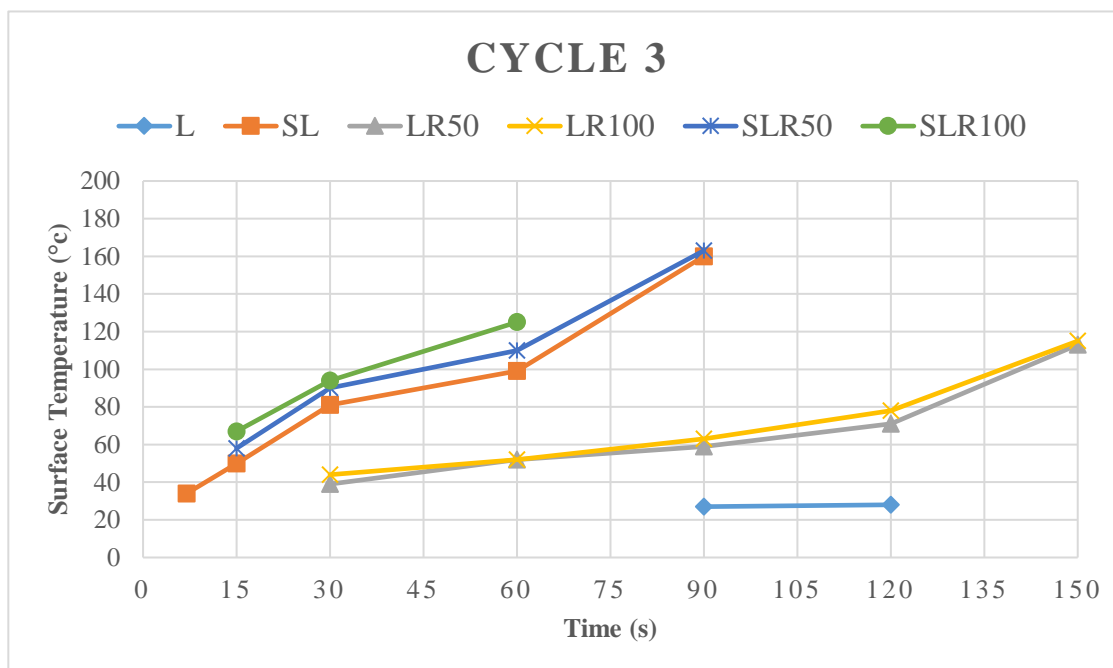
با ملاحظه به جدول ۴-۴ می توان دریافت که مقادیر نرخ ترمیم بهینه به طور کلی در این سیکل نسبت به سیکل قبل کاهش یافته است. نرخ ترمیم نمونه شاهد در بهینه ترین زمان ۴/۲۶ درصد بوده که مقدار خیلی کمی است. سایر نتایج ترمیم نمونه ها در این سیکل نیز مشابه سیکل قبلی می باشد.

۳) سیکل سوم ترمیم:



شکل ۴-۵ نمودار میزان نرخ ترمیم نمونه ها در زمان های مختلف گرمایش برای سیکل سوم

ترمیم



شکل ۴-۶ نمودار دمای ترمیم نمونه ها در زمان های مختلف گرمایش برای سیکل سوم ترمیم

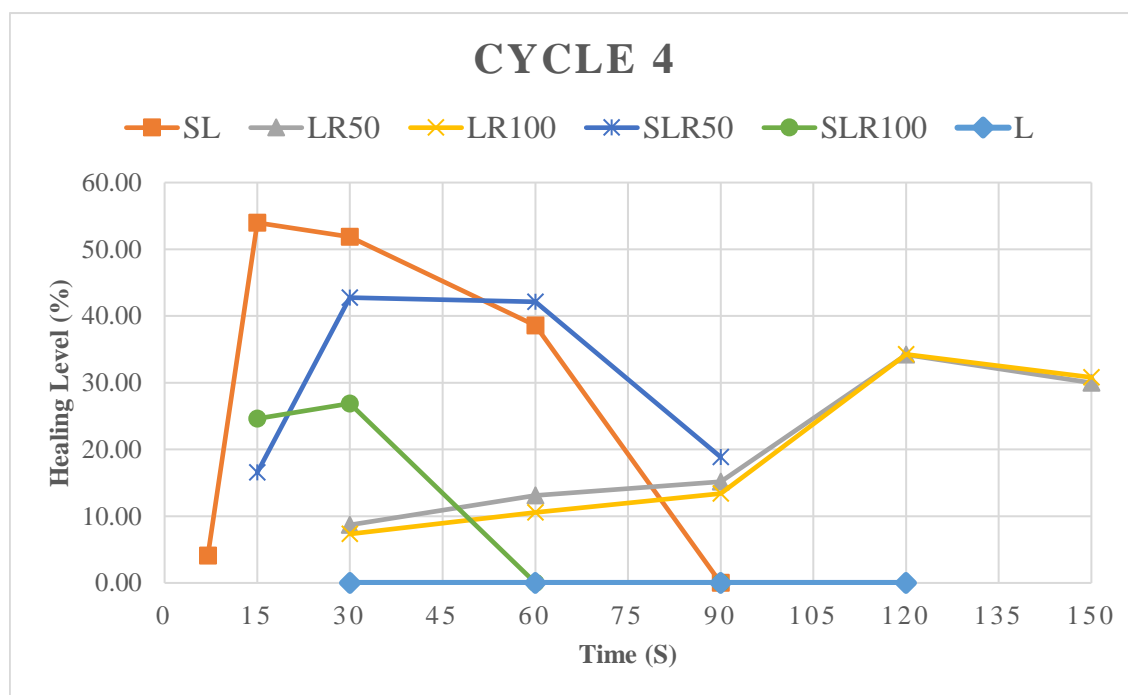
در این سیکل همان طور که از شکل ۴-۵ پیدا است، اولاً نمونه های شاهدهی که در ۲ زمان ۹۰ و ۱۲۰ ثانیه تحت گرمایش ماکروویو قرار گرفته بودند به دلیل ضعیف بودن ترمیم در سیکل های قبلی و پایین بودن دمای ترمیم، متأسفانه در این سیکل ترمیمی بین آن ها رخ نداده است و این نمونه ها نیز در کنار نمونه های قبلی شاهد به طور کلی کنار گذاشته شدند و از این سیکل به بعد دیگر هیچ نمونه شاهدهی برای ترمیم وجود نداشت. ثانیاً علاوه بر نمونه SLR100 که در سیکل قبلی به دلیل گرمایش بیش از اندازه گسیخته شده بود، در این سیکل نمونه های SLR100 با ۶۰ ثانیه گرمایش و SL با ۹۰ ثانیه زمان گرمایش به همین دلیل گسیخته شدند و در همین سیکل کنار گذاشته شده اند. در نمودار نرخ ترمیم، مقدار ترمیم برای تمامی نمونه های مذکور صفر قرار داده شده است. در نمودار دمای ترمیم نیز طبق شکل ۴-۶؛ نمونه هایی که در سیکل قبلی کنار گذاشته شده بودند (۲ نمونه شاهد و یک نمونه SLR100) در ترسیم نمودار حذف شده اند. زمان و دمای بهینه ترمیم برای هر نمونه در این سیکل در جدول ۴-۵ خلاصه شده است.

جدول ۴-۵ زمان و دمای بهینه ترمیم برای انواع نمونه ها در سیکل سوم ترمیم

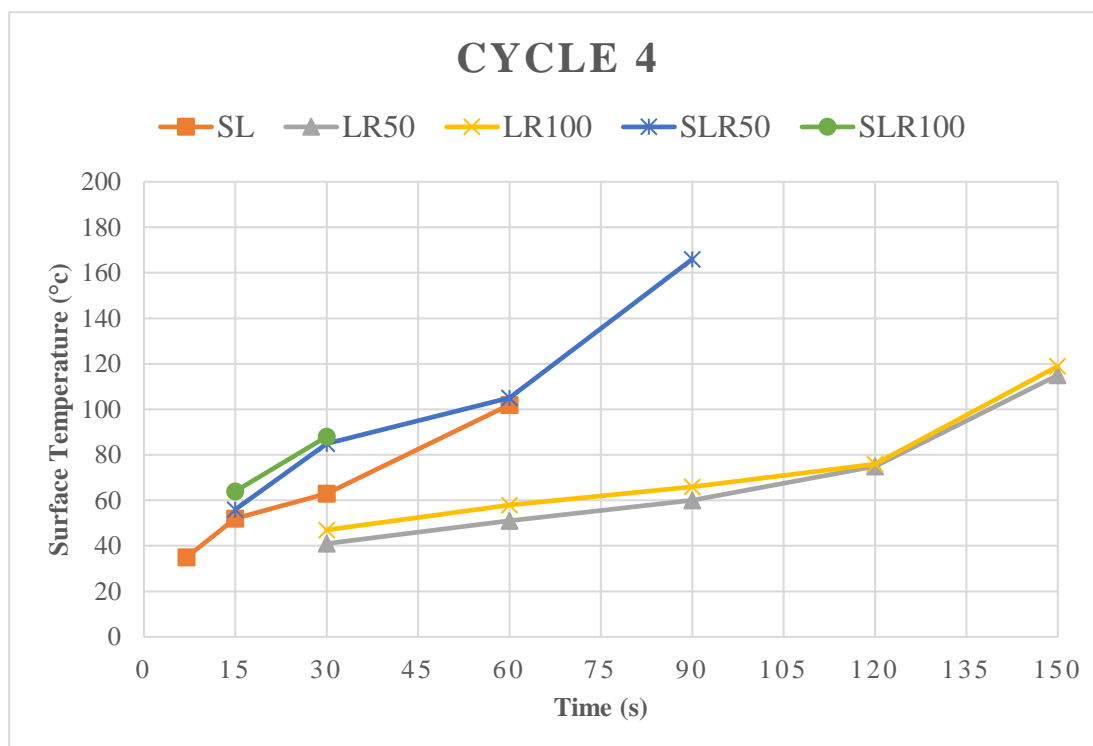
نام نمونه	بهترین نرخ ترمیم (%)	زمان بهینه ترمیم (s)	دمای بهینه ترمیم (°C)
L	۰	-	-
LR50	۳۸/۰۶	۱۲۰	۷۱
LR100	۳۷/۸۹	۱۲۰	۷۸
SL	۵۴/۸۷	۱۵	۵۰
SLR50	۴۷/۹۵	۳۰	۹۰
SLR100	۲۸/۲۳	۳۰	۹۴

نتایج مربوط به زمان و دمای بهینه ترمیم در این سیکل نیز با سیکل های قبلی مطابقت دارد.

(۴) سیکل چهارم ترمیم:



شکل ۴-۷ نمودار میزان نرخ ترمیم نمونه ها در زمان های مختلف گرمایش برای سیکل چهارم ترمیم



شکل ۴-۸ نمودار دمای ترمیم نمونه ها در زمان های مختلف گرمایش برای سیکل چهارم ترمیم

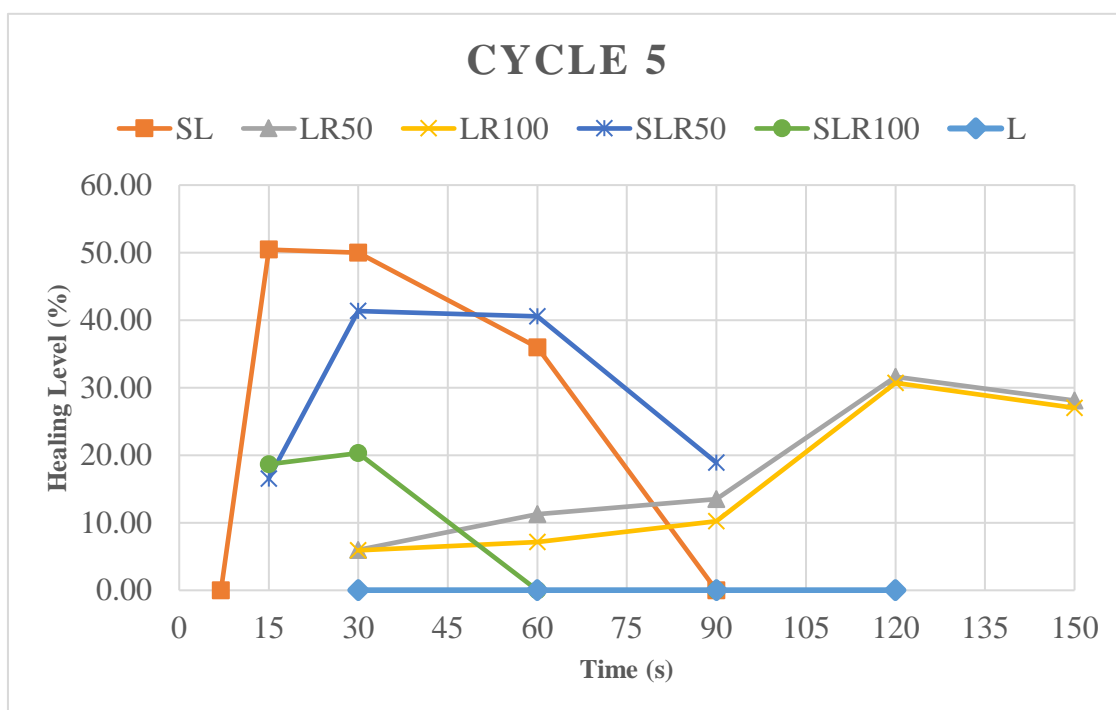
با توجه به نمودار ترمیم در سیکل چهارم که در شکل ۴-۷ دیده می شود، بیشترین مقادیر ترمیم در زمان های پایین به نمونه های SL و SLR50 تعلق یافته است. نمونه هایی هم که در سیکل قبلی به دلیل عدم ترمیم و یا گسیختگی حذف شده بودند، در این سیکل هم اثر حذف شان در نمودار نمایان می باشد و مقادیر ترمیم آن ها صفر قرار داده شده است. همچنین با توجه به شکل ۴-۸ نمونه هایی که در سیکل قبلی حذف شده اند در نمودار دمایی این سیکل نیز قابل مشاهده نیستند. زمان و دمای بهینه کلیه نمونه ها در جدول ۴-۶ مشاهده می شود.

جدول ۴-۶ زمان و دمای بهینه ترمیم برای انواع نمونه ها در سیکل چهارم ترمیم

نام نمونه	بهترین نرخ ترمیم (%)	زمان بهینه ترمیم (s)	دمای بهینه ترمیم (°C)
L	۰	-	-
LR50	۳۴/۱۹	۱۲۰	۷۵
LR100	۳۴/۲۶	۱۲۰	۷۶
SL	۵۳/۹۸	۱۵	۵۲
SLR50	۴۲/۷۶	۳۰	۸۵
SLR100	۲۶/۸۹	۳۰	۸۸

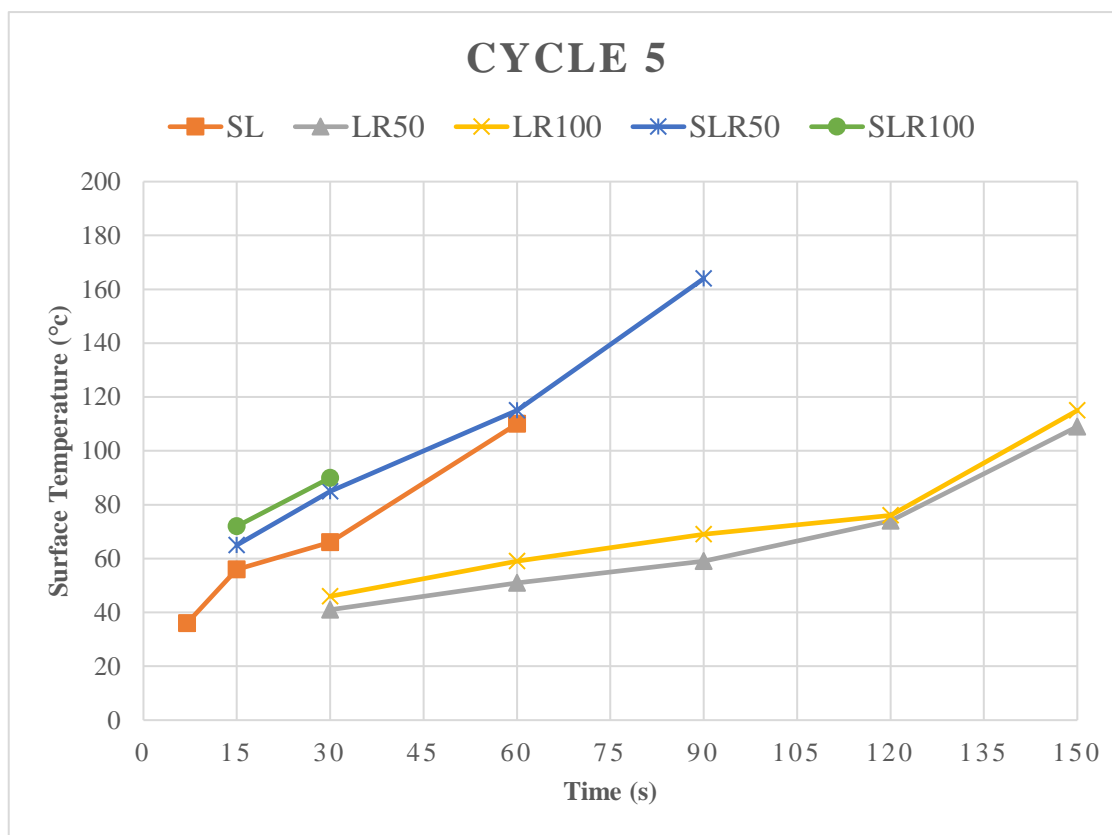
نتایج ترمیم در جدول ۴-۶ از روند مشابه سیکل های قبلی پیروی می نماید.

(۵) سیکل پنجم ترمیم:



شکل ۴-۹ نمودار میزان نرخ ترمیم نمونه ها در زمان های مختلف گرمایش برای سیکل پنجم





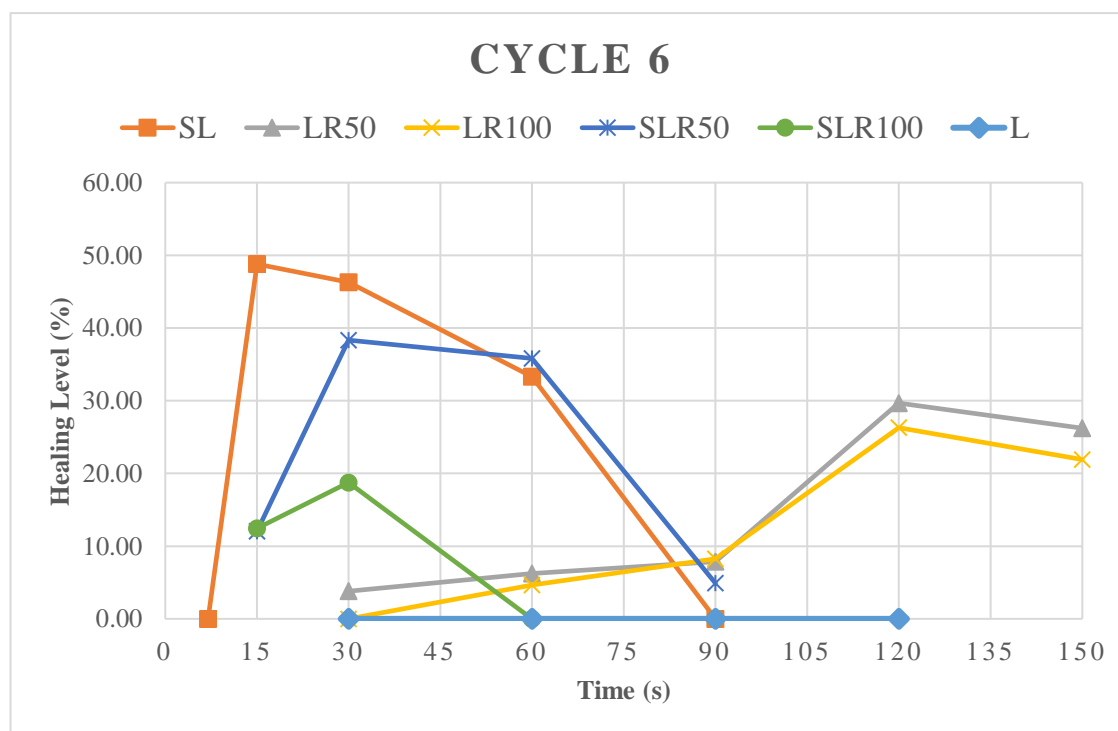
شکل ۴-۱۰ نمودار دمای ترمیم نمونه ها در زمان های مختلف گرمایش برای سیکل پنجم ترمیم

مطلبی که در این سیکل حائز اهمیت می باشد، آن است که نمونه ای از ترکیب SL که مدت زمان گرمایش آن ۷ ثانیه بوده است، به دلیل داشتن دما ترمیم و نرخ ترمیم پایین در سیکل های گذشته، در سیکل کنونی به دلیل پیرشدگی و خستگی قیر دیگر ترمیمی روی آن رخ نداد و این نمونه کلاً کنار گذاشته شد. بنابراین همان گونه که در شکل ۴-۹ نمایان می باشد، مقدار ترمیم این نمونه صفر نظر گرفته شده است. طبق مقادیر دماهای ترمیم که در شکل ۴-۱۰ هم دیده می شود، در زمان های ترمیم ۱۵ و ۳۰ ثانیه نمونه SLR100 بیشترین دما را داشته است. همچنین در زمان های ۶۰ و ۹۰ ثانیه نمونه SLR50 بالاترین مقادیر دما را از آن خود کرده است. جدول ۴-۷ اطلاعات مربوط به زمان و دمای بهینه نمونه ها را نشان می دهد.

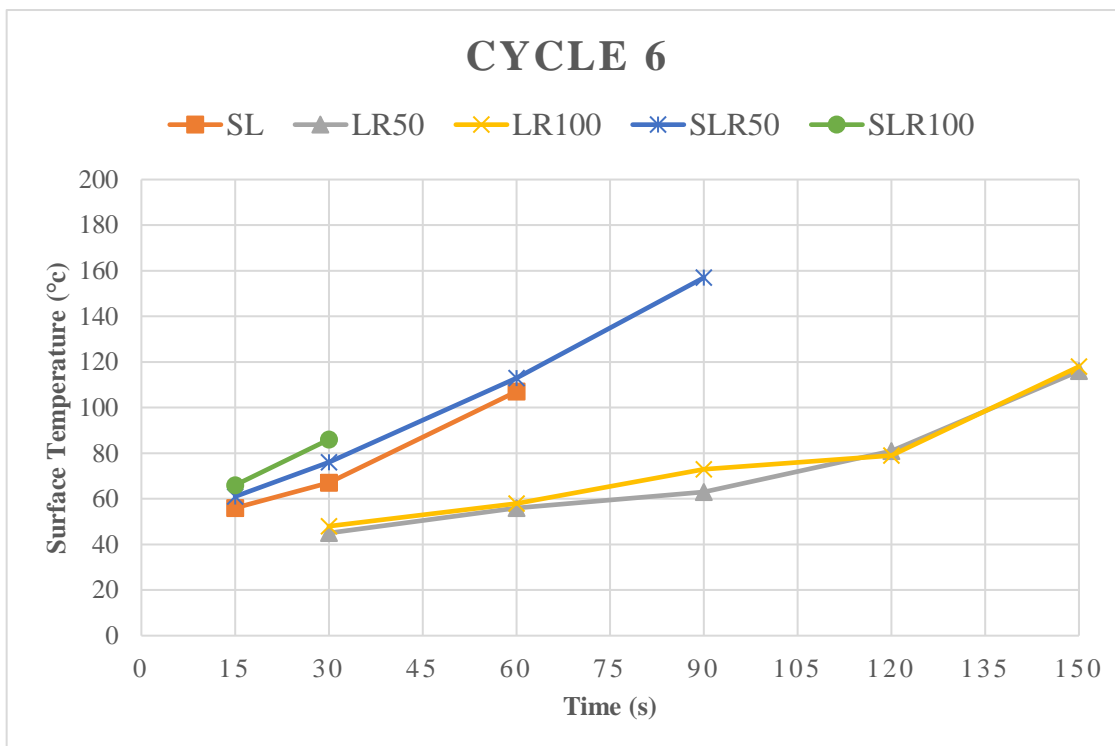
جدول ۴-۷ زمان و دمای بهینه ترمیم برای انواع نمونه ها در سیکل پنجم ترمیم

نام نمونه	بهترین نرخ ترمیم (%)	زمان بهینه ترمیم (s)	دمای بهینه ترمیم (°C)
L	۰	-	-
LR50	۳۱/۶۱	۱۲۰	۷۴
LR100	۳۰/۷۱	۱۲۰	۷۶
SL	۵۰/۴۴	۱۵	۵۶
SLR50	۴۱/۳۵	۳۰	۸۵
SLR100	۲۰/۳۱	۳۰	۹۰

۶) سیکل ششم ترمیم:



شکل ۴-۱۱ نمودار میزان نرخ ترمیم نمونه ها در زمان های مختلف گرمایش برای سیکل ششم



شکل ۴-۱۲ نمودار دمای ترمیم نمونه ها در زمان های مختلف گرمایش برای سیکل ششم ترمیم

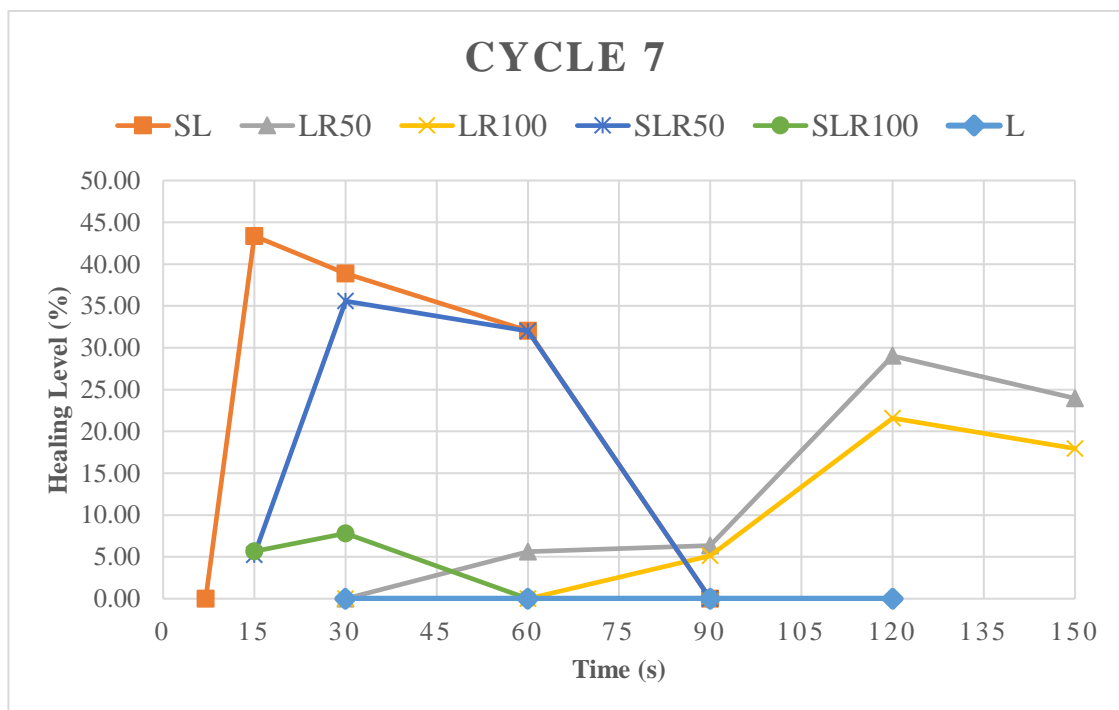
نکته ای که از نمودار نرخ ترمیم شکل ۴-۱۱ برداشت می شود، صفر شدن مقدار ترمیم نمونه LR100 در زمان ۳۰ ثانیه می باشد. این موضوع به این خاطر است که نمونه مذکور به دلیل پیرشدگی و خستگی قیر، دیگر ترمیم نیافته و در این همین سیکل کنار گذاشته شده است. همچنین با توجه به این که نمونه SL در زمان گرمایش ۷ ثانیه ای در سیکل قبلی حذف شده است، در نمودارهای دمایی شکل ۴-۱۲ اثری از آن وجود ندارد. نمونه SLR50 در زمان های ۶۰ و ۹۰ ثانیه، همچنان بالاترین دماهای ترمیم به خود اختصاص داده است. مقادیر دماهای ترمیم نمونه های LR50 و LR100 در زمان های مختلف تقریباً نزدیک به هم بوده و با اختلاف اندکی نمونه های LR100 بالاتر بوده اند. داده های مربوط به زمان و دمای بهینه نمونه های این سیکل در جدول ۴-۸ به طور خلاصه قابل مشاهده است.

جدول ۴-۸ زمان و دمای بهینه ترمیم برای انواع نمونه ها در سیکل ششم ترمیم

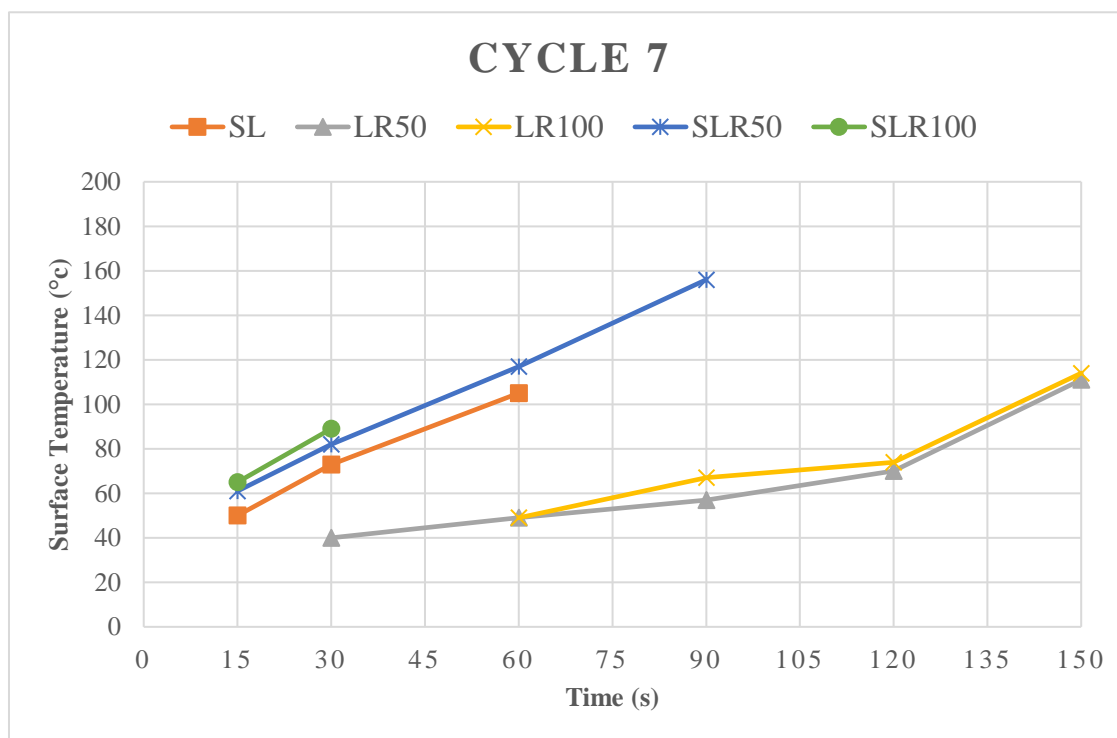
نام نمونه	بهترین نرخ ترمیم (%)	زمان بهینه ترمیم (s)	دمای بهینه ترمیم (°C)
L	۰	-	-
LR50	۲۹/۶۸	۱۲۰	۸۱
LR100	۲۶/۲۹	۱۲۰	۷۹
SL	۴۸/۷۹	۱۵	۵۶
SLR50	۳۸/۳۴	۳۰	۷۶
SLR100	۱۸/۷۵	۳۰	۸۶

نتایج جدول بالا از روند سیکل های قبلی پیروی می نماید.

(۷) سیکل هفتم ترمیم:



شکل ۴-۱۳ نمودار میزان نرخ ترمیم نمونه ها در زمان های مختلف گرمایش برای سیکل هفتم



شکل ۴-۱۴ نمودار دمای ترمیم نمونه ها در زمان های مختلف گرمایش برای سیکل هفتم ترمیم

در این سیکل نمونه های LR50 با زمان گرمایش ۳۰ ثانیه و LR100 با زمان گرمایش ۶۰ ثانیه به دلیل تعدد در سیکل های ترمیم و خستگی نمونه، توانایی ترمیم خود را از دست داده و در سیکل کنونی هیچ گونه ترمیمی روی آن ها رخ نداده است. همچنین نمونه SLR50 با زمان ماکروویو ۹۰ ثانیه به دلیل تحمل گرمای بیش از اندازه ناشی از فرآیند گرمادهی در سیکل های قبلی و سیکل کنونی و نیز پیرشدگی بیش از حد قیر نمونه، دیگر ترمیمی در آن صورت نگرفت. به همین خاطر مقادیر نرخ ترمیم برای این نمونه ها در سیکل حاضر صفر قلمداد شده است که در نمودار شکل ۴-۱۳ مشاهده می گردد. با عنایت به شکل ۴-۱۴ پی برده می شود که روند نمودار دمای ترمیم نمونه های حاوی سرباره فولادی و گل قرمز حتی در آخرین سیکل هم به صورت صعودی است. که این موضوع نشان می دهد این دو افزودنی عملکرد دمایی خوبی در اثر جذب امواج ماکروویو داشته و با افزایش زمان ترمیم، دمای ترمیم نیز افزایش یافته است. زمان و دمای بهینه ترمیم برای نمونه های آخرین سیکل نیز در جدول ۴-۹

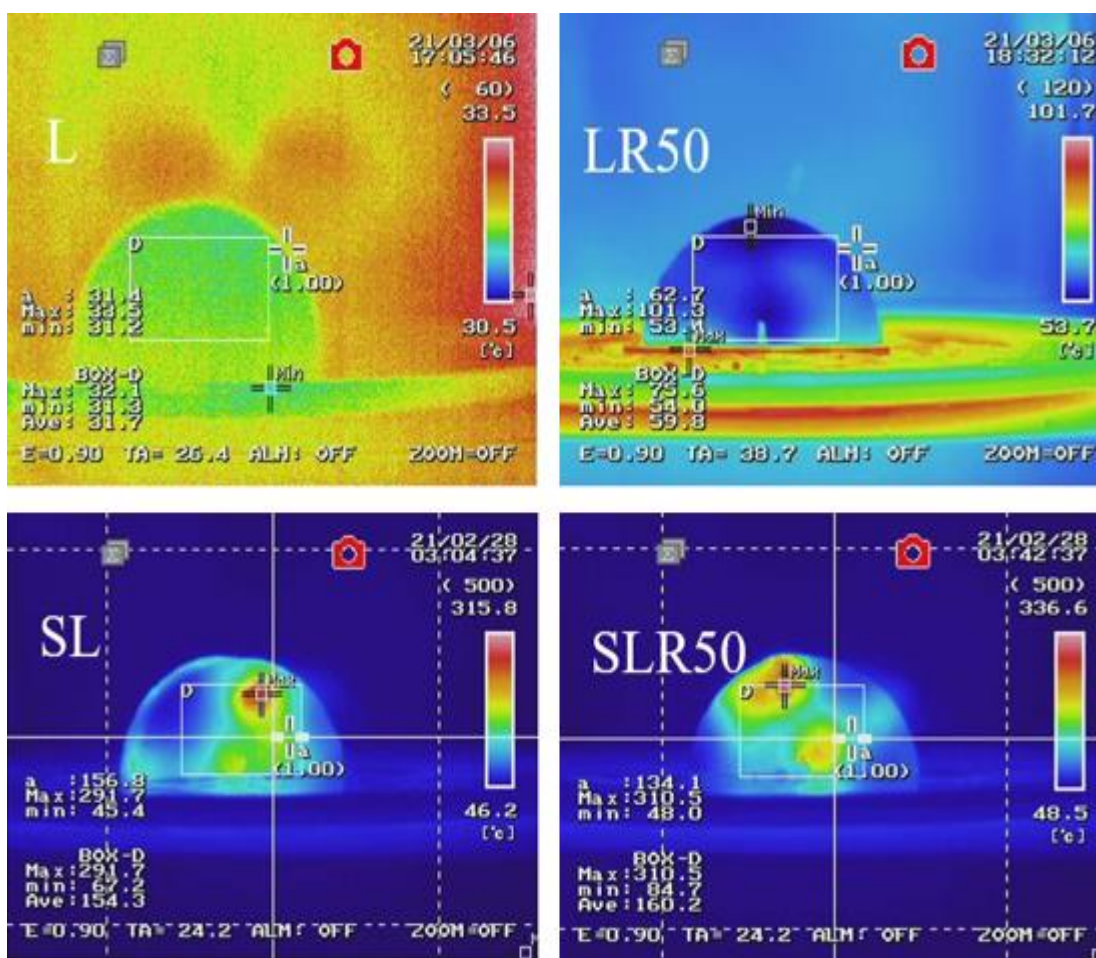
شرح داده شده است.

جدول ۴-۹ زمان و دمای بهینه ترمیم برای انواع نمونه ها در سیکل هفتم ترمیم

نام نمونه	بهترین نرخ ترمیم (%)	زمان بهینه ترمیم (s)	دمای بهینه ترمیم (°C)
L	۰	-	-
LR50	۲۹/۰۳	۱۲۰	۷۰
LR100	۲۱/۵۹	۱۲۰	۷۴
SL	۴۳/۳۶	۱۵	۵۰
SLR50	۳۵/۵۸	۳۰	۸۲
SLR100	۷/۸۱	۳۰	۸۹

روند کلی زمان و دمای بهینه ترمیم در آخرین سیکل نیز مشابه سیکل های قبلی است.

شایان ذکر است که در کلیه سیکل های ترمیم، با بررسی تصاویر مادون قرمز گرفته شده توسط دوربین حرارتی، میزان گرمایش هر نمونه در اثر جذب امواج ماکروویو در هر یک از زمان های ترمیم مورد ارزیابی قرار گرفته است. شکل ۴-۱۵ نمونه ای از این تصاویر را در سیکل اول ترمیم نشان می دهد. با توجه به این تصاویر که همگی در زمان ۹۰ ثانیه ای گرفته شده اند ملاحظه می گردد که نمونه شاهد که فقط حاوی مصالح آهکی بوده است، چندان گرم نشده است. در نمونه LR50 که حاوی ۵۰ درصد فیلر گل قرمز بوده است، توزیع دمای حدوداً یکنواخت نمونه حاکی از پخش شدگی یکنواخت این افزودنی در مخلوط می باشد. در حالی که تصویر گرفته شده از نمونه SL توزیع غیر یکنواختی از دما را نشان می دهد به گونه ای که در محدوده قرمز رنگ به دلیل حضور سرباره در آن نواحی، دما به شدت افزایش یافته است. اما در تصویر نمونه SLR50 توزیع دمای یکنواخت تری در مقایسه با نمونه SL مشاهده می شود که این امر بیان کننده نقش مهم گل قرمز می باشد.



شکل ۴-۱۵ تصاویر مادون قرمز تعدادی از نمونه ها در اولین سیکل با زمان ترمیم ۹۰ ثانیه

پدیده دیگری که در برخی از سیکل های ترمیم به وقوع پیوست، گسیختگی ناشی از گرمایش بیش از حد بوده است. در اکثر نمونه های آسفالتی حاوی سرباره در زمان های ترمیم بالا، افزایش بیش اندازه دما در اثر گرمایش باعث سوختگی قیر و از دست رفتن خواص عملکردی آن و در نهایت موجب متلاشی شدن نمونه ها گردیده است. بسیاری از پژوهش های انجام گرفته در حوزه گرمایش مخلوط های آسفالتی به کمک امواج ماکروویو این پدیده را تأیید کرده اند. شکل ۴-۱۶ به این موضوع اشاره دارد.



شکل ۴-۱۶ تصاویری از نمونه های تغییر فرم یافته و گسیخته شده در اثر گرمایش بیش از اندازه

#### ۴-۲-۱-۲ نتایج آزمایش ترمیم :

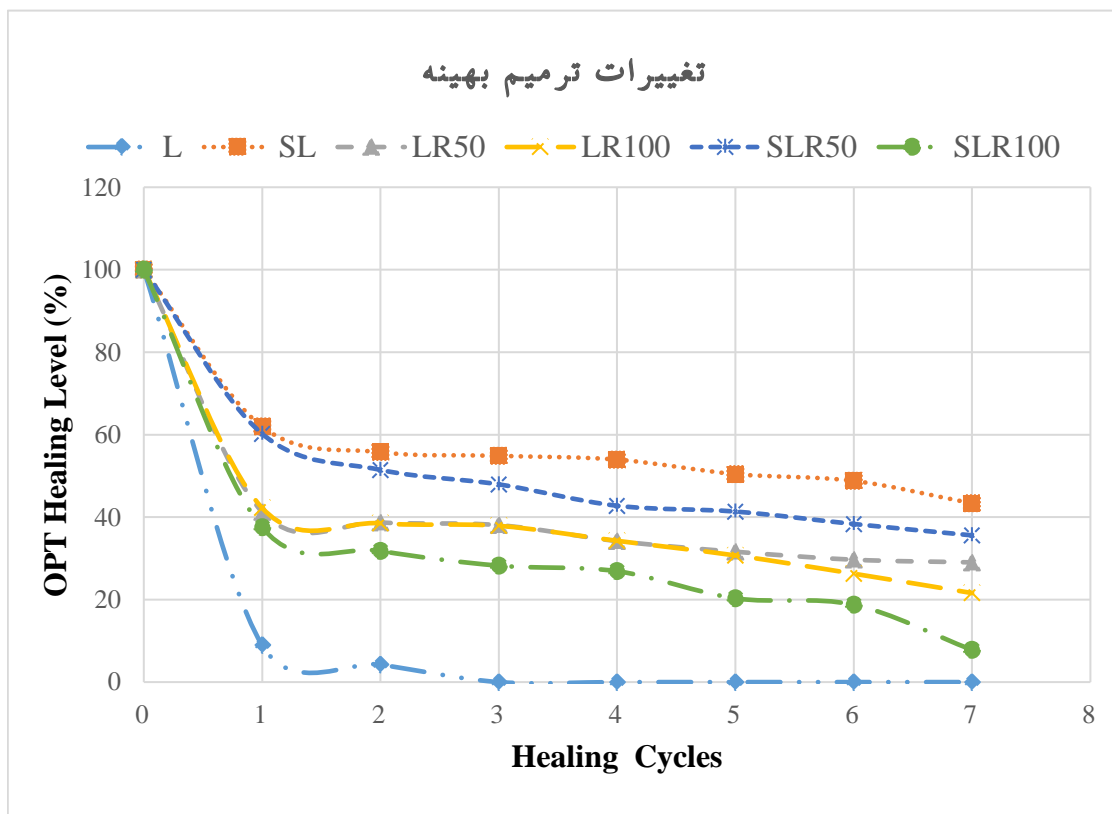
(۱) نمونه های شاهد به دلیل آن که تنها با مصالح طبیعی ساخته شده اند و سنگدانه های آهکی و قیر به تنهایی قابلیت گرم شدن در ماکروویو را را نداشتند به همین دلیل میزان ترمیم بهینه این نمونه ها در ۲ سیکل نخست با مقادیر ۸/۹۴ و ۴/۲۶ درصد بسیار اندک بوده و از سیکل سوم به بعد ترمیمی روی آن ها رخ نداده است. این جاست که تأثیر نوع مصالح و افزودنی ها بر روی فرآیند گرمایش و خودترمیمی به خوبی ملموس می باشد.

(۲) استفاده از گل قرمز تنها به عنوان یک ماده جاذب ماکروویو؛ عملکرد خوبی در خودترمیمی نمونه های آسفالتی داشته به گونه ای که در دو مقدار ۵۰ و ۱۰۰ درصد، میانگین مقادیر ترمیم بهینه در ۷ سیکل ترمیم را نسبت به نمونه شاهد به ترتیب ۳۲/۷۶ و ۳۱/۱۸ درصد افزایش داده است. از طرفی با توجه به این دو مقدار و همچنین مقایسه نتایج بهینه ترمیم در سیکل های مختلف برای دو نوع نمونه LR50 و LR100، می توان بیان کرد که چون میزان ترمیم آن ها تفاوت چندانی باهم نمی کند و حتی در برخی سیکل ها ترمیم نمونه LR50 تا حدودی هم بهتر بوده است، بنابراین استفاده از گل قرمز به مقدار ۵۰ درصد در این زمینه بهینه می باشد.



۳) نمونه SL با نرخ بهینه ترمیم ۵۲/۷۳ درصد، بهترین مقدار ترمیم را در بین نمونه‌ها به خود اختصاص داده است. بعد از آن دو نمونه SLR50 و LR50 به ترتیب با مقادیر ۴۵/۳۸ و ۳۴/۶۵ درصد بالاترین نرخ خودترمیمی را داشته‌اند. درحقیقت در پژوهش حاضر این سه ترکیب بهترین عملکرد خودترمیمی را از خود نشان داده‌اند.

۴) با افزایش تعداد سیکل‌های ترمیم، میزان نرخ ترمیم تمامی نمونه‌ها کاهش یافته که این پدیده در نمودارهای نتایج بهینه شکل ۴-۱۷ به وضوح پدیدار است. که با نتایج بدست آمده توسط تحقیقات دیگر مطابقت دارد.



شکل ۴-۱۷ نمودار تغییرات نرخ ترمیم بهینه در سیکل‌های مختلف برای تمامی نمونه‌ها

### ۳-۲-۴ نتایج حساسیت رطوبتی

در پژوهش حاضر نیز پس از بررسی قابلیت خودترمیمی مخلوط‌های آسفالتی گوناگون و معرفی

نمونه هایی که بهترین نرخ ترمیم را داشته اند، لازم بود که مقاومت آن ها در برابر رطوبت نیز بررسی گردد. به همین خاطر آزمایش کشش غیر مستقیم با شرایط استاندارد AASHTO T283 بر روی نمونه های مذکور انجام گرفته و شرح نتایج در جدول ۴-۱۰ مشهود است.

جدول ۴-۱۰ نتایج حساسیت رطوبتی تمامی نمونه ها

نام نمونه	مربوط: $S_t$ مقاومت کششی غیر مستقیم در حالت مرطوب (کیلوپاسکال)	خشکی: $S_t$ مقاومت کششی غیر مستقیم در حالت خشک (کیلوپاسکال)	$TSR = \frac{S_{\text{مربوط}}}{S_{\text{خشک}}}$ (درصد)
L	۹۸۴	۱۱۵۵	۸۵
LP50	۹۱۲	۱۰۴۶	۸۷
LP100	۹۷۱	۱۰۶۶	۹۱
LR50	۷۶۳	۱۱۸۷	۶۴
LR50P50	۷۵۱	۹۹۰	۷۶
LR100	۶۲۳	۱۱۳۰	۵۵
<sup>1</sup> LR100+	۸۶۶	۱۱۳۷	۷۶
SL	۶۶۲	۹۶۵	۶۹
SLP50	۷۴۷	۹۵۶	۷۸
SLP100	۷۶۶	۹۳۳	۸۲
SLR50	۶۴۸	۱۰۶۸	۶۱
SLR50P50	۷۵۹	۱۰۸۴	۷۰
SLR50+	۸۶۸	۱۰۸۹	۸۰
SLR100	۵۳۶	۱۰۶۶	۵۰
SLR100+	۷۸۶	۱۰۸۹	۷۲

از آن جایی که حداقل مقدار قابل قبول برای شاخص حساسیت رطوبتی (TSR)، ۷۵ درصد است و هر چه مقدار این شاخص بیشتر باشد حاکی از مقاومت بالای نمونه در برابر رطوبت می باشد، با عنایت به جدول ۴-۱۰ که نتایج بررسی حساسیت رطوبتی کلیه ترکیبات را نشان می دهد؛ به راحتی می توان عملکرد خوب ماده گل کربناته را نسبت به رطوبت درک کرد. زیرا در اکثر نمونه های حاوی گل کربناته در هر دو مقدار ۵۰ و ۱۰۰ درصد، مقدار TSR بالای ۷۵ درصد است. حتی این ماده افزودنی شاخص

<sup>۱</sup> علامت "+" در این پایان نامه مربوط به نمونه هایی است که حاوی زایکوترم هستند.

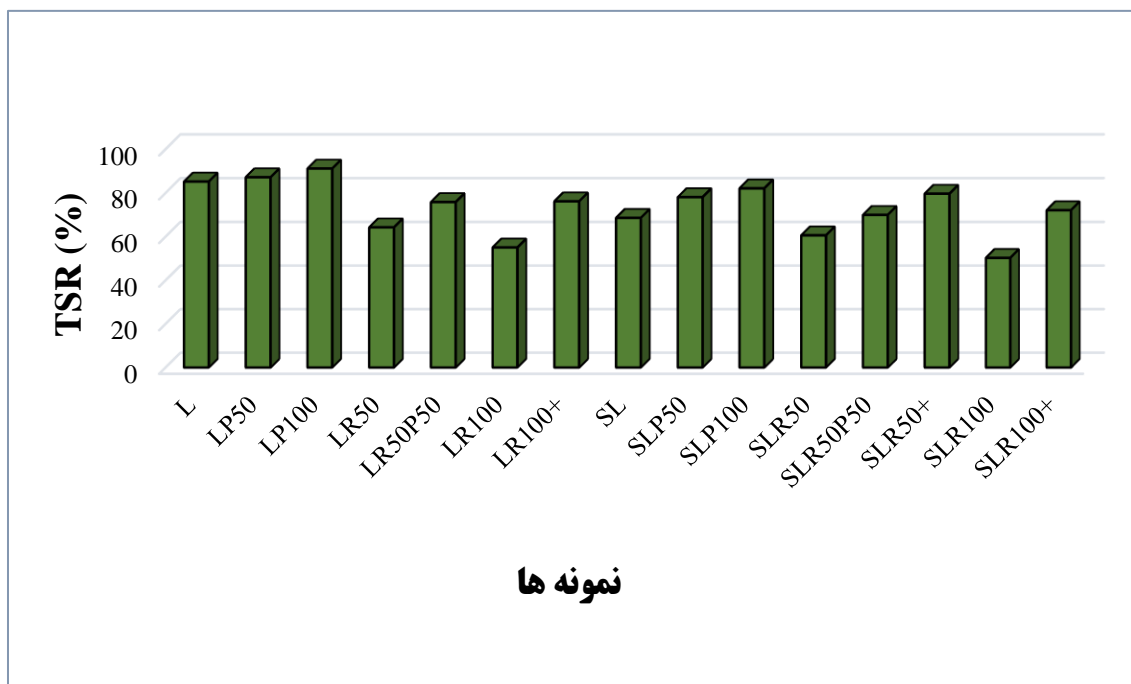
TSR را برای نمونه های LP50 و LP100 نسبت به نمونه شاهد (L) به ترتیب ۲ و ۶ درصد افزایش داده است. از آن طرف هر چند که سرباره فولادی و گل قرمز، در حوزه ترمیم مخلوط های آسفالتی در پژوهش حاضر عملکرد رضایت بخشی را از خود نشان داده اند، اما طبق نتایج جدول ۴-۱۰ در مقاومت نسبت به خرابی رطوبتی به طور قابل قبولی ظاهر نشده اند. به گونه ای که میزان شاخص TSR در نمونه حاوی سرباره فولادی (SL) و نمونه محتوی ۵۰ درصد گل قرمز (LR50) نسبت به نمونه شاهد به ترتیب ۱۶ و ۲۱ درصد کاهش داشته است. به همین خاطر افزودن گل کربناته خوش بختانه این ضعف را برطرف نموده است. همانطور که در جدول ۴-۱۰ مشاهده می شود در نمونه های SLP50 و SLP100 که به ترتیب حاوی ۵۰ و ۱۰۰ درصد گل کربناته هستند میزان شاخص TSR نسبت به نمونه SL به ترتیب ۹ و ۱۳ درصد افزایش یافته است. همچنین با افزودن ۵۰ درصد گل کربناته به نمونه LR50، میزان مقاومت رطوبتی ۱۲ درصد افزایش پیدا کرده است. بنابراین در کلیه نمونه های بیان شده میزان شاخص TSR به بالای ۷۵ درصد ارتقا یافته و ضعف مقاومت رطوبتی آن ها برطرف شده است. فقط موضوع مهمی که باید به آن اشاره شود، این است که برای نمونه های LR100 و SLR100 با شاخص TSR به ترتیب ۵۵ و ۵۰ درصد؛ تمامی بخش فیلر توسط گل قرمز تأمین شده و دیگر جایی برای افزودن فیلر گل کربناته نمانده است. به همین خاطر برطرف نمودن ضعف مقاومتی در برابر خرابی رطوبتی به عنوان یک مسأله در روند پژوهش مطرح گردید. همچنین مقاومت رطوبتی نمونه SLR50 در مقایسه با نمونه شاهد؛ ۲۴ درصد کاهش یافته است که با افزودن ۵۰ درصد گل کربناته، با وجود آن که شاخص TSR با افزایش ۹ درصدی همراه بوده است اما همچنان این شاخص کمتر از ۷۵ درصد بوده و مسأله حساسیت رطوبتی آن مرتفع نگردیده است. دلیل این امر نیز این است که سرباره فولادی و گل قرمز که ۲ عامل فزاینده خرابی رطوبتی هستند، در این نمونه هر دو حضور داشته و میزان گل کربناته نمی توانست بیشتر از ۵۰ درصد باشد.

برای رفع این مشکلات ماده پلیمری ضد عریان شدگی زایکوترم<sup>۱</sup> تهیه شد. در کاتالوگ شرکت ارائه دهنده این محصول قید شده که این پلیمر دوستدار محیط زیست می‌باشد. همچنین این کاتالوگ میزان مصرف زایکوترم را بر اساس نوع مصالح سنگی و مشخصات آن بیان کرده که با توجه به آن مقدار ۰/۰۵ درصد وزنی قیر در این تحقیق انتخاب گردیده است. به منظور اختلاط همگن زایکوترم در قیر، دستگاه همزن سرعت بالا<sup>۲</sup> با نرخ دوران ۳۰۰۰ دور بر دقیقه که در پژوهش حاضر طراحی و ساخته شد، مورد استفاده قرار گرفته است (شکل ۴-۱۹). پس از حصول نتایج که در شکل ۴-۱۸ هم مشاهده می‌شود، مشخص شد که این ماده پلیمری توانسته مقاومت رطوبتی ۲ نمونه LR100 و SLR50 را افزایش دهد. به طوری که مقدار شاخص TSR برای این نمونه‌ها علاوه بر اینکه بالای ۷۵ درصد می‌باشد؛ نسبت به نمونه‌های مشابه بدون زایکوترم به ترتیب ۲۱ و ۱۹ درصد، افزایش پیدا کرده است. اما استفاده از این مقدار زایکوترم فقط نتوانست TSR نمونه SLR100 را به بالای ۷۵ درصد برساند که البته این نمونه در ترمیم هم جالب نبوده است. بدین ترتیب تمامی ترکیبات به ویژه نمونه‌هایی که در خودترمیمی بهترین عملکرد را داشته‌اند به کمک گل کربناته و پلیمر ضد عریان شدگی زایکوترم؛ از منظر مقاومت رطوبتی قابل قبول بوده‌اند.

---

<sup>۱</sup> Zycotherm

<sup>۲</sup> High Shear



شکل ۴-۱۸ مقایسه نسبت مقاومت کششی غیر مستقیم نمونه ها (TSR)



شکل ۴-۱۹ همزن سرعت بالا ساخته شده در پژوهش

#### ۴-۲-۴ نتایج ضریب مارشال (شاخص مارشال)

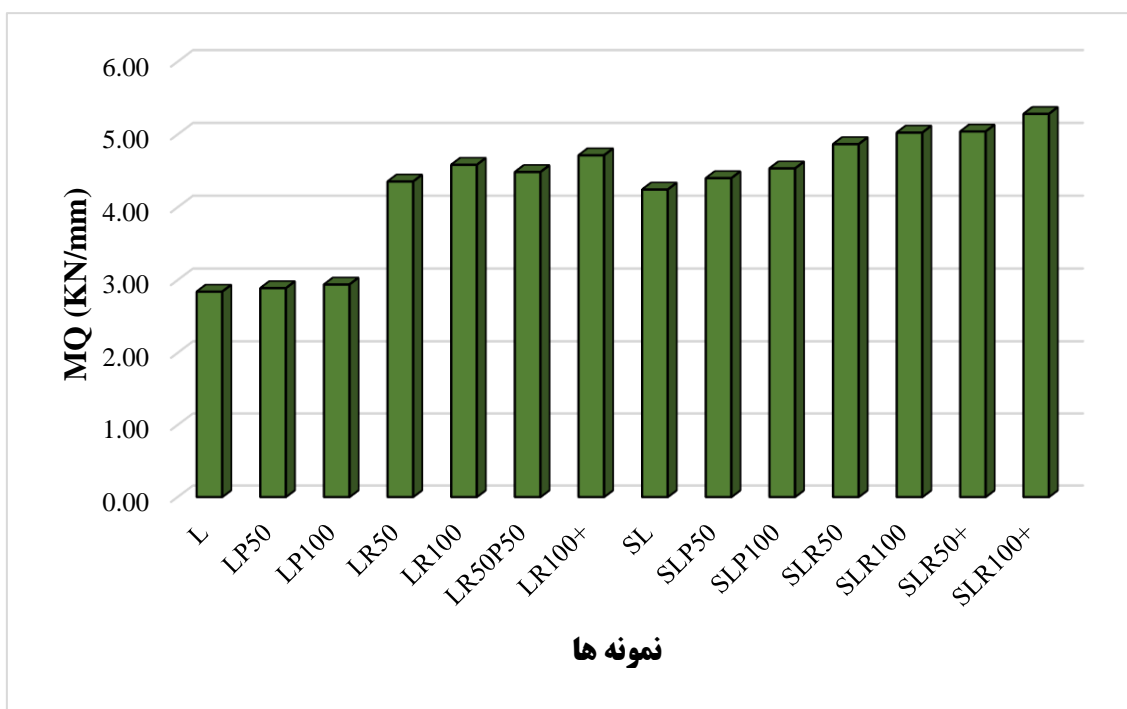
به منظور بررسی میزان مقاومت مخلوط های آسفالتی در برابر تغییر شکل های دائمی از جمله شیارشدگی، آزمایش مارشال با استاندارد ASTM D1559 بر روی نمونه های استوانه ای در این پژوهش انجام گرفت. پارامتر های خروجی این آزمایش برای هر نمونه، استقامت مارشال (کیلونیوتن) و روانی مارشال (میلیمتر) هستند که از نسبت استقامت به روانی ضریب مارشال یا شاخص مارشال به دست می آید که معیاری برای سنجش سختی نمونه ها است. نتایج به دست آمده از این آزمایش در جدول ۴-۱۱ مشاهده می شود.

جدول ۴-۱۱ نتایج ضریب مارشال

نام نمونه	استقامت (کیلونیوتن)	روانی (میلیمتر)	ضریب MQ
L	۱۱/۹۶	۴/۲۱	۲/۸۴
LP50	۱۳/۲۹	۴/۶۰	۲/۸۹
LP100	۱۳/۶۱	۴/۶۳	۲/۹۴
LR50	۱۵/۹۸	۳/۶۷	۴/۳۵
LR100	۱۶/۳۲	۳/۵۶	۴/۵۸
LR50P50	۱۶/۹۵	۳/۷۸	۴/۴۸
LR100+	۱۷/۹۶	۳/۸۱	۴/۷۱
SL	۱۴/۹۴	۳/۵۲	۴/۲۴
SLP50	۱۵/۱۸	۳/۴۵	۴/۴۰
SLP100	۱۵/۳۷	۳/۳۹	۴/۵۳
SLR50	۱۶/۸۹	۳/۴۷	۴/۸۷
SLR100	۱۷/۶۴	۳/۵۱	۵/۰۳
SLR50+	۱۸/۲۵	۳/۶۲	۵/۰۴
SLR100+	۲۰/۷۶	۳/۹۳	۵/۲۸

با توجه به نتایج جدول ۴-۱۱ می‌توان دریافت که تمامی نمونه‌ها نسبت به نمونه شاهد از مقدار MQ بالاتری برخوردار هستند. در برخی از پژوهش‌های صورت گرفته پیرامون ضریب MQ اشاره شده است که هر چه مقدار این پارامتر بالاتر باشد، مخلوط آسفالتی در برابر تنش‌های برشی و تغییر شکل‌های ماندگار مقاوم‌تر است. بنابراین مواد مورد استفاده در این تحقیق نه تنها لطمه‌ای به سختی نمونه آسفالتی ساخته شده با مصالح آهکی وارد نکرده بلکه عامل افزایش سختی بوده‌اند. طبق شکل ۴-۲۰ مقدار MQ در نمونه SL که حاوی سرباره فولادی درشت دانه با سایز ذرات مانده روی الک شماره ۴ است، نسبت به نمونه شاهد (L) به میزان ۱/۴ کیلو نیوتن بر میلیمتر افزایش یافته است. دلیل این افزایش نیز به تیزگوشه بودن سنگدانه‌های سرباره مربوط می‌شود که قفل و بست محکمی را در خود ایجاد کرده و سختی مخلوط را بالا می‌برند. نمونه‌های LR50 و LR100 که به ترتیب شامل ۵۰ و ۱۰۰ درصد گل قرمز بودند در مقایسه با نمونه شاهد، مقدار این ضریب را ۱/۵۱ و ۱/۷۴ کیلو نیوتن بر میلیمتر افزایش داده‌اند. افزایش ویسکوزیته و نقطه نرمی قیر به دلیل افزودن گل قرمز، می‌تواند دلیل بالا رفتن

استقامت و در نهایت ضریب مارشال باشد. با توجه به همین دلایل، مقدار MQ در نمونه های LP50 و LP100 که به ترتیب حاوی ۵۰ و ۱۰۰ درصد فیلر گل کربناته بودند؛ به میزان ۰/۵ و ۰/۱ کیلو نیوتن بر میلیمتر نسبت به نمونه شاهد افزایش پیدا کرده است. در سایر نمونه ها هم که ترکیب این مصالح با یکدیگر می باشد، شاخص مارشال همچنان رو افزایش بوده است. با نگاهی به جدول ۴-۱۱ می توان پی برد که مقادیر استقامت بر حسب نوع ماده مصرفی به طور پیوسته در حال افزایش بوده اما در مورد مقادیر روانی نمی توان اظهار نظر قطعی کرد.



شکل ۴-۲۰ مقایسه ضریب مارشال نمونه ها



## ۳-۴ خلاصه نتایج

نتایج آزمایشات در این بخش را می‌توان در قالب جدول ۴-۱۲ خلاصه کرد.

جدول ۴-۱۲ خلاصه نتایج تمامی آزمایشات

نوع مصالح	نتایج آزمایشات			
	درصد قیر بهینه	خودترمیمی	حساسیت رطوبتی	ضریب مارشال
سرباره فولادی	افزایش می‌دهد (-)	افزایش می‌دهد (+)	افزایش می‌دهد (-)	افزایش می‌دهد (+)
گل قرمز	تغییر نمی‌کند	افزایش می‌دهد (+)	افزایش می‌دهد (-)	افزایش می‌دهد (+)
گل کربناته	تغییر نمی‌کند	تغییر نمی‌کند	کاهش می‌دهد (+)	افزایش می‌دهد (+)



## فصل پنجم:

### جمع بندی نتایج و پیشنهادات

## ۵-۱ جمع بندی نتایج

باتوجه به اینکه هدف اصلی این پژوهش بررسی و ارزیابی قابلیت ترمیم مخلوط‌های آسفالتی سبز است، چه بهتر که مصالح بازیافتی مصرفی جایگزین در جهت ارتقای این ویژگی باشند. به همین خاطر از سرباره فولادی با نسبت حجمی ۶۰ درصد به صورت سنگدانه‌های درشت دانه مانده روی الک شماره ۴، گل قرمز پسماند کارخانه آلومینا با نسبت های ۵۰ و ۱۰۰ درصد به صورت فیلر و گل کربناته پسماند کارخانه چغندر قند با نسبت‌های ۵۰ و ۱۰۰ درصد به عنوان فیلر در این تحقیق استفاده شده است. برای تعیین درصد قیر بهینه و تعیین ضریب مارشال، از آزمایش مقاومت مارشال استفاده گردید. برای ارزیابی خودترمیمی، آزمایش خمش سه نقطه‌ای بر روی نمونه‌های آسفالتی نیمه استوانه‌ای انجام گرفت. در نهایت هم به دلیل اهمیت جایگاه خرابی رطوبتی، نمونه‌های استوانه‌ای تحت آزمایش حساسیت رطوبتی قرار گرفتند. جمع بندی نتایج تمامی آزمایشات به شرح زیر است:

◀ نتایج آزمایش مارشال نشان داد که سرباره فولادی، درصد قیر بهینه را  $0/3$  درصد افزایش داده است. دلیل این افزایش نیز وجود تخلخل زیاد در سنگدانه‌های این مصالح است.

◀ نتایج آزمایش خودترمیمی نشان داد که؛ مقدار ترمیم بهینه نمونه آسفالتی حاوی سرباره فولادی (SL) در مقایسه با نمونه شاهد (L) به میزان  $50/84$  درصد در تمامی سیکل‌های ترمیم افزایش پیدا کرده است و بهترین زمان ترمیم ۱۵ ثانیه بوده است. همچنین مشخص گردید که استفاده از گل قرمز با نسبت‌های ۵۰ و ۱۰۰ درصد؛ مقدار بهینه ترمیم را درمقایسه با نمونه کنترلی در ۷ سیکل ترمیم به ترتیب،  $32/76$  و  $31/18$  درصد افزایش داده است. باتوجه به این نتیجه پی برده شد که استفاده‌ی ۵۰ از گل قرمز، مقدار بهینه بوده است. به طور کلی ۳ ترکیب SL، SLR50 و LR50 به ترتیب با مقادیر بهینه خودترمیمی  $52/73$ ،  $45/38$  و  $34/65$  درصد در تمامی سیکل‌های ترمیم؛ بهترین عملکرد را در حوزه ترمیم داشته‌اند. همانطور که مشاهده

می‌گردد نرخ ترمیم نمونه حاصل شده از ترکیب ۵۰ درصد گل قرمز و سرباره فولادی (SLR50)

از میزان ترمیم سرباره کمتر و از مقدار ترمیم گل قرمز تنها بیشتر بوده است.

سرباره و گل قرمز به دلیل دارا بودن درصد بالایی از ترکیبات فلزی مقاومت قابل قبولی نسبت به رطوبت نداشتند. به گونه‌ای که در مخلوط سرباره‌ای مقدار شاخص TSR به میزان ۱۶ درصد و در مخلوط‌های دارای ۵۰ و ۱۰۰ درصد گل قرمز، این شاخص به ترتیب ۲۱ و ۳۰ درصد نسبت به نمونه شاهد کاهش یافته است. این ضعف به کمک گل کربناته در اکثریت نمونه‌ها جبران شد. افزودن ۵۰ و ۱۰۰ درصد گل کربناته به مخلوط سرباره‌ای میزان شاخص TSR را به ترتیب ۹ و ۱۳ درصد نسبت به مخلوط سرباره‌ای تنها افزایش داده است. همچنین در مخلوط حاوی ۵۰ درصد گل قرمز که در ترمیم عملکرد خوبی داشته است با افزودن ۵۰ درصد گل کربناته، مقاومت رطوبتی ۱۲ درصد افزایش یافته و میزان شاخص TSR آن به بالای ۷۵ درصد ارتقا یافته است. علاوه بر این با اضافه نمودن ۵۰ و ۱۰۰ درصد گل کربناته تنها به نمونه شاهد میزان شاخص TSR به ترتیب ۲ و ۶ درصد نسبت به نمونه شاهد افزایش پیدا کرده است. فقط در ۳ ترکیب از نمونه‌ها که امکان استفاده از گل کربناته نبود از ماده ضدعریان شدگی زایکوترم استفاده گردید.

نتایج ضریب مارشال که از استقامت و روانی آزمایش مارشال به دست آمد، نشان داد که سرباره و گل قرمز با نسبت های ۵۰ و ۱۰۰ درصد پارامتر ضریب مارشال را به ترتیب ۱/۴، ۱/۵۱ و ۱/۷۴ کیلو نیوتن بر میلیمتر نسبت به نمونه کنترلی (L) افزایش داده اند. همچنین گل کربناته با مقادیر ۵۰ و ۱۰۰ درصد مقدار ضریب MQ را در مقایسه با نمونه شاهد (L) به ترتیب ۰/۰۵ و ۰/۱ کیلو نیوتن بر میلیمتر افزایش داده است. بنابراین می‌توان گفت کلیه مصالح پسماندی و ضایعاتی مورد استفاده در این تحقیق موجب افزایش سختی مخلوط‌های آسفالتی نسبت به مخلوط کنترلی شده اند.

## ۵-۲ پیشنهادات

در این پایان نامه با توجه به توانایی و امکانات موجود آزمایش هایی برای بررسی ویژگی هایی از مخلوط آسفالتی انجام گرفت. برای پژوهش ها و کارهای تحقیقاتی آینده با رویکرد آزمایشگاهی، پیشنهاداتی را می توان مطرح کرد که در ادامه به آن ها اشاره شده است.

(۱) در این پژوهش از سرباره در یک سایز به صورت درشت دانه استفاده شده است؛ که پیشنهاد می شود برای بررسی قابلیت خودترمیمی، از این ماده به صورت ریزدانه و در سایز های مختلف استفاده گردیده و نتایج بررسی شود.

(۲) سرباره فولادی استفاده شده در تحقیق حاضر از نوع کوره قوس الکتریکی (EAF) بوده که می توان تأثیر سرباره فولادی نوع کوره اکسیژنی (BOF) بر ترمیم ارزیابی نمود.

(۳) روش گرمایشی انتخاب شده برای فرآیند خودترمیمی، امواج ماکروویو بوده است. می توان تأثیر گرمایش القایی بر خودترمیمی را نیز بررسی کرد.

(۴) یکی از آزمایشات مهم مخلوط های آسفالتی، آزمایش خستگی است که در این تحقیق انجام نگرفته است. بنابراین پیشنهاد می شود که حداقل این آزمایش بر روی ترکیبات مصالح پژوهش حاضر انجام گرفته و عملکرد این مصالح در حوزه خستگی نیز معلوم گردد تا دید جامع تری نسبت به این مصالح بازیافتی حاصل شود.

(۵) کارهای تحقیقاتی محدودی پیرامون استفاده از گل کربناته در آسفالت انجام گرفته و هنوز هم تأثیر آن بر خصوصیات عملکردی مخلوط های آسفالتی پنهان مانده است. بنابراین توصیه می شود تا با انجام آزمایشات گوناگون، سایر ابعاد این ماده پسماندی آشکار گشته و رویکردهای آن بررسی شود.

منبع

- .1 Mundt, D.J., et al." *A Review of Changes in Composition of Hot Mix Asphalt in the United States*". Journal of Occupational and Environmental Hygiene, 2009. 6(11): p. 714-725.
- .2 Riara, M., et al." *Investigation into crack healing of asphalt mixtures using healing agents*". Construction and Building Materials, 2018. 161: p. 45-52.
- .3 Von Quintus, H.L., et al." *Expected Service Life of Hot-Mix Asphalt Pavements in Long-Term Pavement Performance Program*". Transportation Research Record, 2007. 1990(1): p. 102-110.
- .4 Riara, M., et al." *Evaluation of moisture and temperature effect on crack healing of asphalt mortar and mixtures using healing agents*". Construction and Building Materials, 2018. 177: p. 388-394.
- .5 Karki, P., R. Li, and A. Bhasin." *Quantifying overall damage and healing behaviour of asphalt materials using continuum damage approach*". International Journal of Pavement Engineering, 2015. 16(4): p. 350-362.
- .6 Roque, R., et al., *Development of a test method that will allow evaluation and quantification of the effects of healing on asphalt mixture*. 2012, University of South Florida. College of Engineering.
- .7 Tang, J., et al." *Investigation of the optimal self-healing temperatures and healing time of asphalt binders*". Construction and Building Materials :113 .2016 ,p. 1029-1033.
- .8 Chung, K., et al." *Preparation and characterization of microcapsule-containing self-healing asphalt*". Journal of Industrial and Engineering Chemistry, 2015. 29: p. 330-337.
- .9 Butt, A.A., B. Birgisson, and N. Kringos." *Optimizing the Highway Lifetime by Improving the Self Healing Capacity of Asphalt*". Procedia - Social and Behavioral Sciences, 2012. 48: p. 2190-2200.



- .10 Jones, A.S. and H. Dutta." *Fatigue life modeling of self-healing polymer systems*". Mechanics of Materials, 2011 : (4)42 .0p. 481-490.
- .11 Menozzi, A., et al." *Induction healing of fatigue damage in asphalt test samples*". Construction and Building Materials, 2015. **74**: p. 162-168.
- .12 García, A., et al." *Single and multiple healing of porous and dense asphalt concrete* ." Journal of Intelligent Material Systems and Structures, 2014. **26**(4): p. 425-433.
- .13 Ayar, P., F. Moreno-Navarro, and M.C. Rubio-Gámez." *The healing capability of asphalt pavements: a state of the art review*". Journal of Cleaner Production, 2016. **113**: p.28-40 .
- .14 Huang, Y., R.N. Bird, and O. Heidrich." *A review of the use of recycled solid waste materials in asphalt pavements*". Resources, Conservation and Recycling, 2007. **52**(1): p. 58-73.
- .15 Chen, Z., et al." *Utilization of gneiss coarse aggregate and steel slag fine aggregate in asphalt mixture*". Construction and Building Materials, 2015. **93**: p. 911-918.
- .16 Shen, D.-H., C.-M. Wu, and J.-C. Du." *Laboratory investigation of basic oxygen furnace slag for substitution of aggregate in porous asphalt mixture* ." Construction and Building Materials, 2009. **23**(1): p. 453-461.
- .17 Kumar, H. and S. Varma." *A review on utilization of steel slag in hot mix asphalt*". International Journal of Pavement Research and Technology, 2021. **14**(2): p. 232-242.
- .18 Wen, H., S. Wu ,and S. Bhusal." *Performance Evaluation of Asphalt Mixes Containing Steel Slag Aggregate as a Measure to Resist Studded Tire Wear*". Journal of Materials in Civil Engineering, 2016. **28**(5): p. 04015191.

- .19 Zhang, J., et al." *Environmental aspects and pavement properties of red mud waste as the replacement of mineral filler in asphalt mixture*". Construction and Building Materials, 2018. **180**: p. 605-613.
- .20 Wool, R.P." *Self-healing materials: a review*". Soft Matter, 2008. 4(3): p. 400-418.
- .21 Canestrari, F ,.et al." *Modeling and assessment of self-healing and thixotropy properties for modified binders*". International Journal of Fatigue, 2015. **70**: p. 351-360.
- .22 Sun, D., et al." *A comprehensive review on self-healing of asphalt materials: Mechanism, model, characterization and enhancement*". Advances in Colloid and Interface Science, 2018. **256**: p. 65-93.
- .23 Liu, Q., et al." *Evaluation of the induction healing effect of porous asphalt concrete through four point bending fatigue test*". Construction and Building Materials, 2012. **29**: p. 403-409.
- .24 Lytton, R.L." *Characterizing Asphalt Pavements for Performance*". Transportation Research Record, 2000. **1723**(1): p. 5-16.
- .25 Kazemi, M., A. Goli, and M. Nasimifar." *Evaluation of the self-healing performance of polyurethane-modified bitumen using bitumen bond strength (BBS) test and CT scan*". International Journal of Pavement Research and Technology, 2021. **14**(2): p. 168-173.
- .26 Ganjei, M.A. and E. Aflaki." *Application of nano-silica and styrene-butadiene-styrene to improve asphalt mixture self healing*". International Journal of Pavement Engineering, 2016. **20**(1): p. 89-99.

- .27 Norambuena-Contreras, J. and I. Gonzalez-Torre." *Influence of the Microwave Heating Time on the Self-Healing Properties of Asphalt Mixtures*". Applied Sciences, 2017. 7.(10)
- .28 Lou, B., et al." *Effect of metallic-waste aggregates on microwave self-healing performances of asphalt mixtures*". Construction and Building Materials, 2020. 246: p. 118510.
- .29 Yıldız, K. and M. Atakan." *Improving microwave healing characteristic of asphalt concrete by using fly ash as a filler*". Construction and Building Materials, 2020. 262: p. 120448.
- .30 Li, M., et al." *Investigating the healing capacity of asphalt mixtures containing iron slag*". Construction and Building Materials, 2020. 261: p. 119446.
- .31 Norambuena-Contreras, J. and A. Garcia." *Self-healing of asphalt mixture by microwave and induction heating*". Materials & Design, 2016. 106: p. 404-414.
- .32 Yamaç, Ö.E., et al." *Self-healing of asphalt mastic using capsules containing waste oils*". Construction and Building Materials, 2021. 270: p. 121417.
- .33 Sun, Y., et al." *Self-healing performance of asphalt mixtures through heating fibers or aggregate*". Construction and Building Materials, 2017. 150: p. 673-680.
- .34 حسامی، ا. و م. زال نژاد. "کاربرد سرباره فولاد به عنوان سنگدانه در صنعت راهسازی". جاده. ۲۰۲۰. ۲۸(۱۰۵): p. 119-134.
- .35 امیری، س. (۱۳۹۸). پایان نامه کارشناسی ارشد: "عملکرد آزمایشگاهی مخلوط های WMA حاوی RAP و سرباره آهن گدازی". دانشکده مهندسی عمران. دانشگاه صنعتی شاهرود
- .36 Hunt, L. and G.E. Boyle." *Steel Slag in Hot Mix Asphalt Concrete: Final Report*". 2000.

- .37 Monshi, A. and M.K. Asgarani." *Producing Portland cement from iron and steel slags and limestone*". Cement and Concrete Research, 1999. 29(9): p. 1373-1377.
- .38 Cabrera, C., C. Moron, and A. Garcia." *Learning process of the steel use in building engineering students*". American Journal of Educational Research, 2014. 2(6): p. 366-371.
- .39 Xue, Y., et al." *Experimental investigation of basic oxygen furnace slag used as aggregate in asphalt mixture*". Journal of Hazardous Materials, 2006. 138(2): p. 261-268.
- .40 Wang, G.C." *Slag Use in Asphalt Paving*". The Utilization of Slag in Civil Infrastructure Construction, 2016: p. 201-238.
- .41 Yildirim, I.Z. and M. Prezzi." *Chemical, Mineralogical, and Morphological Properties of Steel Slag*". Advances in Civil Engineering, 2011. 2011: p. 463638.
- .42 Goli, H., S. Hesami, and M. Ameri." *Laboratory Evaluation of Damage Behavior of Warm Mix Asphalt Containing Steel Slag Aggregates*". Journal of Materials in Civil Engineering, 2017. 29(6): p. 04017009.
- .43 Masoudi, S., S.M. Abtahi, and A. Goli." *Evaluation of electric arc furnace steel slag coarse aggregate in warm mix asphalt subjected to long-term aging*". Construction and Building Materials, 2017. 135: p. 260-266.
- .44 Gonawala, R.J., et al." *Suitability of EAF slag and GGBFS mix as cementitious base/subbase layer for low volume road construction*". International Journal of Geotechnical Engineering, 2021. 15(2): p. 252-258.

- .45 Freire, A., M. Lopes, and R. Andrade, *Mechanical behaviour of asphalt mixtures with steel slag aggregate for construction to be used in road pavement layers*. 2016.
- .46 Li, Q., et al. "Application of steel slag powder to enhance the low-temperature fracture properties of asphalt mastic and its corresponding mechanism". Journal of Cleaner Production, 2018. 184: p. 21-31.
- .47 Zumrawi, M.M. and F.O. Khalil. "Experimental study of steel slag used as aggregate in asphalt mixture". International Journal of Civil and Environmental Engineering, 2015. 9(6): p. 753-758.
- .48 Kong, D., et al. "Geometric Characteristics of BOF Slag Coarse Aggregate and its Influence on Asphalt Concrete". Materials, 2019. 12(5): p. 741.
- .49 Ye, Y., et al. "Morphological Discrepancy of Various Basic Oxygen Furnace Steel Slags and Road Performance of Corresponding Asphalt Mixtures". Materials, 2019. 12(14): p. 2322.
- .50 Liu, Q., et al. "Research on the Mechanical, Thermal, Induction Heating and Healing Properties of Steel Slag/Steel Fibers Composite Asphalt Mixture". Applied Sciences, 2017. 7(10): p. 1088.
- .51 Kavussi, A. and M.J. Qazizadeh. "Fatigue characterization of asphalt mixes containing electric arc furnace (EAF) steel slag subjected to long term aging". Construction and Building Materials, 2014 :72 .p. 158-166.
- .52 Pasetto, M. and N. Baldo. "Mix design and performance analysis of asphalt concretes with electric arc furnace slag". Construction and Building Materials, 2011. 25(8): p. 3458-3468.

- .53 Phan, T.M., D.-W. Park, and T.H.M. Le." *Crack healing performance of hot mix asphalt containing steel slag by microwaves heating*". Construction and Building Materials, 2018. **180**: p. 503-511.
- .54 Asi, I.M." *Evaluating skid resistance of different asphalt concrete mixes*". Building and Environment, 2007. **42** :(1)p. 325-329.
- .55 Amelian, S., et al." *Moisture sensitivity and mechanical performance assessment of warm mix asphalt containing by-product steel slag*". Journal of Cleaner Production, 2018. **176**: p. 329-337.
- .56 Xie, J., et al." *Performance characteristics of asphalt mixture with basic oxygen furnace slag*". Construction and Building Materials, 2013. **38**: p. 796-803.
- .57 Asi, I.M., H.Y. Qasrawi, and F.I. Shalabi." *Use of steel slag aggregate in asphalt concrete mixes*". Canadian Journal of Civil Engineering, 2007. **2** :(8)34 .007p. 902-911.
- .58 Hesami, S., et al." *Laboratory investigation of moisture susceptibility of warm-mix asphalt mixtures containing steel slag aggregates*". International Journal of Pavement Engineering, 2015. **16**(8): p. 745-759.
- .59 Ameri, M., S. Hesami, and H. Goli." *Laboratory evaluation of warm mix asphalt mixtures containing electric arc furnace (EAF) steel slag*". Construction and Building Materials, 2013. **49**: p. 611-617.
- .60 Chen, J.-S. and S.-H. Wei." *Engineering properties and performance of asphalt mixtures incorporating steel slag*". Construction and Building Materials, 2016. **128**: p. 148-153.

۶۱. ارزشنگی، م. (۱۳۹۶). پایان نامه کارشناسی ارشد: "ارزیابی اثرات زیست محیطی پسماند گل

قرمز". دانشکده علوم، دانشگاه فردوسی مشهد

- .62 Mukiza, E., et al." *Utilization of red mud in road base and subgrade materials: A review*". Resources, Conservation and Recycling, 2019. 141: p. 187-199.
- .63 Yao, L., et al." *Properties Analysis of Asphalt Binders Containing Bayer Red Mud*". Materials, 2020. 13(5): p. 1122.
- .64 Lima, M .and L.P. Thives. *Evaluation of permanent deformation in asphalt mixtures composed with red mud as filler*. 2016.
- .65 Zhang, J., et al." *Experimental study on rheological properties and moisture susceptibility of asphalt mastic containing red mud waste as a filler substitute*". Construction and Building Materials, 2019. 211: p. 159-166.
- .66 Özdemir, A.M., et al." *Investigation of the effect of carbonation cake on rheological properties of bituminous binders*". The International Journal of Materials and Engineering Technology, 2021. 4(1): p. 10-17.
- .67 Rubio, M.C., et al." *Warm mix asphalt: an overview*". Journal of Cleaner Production, 2012. 24: p. 76-84.
- .68 Hamzah, M.O., M.R. Kakar, and M.R. Hainin." *An Overview of Moisture Damage in Asphalt Mixtures*". Jurnal Teknologi, 2015. 73.(4)





## Abstract

Reduction of non-renewable natural resources such as rock materials and pollution caused by the accumulation of waste materials in nature are the most important reasons for using recycled materials in the construction of green asphalt mixtures. On the other hand, the self-healing phenomenon is one of the significant features of asphalt mixtures that reduces the economic costs of healing and maintenance and the environmental costs of asphalt reproduction. In this research, in order to construction environmentally friendly green asphalt mixtures, particle size of steel slag were ranged from 4.75-9.5 mm with a 60% replacement in a volume ratio of limestone aggregate and the proportions of the red mud waste has been used respectively 50% and 100% by a ratio of limestone filler and the self-healing index and moisture sensitivity of these mixtures have been evaluated. In order to investigate the self-healing index, the semi-circular bending test (SCB) was performed by 7 damage-healing cycles using the microwave irradiation heating method. Results indicated that the steel slag and 50% red mud waste in the first healing cycle, the amount of optimum healing rate compared to the control sample, respectively; 53.01% and 32.35% have increased. Also, due to the importance of moisture damage, indirect tensile strength (ITS) test according to AASHTO T283 was performed on cylindrical specimens and the results showed that the amount of moisture resistance in mixtures containing steel slag and 50% red mud decreased by 16% and 21%, respectively, compared to the control sample. The use of 50% and 100% carbonation cake as a replacement for limestone filler in mixtures containing steel slag has increased the moisture resistance by 9% and 13%, respectively. Also, this weakness of resistance in the sample containing 50% of red mud was compensated by using 50% of carbonation cake and moisture resistance was increased by 12%. by examining the results of Marshall Quotient (MQ), it was found that steel slag, 50% red mud and 50% carbonation cake increased the stiffness of asphalt mixture compared to the control sample by 1.4, 1.51 and  $0.05 \left( \frac{KN}{mm} \right)$ , respectively.

**Keywords:** Self-healing, Microwave, Steel slag, Red mud, Carbonation cake, Moisture sensitivity



**Shahrood University of Technology**

**Faculty of *Civil Engineering***

**M.Sc. Thesis in Roads and transport Engineering**

**Laboratory evaluation of the self-healing index in green asphalt  
mixtures**

By:

Hassan Azargohar

Supervisor:

Dr. Seyyed Ali Hosseini

October 2021