

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشکده مهندسی عمران

پایان نامه کارشناسی ارشد - راه و ترابری

بررسی تاثیر زغال سنگ بر حساسیت رطوبتی و خود ترمیمی مخلوط آسفالتی

نگارنده: محمد یوسفی مقدم

استاد راهنما:

دکتر سید علی حسینی

شهریور ۱۴۰۰

تقدیم به

دای عزیزم شهید علی حدیری که یادش همیشه در دلهای ما جادوانه می ماند

تشکر و قدردانی

سپاس خدای بزرگ را که مرا یاری رساند تا بتوانم این مقطع تحصیلی را به پایان رسانده و گامی هر چند کوچک در راستای اعتلای علم بردارم. از استاد راهنمای گرانقدرم جناب آقای دکتر سید علی حسینی که نگارنده را همواره مورد لطف و محبت خود قرار داده اند، کمال تشکر را دارم.

تعهدنامه

اینجانب محمد یوسفی مقدم دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته مهندسی عمران-راه و ترابری دانشگاه

صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه با موضوع بررسی تاثیر زغال سنگ بر حساسیت رطوبتی و خود

ترمیمی مخلوط آسفالتی متعهد می شوم:

- تحقیقات در این پایان نامه توسط اینجانب انجام شده است و از صحت و اصالت برخوردار است.
- در استفاده از نتایج پژوهش های 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 بوده اند در مقالات مستخرج از پایان نامه رعایت می گردد.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که از موجود زنده (یا بافت های آن ها) 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، برنامه های رایانه ای، نرم افزارها و تجهیزات ساخته شده) متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می باشد. این مطلب باید به نحو مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود.
- استفاده از اطلاعات نتایج موجود در پایان نامه بدون ذکر مرجع مجاز نمی باشد.

چکیده

روسازی‌های آسفالتی در دوره‌ی بهره‌برداری، با گذشت زمان نیاز به نگهداری و ترمیم دارند. خرابی‌های روسازی ناشی از عواملی چون بارگذاری ترافیکی، دما، رطوبت و ... می‌باشند که بی‌توجهی به موارد فوق می‌تواند موجب تشدید این خرابی‌ها گردد. در این پژوهش سعی شده است با استفاده از خاصیت خودترمیمی مخلوط‌های آسفالتی و استفاده از مواد ضایعاتی، مخلوط آسفالتی دوستدار محیط زیست با قابلیت ترمیم خرابی‌ها تولید نماییم. برای این منظور از دو نوع افزودنی (باطله ی زغال سنگ و ضایعات روغن خوراکی) که خود نوعی ضایعات صنعتی می‌باشند و تاکنون در ترمیم آسفالت به کار گرفته نشده‌اند، استفاده شده است تا ضمن بهبود فرآیند خودترمیمی، شرایط زیست محیطی را نیز بهبود بخشند.

برای یافتن افزودنی مناسب علاوه بر توجه به مسائل زیست محیطی باید این نکته را در نظر گرفت که افزودنی قابلیت گرم شدن توسط امواج ماکروویو را داشته باشد. باطله‌ی زغال سنگ و روغن‌های ضایعات خوراکی استفاده شده دو افزودنی می‌باشند که ضمن اقتصادی بودن می‌توانند با توجه به ماهیتی که دارند توسط امواج ماکروویو دچار افزایش دما شده و سبب وقوع فرآیند خودترمیمی در روسازی آسفالتی شوند.

در نمونه‌های ساخته شده با افزودن ۲۰ درصد باطله زغال سنگ به عنوان جایگزین مصالح ریزدانه و ۵ درصد ضایعات روغن خوراکی (بر اساس وزن قیر)، مخلوط آسفالتی به ترتیب ۵۰ و ۵۴ درصد ترمیم شده است و مقاومت گسیختگی با افزودن ۲۰ درصد باطله زغال سنگ، نسبت به نمونه شاهد آهکی ۱۶ درصد افزایش یافت. همچنین شاخص حساسیت رطوبتی برای نمونه‌های حاوی ۲۰ درصد باطله زغال سنگ و نمونه‌های حاوی روغن ضایعاتی که نمونه‌های بهینه از نظر خود ترمیمی هستند به ترتیب ۷۶ و ۷۷ به دست آمده است که به لحاظ مقاومت رطوبتی در حد قابل قبولی می‌باشد.

کلمات کلیدی: خودترمیمی، روغن ضایعات، باطله زغال سنگ، حساسیت رطوبتی، خمش سه نقطه ای، مخلوط آسفالتی گرم

فهرست مطالب

فصل اول:	۱
مقدمه	۱
۱-۱ مقدمه	۲
۲-۱ ضرورت انجام تحقیق	۳
۳-۱ فرض های پژوهش	۴
۴-۱ اهداف پژوهش	۴
۵-۱ روش تحقیق :	۵
۱-۶ نوآوری	۵
۷-۱ ساختار پژوهش	۶
فصل دوم:	۷
مبانی نظری و پیشینه پژوهش	۷
۱-۲ مقدمه	۸
۲-۲ بررسی امکان استفاده از آسفالت خود ترمیم شونده در ایران	۹
۳-۲ مزایای زیست محیطی و اقتصادی تکنولوژی خود ترمیمی	۹
۴-۲ روش ترمیم و تامین گرمایش	۱۰
۱-۴-۲ گرمایش ماکروویو و القایی	۱۱
۲-۴-۲ گرمایش فرسرخ	۱۷
۳-۴-۲ استفاده از میکروکپسول ها در ترمیم	۱۸

۲۰	۵-۲ دمای بهینه برای ترمیم
۲۷	۶-۲ توزیع افزودنی در نمونه
۲۸	۷-۲ تاثیر استراحت نمونه پس از گرمایش بر ترمیم
۲۹	۸-۲ تاثیر شدت خرابی ، عرض ترک و مدت زمان استراحت بر ترمیم
۳۲	۹-۲ میزان تخلخل و تاثیر آن بر ترمیم
۳۴	۱۰-۲ تاثیر نوع قیر بر ترمیم
۳۶	۱۱-۲ اندازه ی سنگدانه و تاثیر آن بر ترمیم
۳۷	۱۲-۲ تاثیر افزودنیها بر ترمیم
۳۷	۱-۱۲-۲ خاکستر بادی
۳۹	۲-۱۲-۲ میکروکپسول های جوان ساز
۴۰	۳-۱۲-۲ نانوزایکوترم و الیاف فورتا
۴۰	۴-۱۲-۲ فورتا فای
۴۱	۵-۱۲-۲ زغال سنگ
۴۲	۶-۱۲-۲ مواد کربنی
۴۳	۷-۱۲-۲ خاکستر زغال سنگ
۴۵	۸-۱۲-۲ ضایعات روغن خوراکی
۴۹	فصل سوم:
۴۹	تئوری ها و آزمایشات
۵۰	۱-۳ مقدمه
۵۰	۲-۳ مواد و مصالح مصرفی
۵۰	۱-۲-۳ قیر

۵۲	 ۲-۲-۳ مصالح سنگی
۵۴	 ۳-۲-۳ باطله ی زغال سنگ
۵۶	 ۴-۲-۳ ضایعات روغن خوراکی
۵۷	 ۳-۳ آزمایشات و ساخت نمونه
۵۷	 ۱-۳-۳ روش ساخت نمونه
۶۳	 ۲-۳-۳ نمونه حاوی باطله زغال سنگ
۶۳	 ۳-۳-۳ نمونه حاوی ضایعات روغن
۶۴	 ۴-۳-۳ درصد قیر بهینه
۶۴	 ۵-۳-۳ آزمایش مقاومت مارشال (ASTM-D1559)
۶۶	 ۶-۳-۳ شاخص مارشال (MQ)
۶۷	 ۷-۳-۳ آزمایش کشش غیر مستقیم لاتمن اصلاح شده
۶۸	 ۸-۳-۳ آزمایش حساسیت رطوبتی
۷۱	 ۹-۳-۳ آزمایش خمش سه نقطه ای (نمونه ی scb)
۷۵	 ۴-۳ گرمایش به وسیله امواج ماکروویو و ترمیم نمونه ها
۷۹	 فصل چهارم:
۷۹	 بررسی و تحلیل نتایج
۸۰	 ۱-۴ مقدمه
۸۱	 ۲-۴ درصد قیر بهینه
۸۵	 ۳-۴ نتایج آزمایش شاخص مارشال
۸۶	 ۴-۴ آزمایش خمش سه نقطه ای و بررسی میزان ترمیم

۸۹	۵-۴ محاسبات مقاومت خمشی و نرخ ترمیم
۸۹	۴-۵-۱ سیکل اول :
۹۲	۴-۵-۲ سیکل دوم :
۹۵	۴-۵-۳ سیکل سوم :
۹۸	۴-۵-۴ سیکل چهارم
۱۰۱	۴-۵-۵ سیکل پنجم
۱۰۴	۴-۵-۶ سیکل ششم
۱۰۷	۴-۵-۷ سیکل هفتم
۱۱۰	۴-۵-۸ جمع بندی ترمیم
۱۱۱	۴-۶ آزمون حساسیت رطوبتی
۱۱۵	فصل پنجم:
۱۱۵	جمع بندی نتایج و ارائه پیشنهادها
۱۱۶	۵-۱ مقدمه
۱۱۶	۵-۲ نتیجه گیری
۱۱۸	۵-۳ پیشنهادات
۱۲۱	مراجع

فهرست اشکال

- شکل ۱-۱ ماشین ماکروویو مخلوط های آسفالتی خود ترمیم شونده ۳
- شکل ۲-۱ ساختار پایان نامه ۶
- شکل ۲-۲ میزان گرمایش نمونه حاوی سرباره (سمت راست) و نمونه معمولی (سمت چپ) [۶] ۱۲
- شکل ۴-۲ گرمایش مخلوط حاوی الیاف فلز تحت ماکروویو (سمت راست) با القا (سمت چپ) [۶] ۱۲
- شکل ۳-۲ گرمایش نمونه حاوی سرباره تحت امواج ماکروویو (سمت راست) با القا (سمت چپ) [۶] ۱۲
- شکل ۵-۲ گرمایش سیم ها با قطر ۰/۱ میلی متر (مشکی) و قطر ۰/۰۵ میلی متر (خاکستری) [۷] ۱۴
- شکل ۶-۲ گرمایش تحت ماکروویو برای سیم های با قطر مختلف و طول ۵ میلی متر با درصد های مختلف [۷] ۱۴
- شکل ۷-۲ گرمایش سیم ها با قطر ۰/۱ میلی متر (مشکی) و ۰/۰۵ میلی متر (خاکستری) با طول ۱۰ میلیمتر [۷] ۱۵
- شکل ۸-۲ گرمایش تحت ماکروویو برای سیم های با قطر مختلف و طول ۵ میلی متر با درصد های مختلف [۷] ۱۵
- شکل ۱۰-۲ مقایسه گرمایش مواد مختلف تحت امواج ماکروویو [۱۰] ۱۷
- شکل ۱۱-۲ شبیه سازی نور خورشید با مادون قرمز [۱۱] ۱۸
- شکل ۱۲-۲ دستگاه کوره القائی [۱۱] ۱۸
- شکل ۱۳-۲ حضور کپسول در بین مخلوط آسفالتی [۱۲] ۱۹

- شکل ۲-۱۴ مقایسه استفاده از کپسول و القا جهت ترمیم و محاسبه نرخ ترمیم در هر سیکل [۱۲]
- ۲۰.....
- شکل ۲-۱۵ دستگاه القائی و قرارگیری دال در زیر آن [۱۳]..... ۲۱
- شکل ۲-۱۴ مقایسه دما بر حسب زمان در اعماق مختلف نمونه با دو فاصله مختلف از کویل القائی [۱۳]..... ۲۱
- شکل ۲-۱۵ نرخ ترمیم بر حسب زمان در اعماق مختلف یک نمونه [۱۳]..... ۲۲
- شکل ۲-۱۶ عکسبرداری با اشعه ایکس و بررسی ترمیم [۱۳]..... ۲۳
- شکل ۲-۱۷ میزان ترمیم عمر خستگی توسط القا [۱۴]..... ۲۴
- شکل ۲-۱۸ بررسی توزیع افزودنی فلزی توسط عکس برداری با اشعه ایکس [۱۵]..... ۲۵
- شکل ۲-۱۹ شکستگی سنگدانه بعد از آزمون خمشی [۱۶]..... ۲۶
- شکل ۲-۲۰ توزیع دمایی نا برابر به دلیل عدم توزیع یکنواخت الیاف فلزی [۱۷]..... ۲۸
- شکل ۲-۲۱ وجود مواد فلزی در سنگدانه (سمت راست) و وجود الیاف افزوده شده در بین سنگدانهها (سمت چپ) [۱۸]..... ۲۹
- شکل ۲-۲۲ ترمیم یافتن نمونه قیر در طی زمان های مختلف [۱۹]..... ۳۰
- شکل ۲-۲۳ مفهوم میزان تخریب نمونه با توجه به نمودار نیرو - جابجایی [۲۰]..... ۳۱
- شکل ۲-۲۴ میزان تخریب نمونه با توجه به طول ترک تشکیل شده [۲۰]..... ۳۱
- شکل ۲-۲۵ بدست آوردن تعداد سیکل خستگی با احتمال ۵۰ درصد شکست نمونه [۲۱]..... ۳۳
- شکل ۲-۲۶ کاهش عمر خستگی با افزایش میزان تخلخل [۲۱]..... ۳۳
- شکل ۲-۲۷ مقایسه ترمیم و روان شدن قیر در مخلوط متراکم (ردیف بالا) و مخلوط متخلخل (ردیف پایین) [۲۱]..... ۳۴
- شکل ۲-۲۸ مقایسه نرخ ترمیم قیر های مختلف [۲۳]..... ۳۵

- شکل ۲-۲۹ داده های دمایی سرباره با ابعاد مختلف تحت امواج ماکروویو [۲۴] ۳۶
- شکل ۲-۳۰ اندازه گیری ضریب انتقال حرارت نمونه مارشال توسط سنسورها [۲۴] ۳۷
- شکل ۲-۳۱ مقایسه رشد دمای نمونه حاوی خاکستر بادی تحت ماکروویو با نمونه شاهد [۲۷]. ۳۹
- شکل ۲-۳۲ میزان ترمیم نمونه حاوی فورتا فای و نانوزایکوترم [۳۰] ۴۱
- شکل ۲-۳۳ نحوه چرخش مولکولها تحت میدان الکتریکی در ماکروویو [۳۲] ۴۳
- شکل ۲-۳۴ تست لیچینگ و تغییر رنگ مایع مخصوص [۳۵] ۴۴
- شکل ۲-۳۵ مقاومت کششی غیر مستقیم مخلوط با آسفالت بازیافتی و روغن ضایعاتی [۳۹] ۴۷
- شکل ۲-۳۶ خاصیت انگمی قیر بر حسب مقادیر مختلف روغن ۴۸
- شکل ۳-۱ مصالح و افزودنی های مورد استفاده در پژوهش ۵۰
- شکل ۳-۲ نمودار حدود دانه بندی ۵۴
- شکل ۳-۳ وزن کشی در حالت غوطه ور به منظور بدست آوردن وزن مخصوص حقیقی ۵۵
- شکل ۳-۴ دو نوع باطله ی زغال سنگ با مشخصات متفاوت ۵۶
- شکل ۳-۵ گرم کردن و اختلاط روغن های استفاده شده به صورت همگن ۵۷
- شکل ۳-۶ خشک کردن مصالح به منظور الک کردن آنان ۵۸
- شکل ۳-۷ الک کردن مصالح و تفکیک در ظروف جداگانه ۵۹
- شکل ۳-۸ گرمخانه به منظور خشک کردن مصالح ۵۹
- شکل ۳-۹ گرمخانه مخصوص گرم کردن قیر و شماره گذاری ظروف قیر ۶۰
- شکل ۳-۱۰ قالب های مارشال مخصوص ساخت نمونه ۶۰
- شکل ۳-۱۱ اختلاط قیر و سنگدانه ۶۱
- شکل ۳-۱۲ دستگاه همزن قیر و سنگدانه ۶۱
- شکل ۳-۱۳ هیتر گرم کردن ظرف اختلاط ۶۱

- شکل ۳-۱۴ روغن کاری قالبها ۶۲
- شکل ۳-۱۵ دستگاه چکش مارشال ۶۲
- شکل ۳-۱۶ جک خارج کردن نمونه از قالب مارشال ۶۲
- شکل ۳-۱۷ مخلوط کن دور بالا (high shear) ۶۴
- شکل ۳-۱۸ دستگاه حمام بنماری ۶۵
- جدول ۳-۱۹ دستگاه تک محوره ی یونیورسال (UTM) ۶۵
- شکل ۳-۲۰ قرارگیری نمونه در فک آزمایش مارشال قبل از بارگذاری (سمت چپ) و بعد از بارگذاری (سمت راست) ۶۶
- شکل ۳-۲۱ قالب آزمایش کشش غیر مستقیم ۶۷
- شکل ۳-۲۲ دستگاه وکیوم به منظور اشباع کردن نمونه ۷۰
- شکل ۳-۲۳ ریختن آب درون کیسه پلاستیکی با سرنگ مدرج ۷۱
- شکل ۳-۲۴ قرارگیری نمونه ها در یخچال ۷۱
- شکل ۳-۲۵ قرارگیری نمونه ها در حمام آب به منظور اعمال چرخه ذوب ۷۱
- شکل ۳-۲۶ فک دستگاه کشش غیر مستقیم و اعمال نیرو در راستای قطر نمونه ۷۱
- شکل ۳-۲۷ برش نمونه مارشال و ساخت نمونه scb ۷۲
- شکل ۳-۲۸ ایجاد شیار در زیر نمونه scb ۷۲
- شکل ۳-۲۹ عملیات برشکاری نمونه مارشال به منظور تولید نمونه scb ۷۳
- شکل ۳-۳۰ دستگاه خمش سه نقطه ای ۷۴
- شکل ۳-۳۱ جک دستگاه خمش سه نقطه ای ۷۴
- شکل ۳-۳۲ دیتالاگر ثبت داده های نیرو و کرنش ۷۴
- شکل ۳-۳۳ ماشین ماکروویو در عملیات میدانی ترمیم ۷۶

- شکل ۳-۳۴ اندازه گیری دمای نمونه توسط دوربین حرارتی ۷۷
- شکل ۳-۳۵ اعمال فشار ناچیز به نمونه ی گرمایش یافته توسط کش ۷۸
- شکل ۴-۱ برشی از نمونه ها با درصدهای مختلف باطله ی زغال سنگ ۸۱
- شکل ۴-۲ نمودار مقاومت مارشال نمونه حاوی ۶۰ درصد باطله با درصدهای قیر مختلف ۸۳
- شکل ۴-۳ نمودار وزن مخصوص حقیقی نمونه حاوی ۶۰ درصد باطله با درصدهای قیر مختلف ۸۳
- شکل ۴-۴ نمودار درصد هوای نمونه حاوی ۶۰ درصد باطله با درصدهای قیر مختلف ۸۳
- شکل ۴-۵ کنترل روانی نمونه C₆₀ در نقطه ی درصد قیر بهینه ۸۴
- شکل ۴-۶ نمودار شاخص مارشال ترکیبات ۸۶
- شکل ۴-۷ گرمایش نمونه حاوی باطله زغال سنگ ۸۸
- شکل ۴-۸ گرمایش نمونه حاوی روغن ضایعاتی ۸۸
- شکل ۴-۹ عکس گرمایش نمونه شاهد آهکی ۸۸
- شکل ۴-۱۰ نمودار ترمیم نمونه ها بر حسب زمان ماکروویو در سیکل اول ۹۱
- شکل ۴-۱۱ نمودار دمای نمونه ها بر حسب زمان ماکروویو در سیکل اول ۹۱
- شکل ۴-۱۲ نمودار ترمیم نمونه ها بر حسب زمان ماکروویو در سیکل دوم ۹۴
- شکل ۴-۱۳ نمودار دمای نمونه ها بر حسب زمان ماکروویو در سیکل دوم ۹۴
- شکل ۴-۱۴ نمودار ترمیم نمونه ها بر حسب زمان ماکروویو در سیکل سوم ۹۷
- شکل ۴-۱۵ نمودار دمای نمونه ها بر حسب زمان ماکروویو در سیکل سوم ۹۷
- شکل ۴-۱۶ نمودار ترمیم نمونه ها بر حسب زمان ماکروویو در سیکل پنجم ۱۰۳
- شکل ۴-۱۷ نمودار دمای نمونه ها بر حسب زمان ماکروویو در سیکل پنجم ۱۰۳
- شکل ۴-۱۸ نمودار ترمیم نمونه ها بر حسب زمان ماکروویو در سیکل ششم ۱۰۶
- شکل ۴-۱۹ نمودار دمای نمونه ها بر حسب زمان ماکروویو در سیکل ششم ۱۰۶

- شکل ۴-۲۰ نمودار ترمیم نمونه ها بر حسب زمان ماکروویو در سیکل هفتم ۱۰۹
- شکل ۴-۲۱ نمودار دمای نمونه ها بر حسب زمان ماکروویو در سیکل ششم ۱۰۹
- شکل ۴-۲۲ ترمیم بهینه ی ترکیبات در سیکل های مختلف ۱۱۱
- شکل ۴-۲۳ نمودار مقادیر ITS در حالت خشک و رطوبتی ۱۱۳
- شکل ۴-۲۴ نمودار مقادیر TSR ۱۱۳

فهرست جداول

جدول ۱-۲ مقایسه مشخصات حرارتی مخلوط اصلاحش شده با الیاف فلز با مخلوط حاوی سرباره	۱۱
[۶].....	
جدول ۲-۲ میزان دمای سنگ های مختلف تحت امواج ماکروویو [۹].....	۱۶
جدول ۳-۲ ترکیبات شیمیایی موجود در خاکستر بادی [۲۷].....	۳۸
جدول ۱-۳ مشخصات قیر مصرفی (۶۰/۷۰).....	۵۱
جدول ۲-۳ مشخصات مصالح سنگی استفاده شده در پژوهش.....	۵۲
جدول ۳-۳ دانه بندی مورد استفاده برای نمونه های مارشال در پژوهش.....	۵۳
جدول ۴-۳ آنالیز باطله زغال سنگ.....	۵۵
جدول ۵-۳ آزمایشات انجام شده در پژوهش.....	۵۷
جدول ۶-۳ دانه بندی نمونه حاوی باطله زغال سنگ.....	۶۳
جدول ۱-۴ ترکیبات استفاده شده در پژوهش به عنوان افزودنی.....	۸۰
جدول ۲-۴ درصد قیر بهینه برای هر یک از ترکیبات.....	۸۲
جدول ۳-۴ مشخصات نمونه حاوی ۶۰ درصد باطله ی زغال سنگ با درصد های مختلف قیر.....	۸۲
جدول ۴-۴ میانگین درصد قیر بهینه برای نمونه C ₆₀	۸۴
جدول ۵-۴ نتایج شاخص مارشال.....	۸۵
جدول ۶-۴ ترمیم سیکل اول.....	۸۹
جدول ۷-۴ حداکثر ترمیم در دما و زمان بهینه سیکل اول.....	۸۹
جدول ۸-۴ ترمیم سیکل دوم.....	۹۲
جدول ۹-۴ حداکثر ترمیم در دما و زمان بهینه سیکل دوم.....	۹۲
جدول ۱۰-۴ ترمیم سیکل سوم.....	۹۵

جدول ۴-۱۱	حداکثر ترمیم در دما و زمان بهینه سیکل سوم	۹۵
جدول ۴-۱۲	ترمیم سیکل چهارم	۹۸
جدول ۴-۱۳	حداکثر ترمیم در دما و زمان بهینه سیکل چهارم	۹۸
جدول ۴-۱۴	ترمیم سیکل پنجم	۱۰۱
جدول ۴-۱۵	حداکثر ترمیم در دما و زمان بهینه سیکل پنجم	۱۰۱
جدول ۴-۱۶	ترمیم سیکل ششم	۱۰۴
جدول ۴-۱۷	حداکثر ترمیم در دما و زمان بهینه سیکل ششم	۱۰۵
جدول ۴-۱۸	ترمیم سیکل هفتم	۱۰۷
جدول ۴-۱۹	حداکثر ترمیم در دما و زمان بهینه سیکل هفتم	۱۰۷
جدول ۴-۲۰	مقادیر ITS و TSR ترکیبات	۱۱۲

فصل اول:

مقدمه

۱-۱ مقدمه

امروزه در سطح جاده‌های کشور دست اندازها و خرابی‌های گوناگون مساله‌ای است که کمتر کسی با آن روبرو نشده است، که این خود می‌تواند موجب کاهش راحتی رانندگی و ایمنی سفر شود. در سال‌های اخیر با توجه به رشد تعداد وسایل نقلیه، هزینه‌های زیادی صرف تعمیر و نگهداری جاده‌ها می‌گردد. روند این خرابی‌ها اغلب ابتدا از ترک‌های کوچک شروع شده و به مرور رشد کرده تا به شدیدترین خرابی‌ها تبدیل می‌شود، که در این مرحله باید به روش‌هایی نظیر لکه‌گیری یا روکش و یا بازسازی آسفالت بپردازیم؛ حال اگر در همان ابتدا از رشد ترک‌های کوچک جلوگیری به عمل آید و آنان را ترمیم کنیم شاهد بروز خرابی‌های شدید نخواهیم بود. پس پدیده‌ی خود ترمیمی می‌تواند یک انتخاب مناسب برای رسیدن به این هدف باشد و به افزایش عمر مفید روسازی آسفالتی کمک می‌کند. در پدیده‌ی خود ترمیمی گرم شدن قیر و روان شدنش در بین سنگدانه‌ها می‌تواند ترک‌های کوچک را مجدداً پر کند و به ترمیم خرابی بپردازد. محققین به دنبال روشی برای بهبود این فرآیند نظیر بهترین دمای ترمیم، بهترین روش گرمادهی، افزودنی‌های بهبود گرمادهی و سازگار با محیط زیست و ... می‌باشند. یکی از فاکتورهای اساسی برای حاصل شدن ترمیم، بالا رفتن دمای مخلوط آسفالتی می‌باشد که به روش‌های مختلفی همچون گرمایش ماکروویو، القایی و حرارت شعله صورت می‌گیرد. در شکل ۱-۱ نمونه‌ای از دستگاه‌های گرمایش به وسیله‌ی ماکروویو نشان داده شده است که این امواج سبب گرم شدن آن می‌شود. اکنون بررسی اینکه بینیم چه افزودنی‌هایی را می‌توان با مخلوط آسفالتی بیافزاییم تا بتوانیم با استفاده از ماکروویو گرمادهی بهینه‌تر با صرف انرژی کمتر داشته باشیم و در نهایت نرخ ترمیم بالاتر و کمترین حساسیت رطوبتی را تجربه کنیم، مساله‌ی با اهمیتی خواهد بود. این دانش در حالت کلی موضوعی نسبتاً نوین می‌باشد و همچنین در کشور ما تاکنون محققین کمتری در این باره به بررسی پرداخته‌اند، امید است با پیشرفت در عرصه‌ی خود ترمیمی آسفالت گامی در جهت کاربردی شدن آن در صنعت راهسازی کشور و جلوگیری از اتلاف هزینه‌ها برداریم.



شکل ۱-۱ ماشین ماکروویو مخلوط های آسفالتی خود ترمیم شونده

۲-۱ ضرورت انجام تحقیق

مساله نگهداری زیست محیطی و اقتصادی روسازی های آسفالتی مساله ی اغلب کشور های به روز دنیا می باشد تا با یافتن روش های نوین در جهت جلوگیری از هدر رفتن منابع اقدام کنند . با توجه به این رویکرد باید به دنبال روش هایی بود که با در نظر گرفتن مسائل اقتصادی به آسفالتی با بهترین کیفیت دست یافت تا هزینه نگهداری آن حداقل و طول عمر آن حداکثر شود و با توجه به حجم بالای مصالح سنگی در مخلوط های آسفالتی استفاده از مواد ضایعاتی به جای مصالح سنگی طبیعی می تواند در تولید آسفالت با هزینه کمتر کمک کند. به طور مثال در کارخانه زغال شویی البرز از آغاز فعالیت تاکنون در حدود ۱/۵ میلیون تن باطله در چندین هکتار زمین دپو شده است [۱] . در این کارخانه ها قسمت قابل اشتعال زغال سنگ جداسازی شده و بقیه ترکیبات بدون استفاده می ماند. مطالعاتی در زمینه استفاده از این مواد در صنعت صورت گرفته است اما همچنان میزان تولید این مواد بیشتر بوده و در صورت عدم استفاده یا با قیمت بسیار ناچیز به خارج از کشور صادر می گردند یا در طبیعت رها شده و فقط مقدار کمی از آن در برخی صنایع استفاده می گردد. در معادن زغال سنگ در طی استخراج برخی از مصالح استخراج شده دارای مقادیر کربن پایینی به نسبت بقیه بوده و میزان خاکستر بیشتری دارد که این گونه سنگ ها به منظور زغال شویی و سوخت صرفه ی مناسبی ندارد که از آن به عنوان باطله یاد می شود که می توان از آن ها به عنوان جایگزین مصالح سنگی در مخلوط آسفالتی مورد استفاده

قرار گیرد . همچنین روزانه در مصارف تجاری و خانگی مقادیر زیادی روغن مصرف می گردد که بخش زیادی از آن پس از یکبار مصرف قابلیت خود را از دست می دهد و نمی توان برای مصارف خوراکی و حتی صنعتی از آن استفاده کرد. با توجه به خاصیت جذب انرژی روغن و همچنین خاصیت خود ترمیمی مخلوط های آسفالتی می توان از روغن های ضایعاتی جهت بهبود خاصیت خود ترمیمی مخلوط های آسفالتی استفاده نمود . بنابراین در این پژوهش سعی شده است تا دو ماده افزودنی (باطله زغال سنگ و ضایعات روغن خوراکی) که در کشور ما تولید بسیاری نیز دارد و به لحاظ کاربردی از اهمیت بالایی برخوردار است ، در مخلوط آسفالتی استفاده گردد . امید است تا با به کارگیری این ضایعات باعث استفاده بهینه از این مواد و در نتیجه پیشرفت سطح کیفی راه های کشور شود .

۱-۳ فرض های پژوهش

مهم ترین فرض های این پژوهش به شرح زیر می باشد :

(۱) مصالح سنگی استفاده شده در نمونه به صورت یکنواخت و با خواص مشابه به کار گرفته شده است .

(۲) باطله های زغال سنگ اضافه شده در هر مخلوط ویژگی های یکسان دارند .

(۳) روغن ضایعاتی به طور کامل با میکسر سرعت بالا و به طور همگن با قیر مخلوط شده است .

(۴) اشعه ماکروویو به صورت یکنواخت به تمام سطوح نمونه تابیده و گرمایش ایجاد کرده است .

۱-۴ اهداف پژوهش

در این پژوهش اهداف ذیل دنبال شده است :

(۱) بررسی قابلیت خودترمیمی و حساسیت رطوبتی نمونه آسفالتی حاوی باطله زغال سنگ

(۲) بررسی قابلیت خودترمیمی و حساسیت رطوبتی نمونه آسفالتی با قیر حاوی ضایعات روغن

خوراکی

۳) بررسی افزودن درصد های مختلف از دو افزودنی (زغال سنگ و روغن) و یافتن ترکیب مناسب تر

۴) کاهش اثرات منفی صنعت راهسازی بر محیط زیست با استفاده از مواد ضایعاتی و بهبود خواص خود ترمیمی مخلوط های آسفالتی

۵) کاهش آلودگی ناشی از رهایی و دیو کردن ضایعات در طبیعت

۵-۱ روش تحقیق :

در این پژوهش با توجه به امکانات موجود در آزمایشگاه به منظور ساخت نمونه های آزمایشگاهی و انجام آزمایشات مورد نیاز طبق مراحل زیر عمل شده است :

- دانه بندی مصالح سنگی و مصالح ضایعاتی و جایگزینی آنان با نسبت های حجمی مشخص
- ساخت نمونه ی مارشال استوانه ای با درصد های قیر مختلف به منظور تعیین درصد قیر بهینه
- ساخت نمونه ی مارشال با درصد قیر بهینه برای نمونه ی شاهد و نمونه های حاوی افزودنی
- بدست آوردن مقاومت گسیختگی و مقاومت کششی غیر مستقیم نمونه ها و بررسی حساسیت رطوبتی

- برش نمونه های مارشال ساخته شده و تولید نمونه های نیم دایره ای scb
- انجام آزمایش خمش سه نقطه ای و بدست آوردن مقاومت خمشی
- قرار دادن نمونه ها در ماکروویو و ترمیم دادن آنان و تست مجدد آنان
- بدست آوردن نرخ ترمیم و دمای بهینه ی ترمیم و درصد بهینه ی افزودنی ها

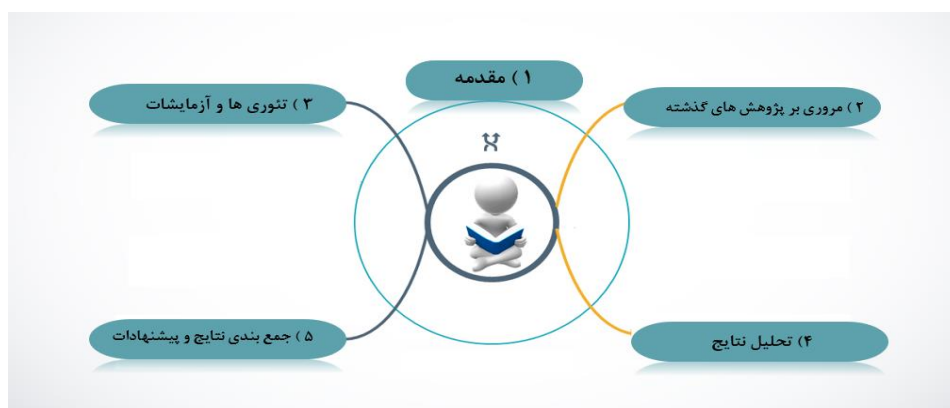
۶-۱ نوآوری

بازیافت و استفاده از مواد دور ریز یکی از مسایل حائز اهمیت در عصر کنونی می باشد و به همین منظور تاکنون استفاده هایی از باطله های زغال سنگ در تولید سیمان و یا به عنوان اصلاح کننده های بستر کاشت شده است . همچنین از ضایعات روغن در روانکاری و تغذیه دام به میزانی استفاده می گردد.

در بحث ترمیم آسفالت تا کنون از این دو افزودنی ضایعاتی که پتانسیل زیادی در گرمایش و ترمیم آسفالت دارند استفاده ای نشده است که با توجه به وسعت زیاد راه‌ها در هر کشوری می‌تواند بسیار مفید باشد که در این پژوهش برای نخستین بار امکان استفاده از این دو ضایعات بررسی شده است.

۷-۱ ساختار پژوهش

این پژوهش در پنج فصل تهیه گردیده که در شکل ۱-۲ به طور خلاصه شرح داده شده است. در فصل اول به مقدمات و ضرورت استفاده از باطله‌های زغال سنگ و روغن خوراکی اشاره شده است. در فصل دوم پژوهش‌هایی که در سال‌های گذشته و طی چند سال اخیر صورت گرفته و مرتبط با بحث خود ترمیمی و هم‌چنین ضایعات روغن و باطله ی زغال سنگ است پرداخته شده است. در فصل سوم به بیان مصالح مورد استفاده، آزمایشات و روش‌های مختلف پرداخته شده است. در فصل چهارم نتایج بدست آمده از آزمایشات مربوط به خود ترمیمی و حساسیت رطوبتی شرح داده شده و تفسیر شده است. جمع بندی نتایج و پیشنهاداتی برای پژوهش‌های آینده در فصل پنجم صورت گرفته است.



شکل ۱-۲ ساختار پایان نامه

فصل دوم

مبانی نظری و پیشینه پژوهش

۲-۱ مقدمه

در سال‌های اخیر نگرش زیست محیطی در پژوهش‌ها مورد توجه قرار گرفته و محققین سعی در این دارند تا با استفاده از کمترین منابع انرژی بهترین بهره‌وری را حاصل نمایند و به همین دلیل تاکنون تحقیقات زیادی در زمینه‌ی خود ترمیمی آسفالت در زمینه‌های آزمایشگاهی و میدانی صورت گرفته است. در این فصل تلاش شده است تا علاوه بر توضیح مختصری بر آسفالت‌های خود ترمیم شونده به مقالات و پژوهش‌های مهمی که در این زمینه کار شده و به جزئیات به خوبی اشاره کرده اند، بپردازیم تا با ماهیت این نوع آسفالت‌ها بیشتر آشنا شویم. در بررسی کارهای ما قبل سعی شده است تا پژوهش‌هایی مورد بررسی قرار گیرند که در برگیرنده‌ی مباحثی چون قابلیت ترمیم، انواع روش‌های گرمادهی، عوامل موثر بر ترمیم، افزودنی‌های استفاده شده، تجهیزات مورد نیاز آزمایش و استانداردها باشند. با توجه به پیشرفت‌های اقتصادی روزافزون در جامعه و نیاز به توسعه بیشتر حمل و نقل اهمیت وجود راه‌هایی استاندارد بیشتر از قبل مورد توجه قرار می‌گیرد. در این حین باید چارچوبی وجود داشته باشد تا این صنعت با حداقل کردن تاثیرات منفی خود بر روی محیط زیست به این مهم پاسخ مناسبی بدهد. در محیط زیست مجموعه‌ای از موجودات زنده و عوامل فیزیکی با هم در کنش هستند و از تاثیرشان بر یکدیگر نمی‌توان چشم پوشی نمود.

پایداری روسازی آسفالتی همیشه یکی از مسایل مهم بوده است. پژوهشگران به دنبال این هستند تا در صورت امکان هزینه‌های تولید و تعمیر و نگهداری را کاهش دهند و در مقابل عمر روسازی را افزایش دهند. استفاده از آسفالت‌های ترمیم شونده می‌تواند این ویژگی را برآورده نماید. اگرچه ممکن است در اضافه کردن برخی از افزودنی‌ها تولید این نوع آسفالت هزینه‌ی زیاد تری از آسفالت معمولی داشته باشد، اما عمر خدمت دهی زیاد آن می‌تواند هزینه کلی آسفالت جاده‌ها را کاهش دهد و سبب صرفه جویی اقتصادی گردد.

۲-۲ بررسی امکان استفاده از آسفالت خود ترمیم شونده در

ایران

مقاومت بیشتر آسفالت در برابر تغییر دما ، نیروهای وارده از طرف اتومبیل‌ها و کاهش گازهای گلخانه‌ای ، کاهش مصرف انرژی و همچنین کاهش آلودگی صوتی به دلیل ایجاد روسازی با سطحی صاف‌تر و بدون ترک از جمله مزایای آسفالت خود ترمیم شونده می‌باشد . در کشور ایران با توجه به پایین بودن عمر روسازی که گاه‌ها بین ۳ تا ۵ سال یعنی یک چهارم استاندارد جهانی می‌باشد و باعث خسارت ۴ هزار میلیاردی می‌گردد ، استفاده از این نوع آسفالت ، گزینه بسیار مناسبی می‌باشد [۲] .

۲-۳ مزایای زیست محیطی و اقتصادی تکنولوژی خود ترمیمی

برای ارزیابی دقیق کاهش هزینه‌ها که ناشی از به کار گیری مواد ترمیم کننده است باید میزان افزایش هزینه به منظور تولید آسفالت با قابلیت ترمیم را با میزان کاهش هزینه‌های نگهداری مقایسه کرد . انتظار می‌رود که با به کار گیری این نوع آسفالت دوره‌های بین تعمیر و نگهداری مربوط به روسازی گسترش پیدا کرده و طولانی‌تر شود که نتیجه آن کاهش ترافیک و هزینه‌ها را در بر دارد [۳].

به طور مثال هزینه‌های سالیانه مربوط به تعمیر و نگهداری روسازی‌های هلند برای دستیابی به ۲۵ درصد افزایش طول عمر روسازی حدود ۶۵ میلیون پوند می‌باشد و همچنین برای دستیابی به افزایش عمر ۵۰ درصدی برابر ۱۰۰ میلیون پوند می‌باشد ، با این وجود اگر هزینه تولید آسفالت خود ترمیم شونده دو برابر آسفالت معمولی باشد سالیانه در حدود ۹۰ میلیون پوند برای افزایش عمر ۵۰ درصدی روسازی‌های کشور هلند صرفه جویی می‌گردد و این در حالی است که هلند یک کشور نسبتاً کوچک بوده و میزان تولید آسفالت در این کشور تنها ۳ درصد از کل آسفالت تولیدی اروپا می‌باشد . اگر این میزان صرفه جویی به کل اروپا با همین منوال بسط داده شود در حدود ۹ میلیارد پوند سالیانه صرفه جویی اقتصادی صورت می‌گیرد [۴] . این آمارها مزایای مالی و اقتصادی این روش را بیان می‌کند حال

آنکه برای درک کامل مزیت این روش نسبت به روش معمولی باید جنبه‌های مالی، زیست محیطی و اجتماعی در یک چرخه کامل از عمر روسازی نیز مورد بررسی قرار گیرد.

پژوهشگرانی تاثیر ترمیم شونده‌گی، میزان انرژی و مسایل زیست محیطی را بررسی کرده‌اند و با آنالیز دوره عمر روسازی (LCA)^۱ اقدام به مدل سازی عددی برای بررسی قابلیت‌های خود ترمیمی کرده‌اند و ایشان اشاره کردند که استفاده از آسفالت خود ترمیم شونده می‌تواند باعث افزایش عمر روسازی به میزان ۱۰ درصد شود یعنی از ۲۰ سال به ۲۲ سال افزایش یابد. این افزایش عمر روسازی سبب کاهش مصرف انرژی به میزان ۳ درصد و همچنین کاهش تولید گاز کربنیک به میزان ۳ درصد معادل ۱/۵ تن گردد. اگر افزایش عمر روسازی با توجه به برخی پژوهش‌ها به ۱۰۰ درصد برسد و ترمیم کامل صورت گیرد عمر روسازی از ۲۰ سال به ۴۰ سال افزایش پیدا کرده و سبب کاهش تولید قابل ملاحظه‌ی گاز کربنیک می‌گردد. به دلیل افزایش هزینه ابتدایی تولید در تولید آسفالت به روش خود ترمیمی و کاهش هزینه‌ها در طول دوره‌ی عمر آن که توجه کمتری به آن می‌گردد، نیازمند حمایت دولت‌ها برای اثبات شدن این روش و به کار گیری آن می‌باشد [۵].

۲-۴ روش ترمیم و تامین گرمایش

به منظور رخ دادن فرآیند خود ترمیمی لازم است تا با روشی قیر موجود در مخلوط به حالت روان درآمده تا بتواند فضاهای خالی و ترک‌ها را پر کند تا موجب ترمیم مخلوط و بهبود دادن خواص مکانیکی آن گردد. به این منظور تاکنون از روش‌هایی نظیر گرمایش با شعله، گرمایش القائی، گرمایش ماکروویو، گرمایش مادون قرمز و استفاده از میکرو کپسول‌ها استفاده شده است که هر یک مزایا و معایب خاص خودش را دارا می‌باشد.

^۱ life cycle analysis

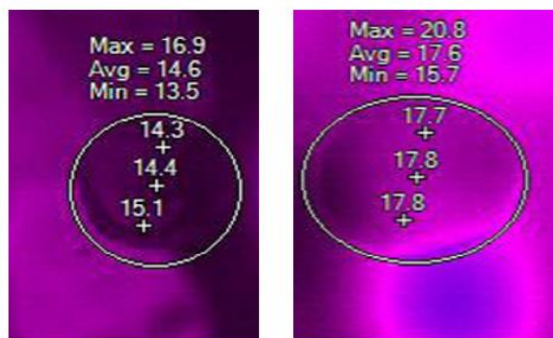
۲-۴-۱ گرمایش ماکروویو و القائی

آقای سان و همکاران در سال ۲۰۱۷ از دو نوع افزودنی (الیاف فلز و سرباره کوره آهن گدازی) استفاده کردند و با دو نوع گرمایش (ماکروویو و القائی) به مقایسه‌ی ترمیم شونده‌ی و میزان گرمایش این دو روش پرداختند . در این پژوهش هر یک از نمونه‌های آسفالتی معمولی با قیر خالص ، با سنگدانه سرباره و نمونه حاوی الیاف فلزی به مدت ۱۲۰ ثانیه تحت امواج ماکروویو و تحت جریان القا قرار گرفتند و پارامترهای حرارتی این سه نوع مخلوط اندازه گیری شد که با توجه به نتایج حاصله در جدول ۲-۱ ظرفیت گرمایی ویژه نمونه حاوی اسلگ برابر $1/56 \text{ (Mj/m}^3\text{K)}$ بدست آمده است که این به دلیل وجود حفراتی کوچک در سنگدانه‌های سرباره می‌باشد و باعث می‌شود نسبت به مخلوط حاوی الیاف فلزی انرژی بیشتری را جذب کند تا دمای آن یک درجه سانتی گراد افزایش پیدا کند . اگرچه پارامترهای گرمایی این سه نوع از مخلوط‌های آسفالتی متفاوت بودند ، اما تفاوت نتایج ناچیز می‌باشد .

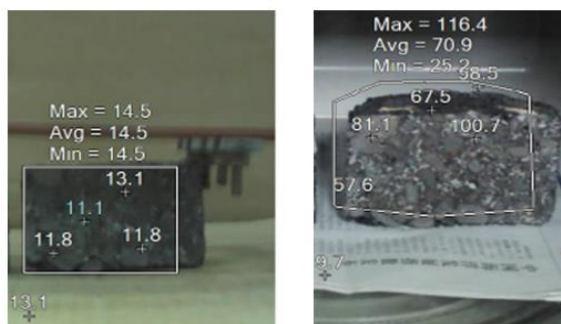
جدول ۲-۱ مقایسه مشخصات حرارتی مخلوط اصلاح شده با الیاف فلز با مخلوط حاوی سرباره [۶]

نوع مخلوط	رسانش گرمایی	نفوذ پذیری حرارتی	گرمای ویژه
	W/mK	mm ² /s	MJ/m ³ K
مخلوط آسفالتی معمولی	1.657	0.9349	1.772
مخلوط اصلاح شده با الیاف فلز	1.747	1.240	1.409
مخلوط حاوی سرباره	1.450	0.931	1.560

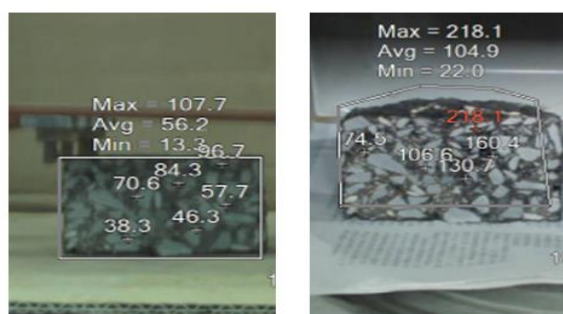
با مقایسه گرمایش این دو نوع مخلوط طبق شکل ۲-۲ مشخص شد که نمونه‌ی شاهد در روش ماکروویو به دمای ۱۷ درجه سانتی گراد در عرض ۵ ثانیه رسید و در روش القا دمای ۱۴ درجه در ۱۲۰ ثانیه اندازه‌گیری شد .



شکل ۲-۲ میزان گرمایش نمونه حاوی سرباره (سمت راست) و نمونه معمولی (سمت چپ) [۶]



شکل ۲-۳ گرمایش نمونه حاوی سرباره تحت امواج ماکروویو (سمت راست) با القا (سمت چپ)



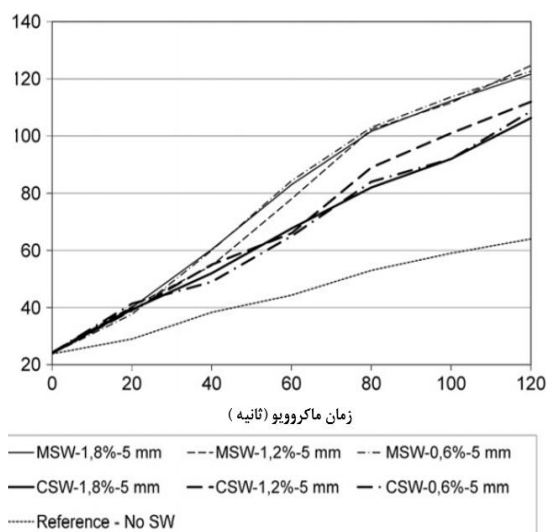
شکل ۲-۴ گرمایش مخلوط حاوی الیاف فلز تحت ماکروویو (سمت راست) با القا (سمت

همان طور که در شکل ۲-۳ که حاصل از عکس برداری با دوربین حرارتی است مشاهده می‌گردد نمونه حاوی سرباره در زمان برابر (۱۲۰ ثانیه) در ماکروویو به ۷۰ درجه سانتی گراد و تحت القا فقط دمایی برابر ۱۴ درجه سانتی گراد داشت .

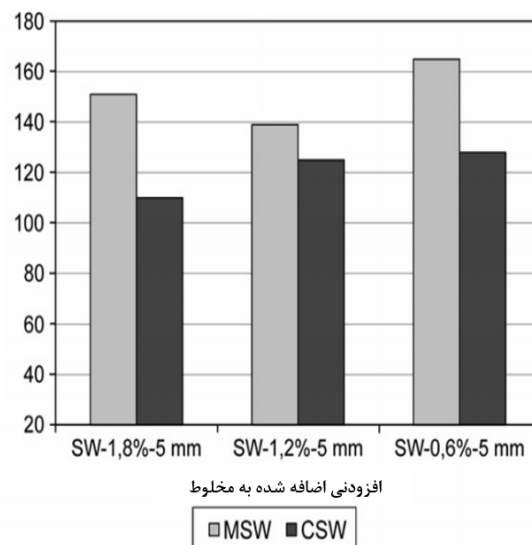
همچنین طبق شکل ۲-۴ نمونه ی حاوی فیبر فلز در زمان برابر در ماکروویو به ۱۰۴ درجه و تحت القا به ۵۶ درجه سانتی گراد رسید .

از نتایج فوق می توان دریافت که با توجه به اینکه اکثر راه های موجود سنگدانه های معمولی نظیر آهکی دارند که حاوی افزودنی فلزی رسانا نیستند ، پس استفاده از ماکروویو با توجه به فراگیر تر بودن که می تواند اجسام غیر فلزی را نیز گرم کند و همچنین گرمایش بهینه تری را در زمان برابر به ارمغان بیاورد مناسب تر است [۶] .

آقای گالئو و همکاران در سال ۲۰۱۳ در پژوهش خود به این نتیجه رسیدند که برای رسیدن به یک نتیجه ترمیم برابر ، استفاده از ماکروویو انرژی الکتریکی بسیار کمتری نسبت به روش القا مصرف می کند طوریکه برای گرم کردن یک نمونه تا یک دمای مشخص و با مقدار برابر افزودنی سیم فلزی یک ماکروویو ۱۲۰۰ وات لازم است . این درحالی است که این عمل برای انجام شدن به یک دستگاه القایی ۵۰۰۰ وات نیازمند است. در این پژوهش دو نوع نمونه آماده گشت ، که در یکی سیم های فلزی با طول ۵ میلی متر و در دیگری با طول ۱۰ میلی متر استفاده شد . نتایج نشان داد که سیم های فلزی با طول بزرگتر گرمایش بهتری از خود نشان دادند . هم چنین از دو نوع سیم با قطر مختلف نیز استفاده شد که یکی با ضخامت درشت (CSW) یعنی حدود ۰/۱ میلی متر و یکی با ضخامت متوسط (MSW) یعنی در حد ۰/۰۵ میلی متر بود . نتایج طبق شکل ۲-۵ نشان داد که سیم های با قطر متوسط گرمایش بهتری از خود نشان دادند . نمودار های گرمایش نمونه ها به مدت ۱۲۰ ثانیه (هر ۲۰ ثانیه دما ثبت شده است) تحت امواج ماکروویو برای نمونه ی حاوی سیم با طول ۵ میلی متر به شرح زیر بوده است که همانطور که در شکل ۲-۶ دیده می شود مقدار ۰/۶ درصد سیم با قطر متوسط نتیجه بهتری داشت.

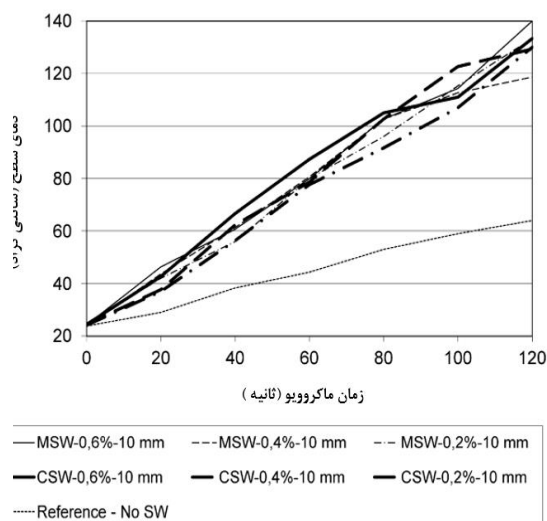


شکل ۲-۶ گرمایش تحت ماکروویو برای
سیم های با قطر مختلف و طول ۵ میلی
متر با درصد های مختلف [۷]



شکل ۲-۵ گرمایش سیم ها با قطر ۰/۱
میلی متر (مشکی) و قطر ۰/۰۵ میلی متر
(خاکستری) [۷]

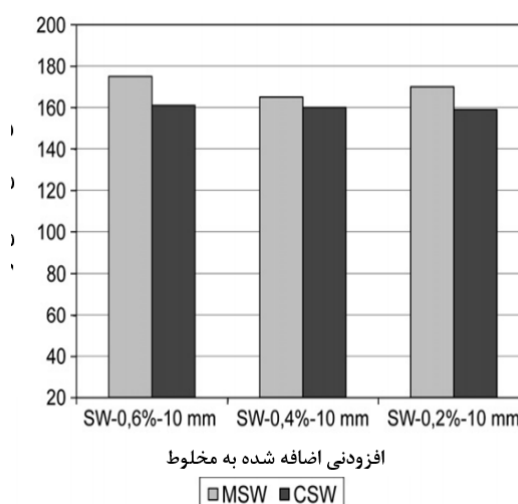
نمودارهای گرمایش برای نمونه های حاوی سیم با قطر ۱۰ میلی متر مانند سیم های با قطر ۵ میلی متر طبق شکل ۲-۷ برای نمونه هایی که سیم هایی با قطر متوسط داشتند گرمایش بهتری را نشان داد . همچنین همانطور که در شکل ۲-۸ مشاهده می شود با افزودن ۰/۶ و ۰/۴ درصد از این افزودنی ها نتیجه بهتری را به لحاظ گرمایش نشان دادند .



شكل ۲-۸ گرمایش تحت ماكرويو برای

سیم های با قطر مختلف و طول ۵ میلی

متر با درصد های مختلف [۷]



شكل ۲-۷ گرمایش سیم ها با قطر ۰/۱ میلی

متر (مشکی) و ۰/۰۵ میلی متر

(خاکستری) با طول ۱۰ میلی متر [۷]

برای اندازه گیری دمای سطحی نمونه از دماسنج لیزری و برای اندازه گیری دمای داخل نمونه از

یک دماسنج الکترونیکی و با ایجاد حفره ای در نمونه این عمل صورت گرفت . [۷]

در ماکروویو عمل گرمایش می تواند بر ترکیبات قطبی و هم چنین از طریق هدایت یونی صورت گیرد علاوه بر آن از یک راه دیگر که به آن اتلاف مغناطیس^۱ می گویند می تواند صورت گیرد که باعث گرمایش برخی مواد نظیر اکسید های فلزات می گردد . در این باره آقای کاتوکی و همکاران چند اکسید فلز ($\text{Fe}_2\text{O}_3\text{-Li}_2\text{O-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$) را مورد بررسی قرار دادند و به این نتیجه رسیدند که این اکسید ها می توانند به خوبی در ماکروویو گرم شوند . همچنین فوم ها و صفحاتی که از اکسید آهن Fe_3O_4 ساخته شده بودند به سرعت در ماکروویو گرم شده و قابلیت نگهداری انرژی گرمایی بالایی دارند [۸] .

^۱ magnetic loss

با توجه به اینکه ماکروویو می‌تواند گستره‌ی زیاد تری از مصالح را گرم کند ، باید مصالح سنگدانه مورد پژوهش به گونه‌ای انتخاب شوند تا خیلی تحت تاثیر امواج ماکروویو قرار نگرفته و سبب افزایش دمای آنان نشود و در نتیجه تاثیر افزودنی های مخلوط شده به طور مشخص قابل ملاحظه باشد . آقای تریگوس و همکاران در پژوهش خود از چند نوع سنگدانه ، سربازه کوره ذوب (BFS) ، آهکی (CA) ، دولومیت (DOL) ، سنگ دگرگونی کوارتزیت (QRT) ، مرمر (OPH) ، اندزیت (AND) استفاده کردند و آنان را تحت امواج ماکروویو قرار دادند .

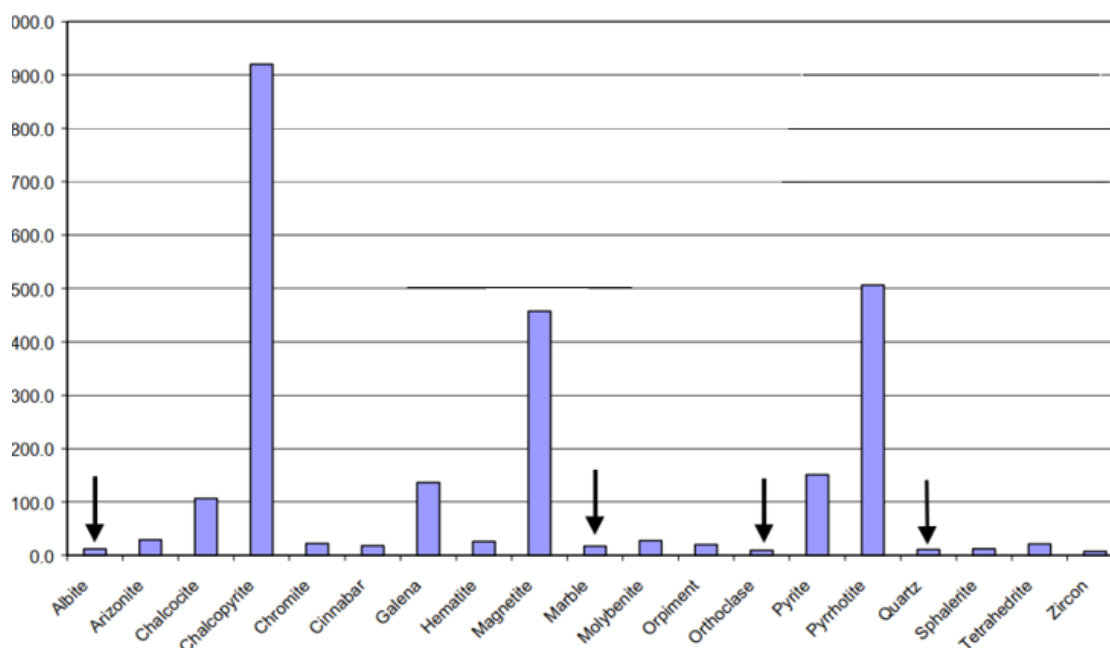
همانطور که در جدول ۲-۲ مشاهده می‌شود در این بین سنگدانه‌ی آهکی تاثیر بسیار کمی تحت امواج داشت و دمای آنان افزایش ناچیزی داشت که در عرض ۱۲۰ ثانیه تحت امواج ، افزایش دمایی از ۲۰ درجه به ۳۷ درجه را تجربه کرد ، حال آنکه در زمان ۸۰ ثانیه سنگدانه هایی نظیر بازالت و اسلگ دمایی بیشتر از ۱۴۵ درجه را تجربه کردند [۹] .

جدول ۲-۲ میزان دمای سنگ های مختلف تحت امواج ماکروویو [۹]

نمونه	زمان (ثانیه)						
	۰	۲۰	۴۰	۶۰	۸۰	۱۰۰	۱۲۰
BFS	۲۲/۵	۷۵/۳	۱۲۶/۶	۱۴۵/۵			
CA	۲۲/۳	۲۸/۳	۳۱/۴	۳۴/۵	۳۷/۲	۳۸/۵	۴۰/۶
DOI	۲۲	۳۵/۲	۴۳/۵	۵۳/۷	۶۱/۳	۶۸/۵	۷۶/۳
QRT	۲۲/۲	۲۹/۵	۳۲/۵	۳۶/۱	۳۹/۱	۴۱/۷	۴۵/۸
OPH	۲۲/۳	۴۳/۵	۶۳/۴	۸۳/۶	۹۷/۵	۱۱۲/۶	۱۲۲/۱
AND	۲۲/۲	۴۲/۳	۶۸	۸۸/۶	۱۰۸/۹	۱۱۱/۴	

برای ساخت آسفالتی با قابلیت خود ترمیمی باید نوعی سنگدانه یا افزودنی در آن به کار ببریم تا قابلیت گرم شدن در زمانی کوتاه‌تر را داشته باشد و گران قیمت نباشد . آقای هاپستوک در پژوهش خود طیف وسیعی از پارامترها و ویژگی‌هایی که مرتبط با جذب انرژی ماکروویو است را بررسی کرده است و به بررسی مصالح مختلف زیادی پرداخته است . نمودار دمایی هر یک از مصالح استفاده شده به

شرح شکل ۲-۱۰ می باشد که در بین آنان کالکوپیریت^۱، پیروتیت^۲، مگنتیت^۳ و پیریت^۴ بیشترین گرما را در زمان مشخص تحت امواج ماکروویو حاصل کرده است به طوری که کالکوپیریت در زمان یک دقیقه دمایی بیشتر از ۹۰۰ درجه را تجربه کرده است [۱۰].



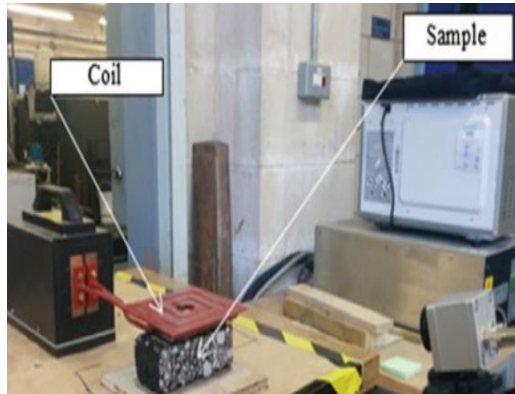
شکل ۲-۱۰ مقایسه گرمایش مواد مختلف تحت امواج ماکروویو [۱۰]

۲-۴-۲ گرمایش فروسرخ

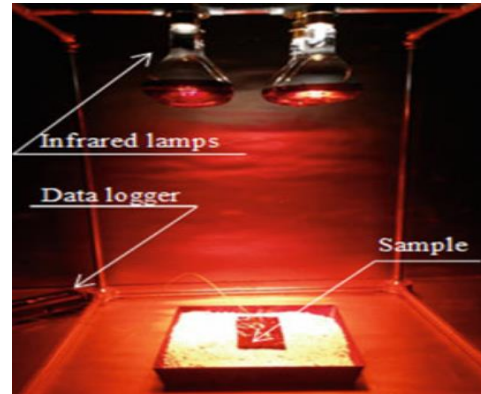
ترک‌های موجود در مخلوط آسفالت می‌توانند در صورتی که زمان استراحت کافی (ساعت‌ها و یا چند روز) داشته باشند ، ترمیم یابند . این پدیده وابسته به ویسکوزیته است که می‌تواند با افزایش دمای مخلوط آسفالت تسریع شود . در پژوهش آقای عجم و همکاران ، ترمیم مخلوط آسفالتی با استفاده

۱ chalcopyrite
 ۲ pyrrhotite
 ۳ magnetite
 ۴ pyrite

از گرمایش مادون قرمز به منظور شبیه سازی اشعه طبیعی خورشید صورت گرفته شده (شکل ۲-۱۱) و گرمایش القایی توسط دستگاه القایی که در شکل ۲-۱۲ مشاهده می شود و یک روش برای افزایش دمای آسفالت می باشد به لحاظ زمان و دمای ترمیم با این روش مقایسه شده است .



شکل ۲-۱۲ دستگاه کوره القایی [۱۱]



شکل ۲-۱۱ شبیه سازی نور خورشید با

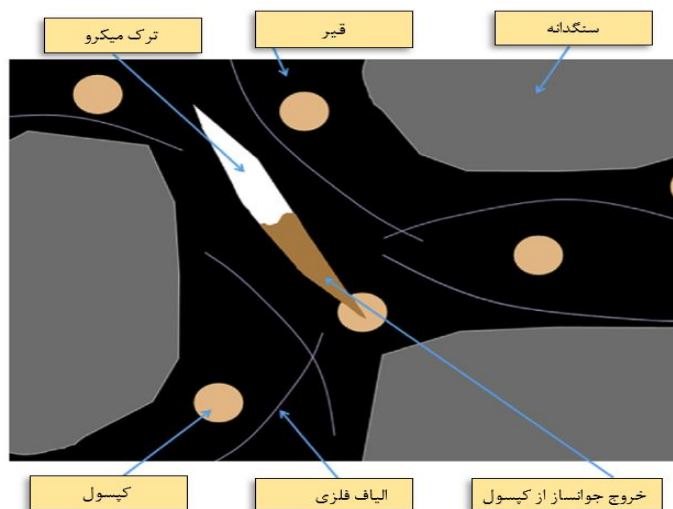
مادون قرمز [۱۱]

نتایج نشان داد که هر دو روش به نرخ های ترمیم مشابه و رضایت بخش در حدود ۹۰٪ رسیدند. با این حال ، گرمایش القایی کارایی بیشتری دارد ، زیرا تاثیر آن روی قیر متمرکز است و به جای گرم کردن کل مخلوط تنها قیر را هدف قرار می دهد . در این مقاله با استفاده از افزودن ۱۱ درصد سنگدانه ی فلزی بر اساس وزن کل سنگدانه ها به این نتیجه رسیدند که اگر چه هر دو روش می تواند نمونه را به دمای مورد نیاز ترمیم برساند اما در روش فروسرخ زمان بیشتری باید سپری گردد که درواقع یعنی انرژی بیشتری را صرف می کند تا به دما و در نتیجه ترمیم برابر در روش القا برسد . [۱۱]

۲-۴-۳ استفاده از میکروکپسول ها در ترمیم

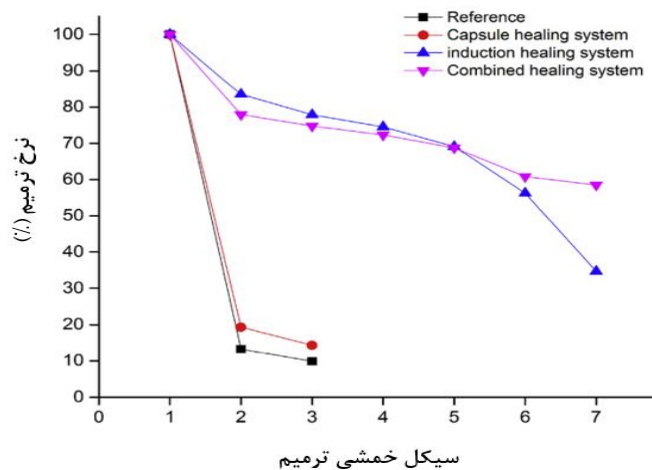
میکروکپسول ها نوعی دیگر از ابزار هایی هستند که باعث فرآیند خود ترمیمی می شوند طوری که با رخ دادن ترک این کپسول ها شروع به آزاد سازی محتوی داخل خود می کنند و باعث روان شدن قیر و ترمیم ترک می شوند نکته ای که حائز اهمیت است اینست که این کپسول ها تنها یک بار قابلیت ترمیم دارند . نحوه ی قرار گیری این کپسول ها در بین مخلوط آسفالتی را می توان در شکل ۲-۱۳

مشاهده کرد. آقای سو و همکاران در پژوهش خود از نوعی کپسول جوان ساز (کلسیم آلژینات) و هم چنین الیاف فلزی به منظور گرم شدن نمونه تحت القای الکتریکی استفاده کردند و میزان ترمیم را در ترکیب این دو با هم بررسی کردند. ترکیب این دو با توجه به اینکه القا با گرمایش باعث روان شدن قیر و کپسول ها باعث نرم شدن قیر پیر شده شود می تواند مفید واقع گردد.



شکل ۲-۱۳ حضور کپسول در بین مخلوط آسفالتی [۱۲]

در این بررسی همانطور که در شکل ۲-۱۴ دیده می شود، نمونه ای که تنها با کپسول جوان ساز ساخته شده بود توانست یک بار و آن هم حدود ۲۰ درصد ترمیم شود اما نمونه ای که با فیبر فلز ساخته شده بود و تحت القا قرار گرفته بود توانست تا ۴ سیکل ترمیمی برابر ۸۰ درصد نشان دهد و پس از آن به جهت پیر شدگی دچار نزول با شیب تند در مقاومت شود. علاوه بر این نمونه ای که از ترکیب فیبر فلز و کپسول جوانساز ساخته شده بود توانست تا سیکل هفتم ترمیم قابل قبولی از خود نشان دهد طوری که تا سیکل چهارم حدود ۸۰ درصد و پس از آن به دلیل وجود کپسول های جوان ساز و جلوگیری از پیر شدگی زیاد قیر با یک افت ناچیز در حدود ۶۰ درصد ترمیم شدند [۱۲].

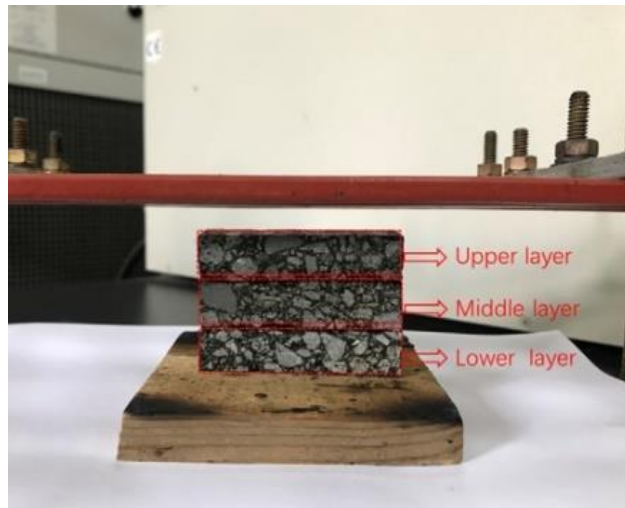


شکل ۲-۱۴ مقایسه استفاده از کپسول و القا جهت ترمیم و محاسبه نرخ ترمیم در هر

سیکل [۱۲]

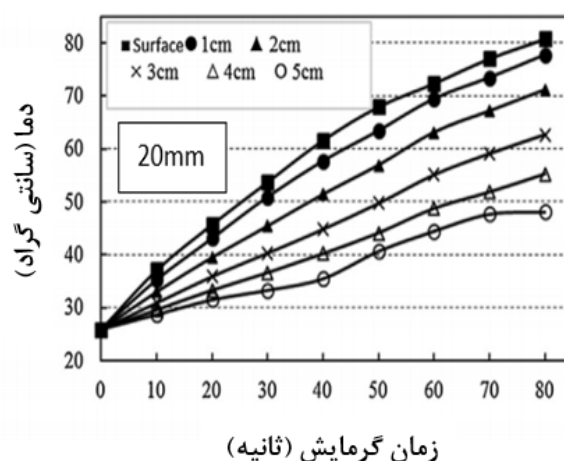
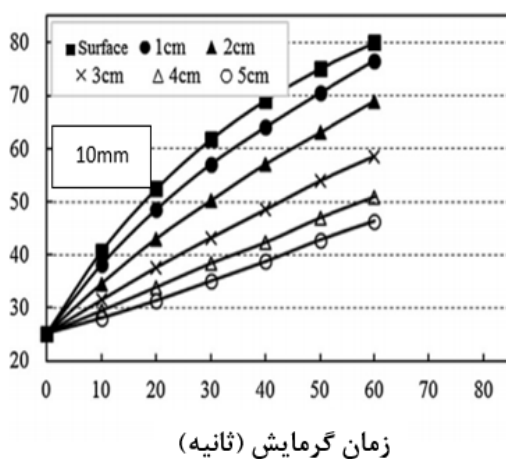
۲-۵ دمای بهینه برای ترمیم

به منظور رخ دادن فرآیند خود ترمیمی نیازمند است تا قیر روان شده و در بین منافذ و ترک ها جاری شود و برای تحقق این عمل لازم است تا با توجه به درجه نفوذ قیر به یک دمای مشخص برسد . آقای لی و همکاران در پژوهش خود از قیر ۶۰/۷۰ استفاده کردند و افزودند دمای بهینه برای رسیدن به بهترین نرخ ترمیم دمایی کمتر از ۱۰۰ درجه می باشد و گرم شدن بیشتر از این مقدار باعث تخریب مشخصات فیزیکی مخلوط می گردد . هم چنین اشاره کردند حداقل دمای لازم برای رخ دادن ترمیم دمایی در حوالی نقطه نرمی است که برای این قیر حدود ۴۷/۵ درجه سانتی گراد می باشد . در این پژوهش از یک دستگاه القائی ۸۳۰۰ وات و فرکانس ۱۲۳ کیلوهرتز استفاده شده است که در شکل ۲-۱۵ مشاهده می شود ، البته قدرت مورد نیاز دستگاه به اندازه ی نمونه و میزان رسانایی آن بستگی دارد . فاصله ی بین هسته ی دستگاه القائی و سطح نمونه تاثیر زیادی در میزان گرمایش دارد طوری که در دمای ۲۵ درجه نمونه با فاصله ی ۵ سانتی متر به دمای ۴۴ درجه سانتی گراد رسید اما با همان زمان برابر و با فاصله ی ۱ سانتی متر به دمای ۷۵ درجه سانتی گراد رسید .



شکل ۲-۱۵ دستگاه القائی و قرارگیری دال در زیر آن [۱۳]

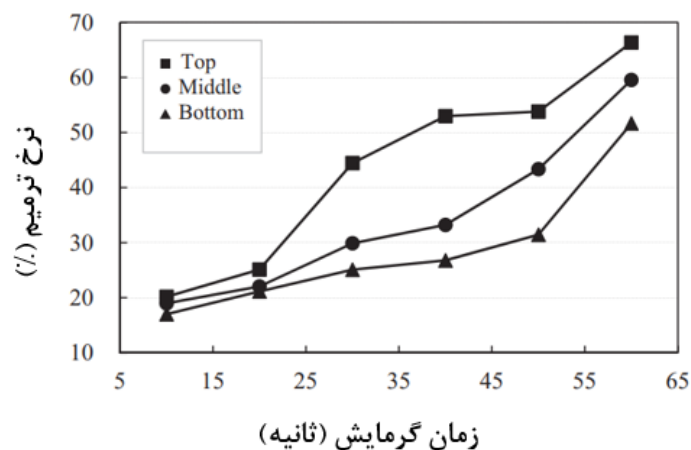
نتایج گرمادهی نمونه‌ها توسط دستگاه با دو فاصله متفاوت از کویل القائی (۱۰ و ۲۰ میلیمتر) و در اعماق متفاوت نمونه اندازه‌گیری شده است. با توجه به نمودار دمایی که در شکل ۲-۱۴ آمده است در هر دو فاصله دمای سطح نمونه نسبت به عمق آن بیشتر است و با افزایش فاصله نمونه از کویل القائی (۲۰ میلی‌متر)، نمونه در زمان بیشتری (۸۰ ثانیه) به دمای ۸۰ درجه سانتی‌گراد رسید درحالی‌که در فاصله‌ی ۱۰ میلی‌متری نمونه و کویل این دما در ۶۰ ثانیه حاصل شد.



شکل ۲-۱۴ مقایسه دما بر حسب زمان در اعماق مختلف نمونه با دو فاصله مختلف از کویل

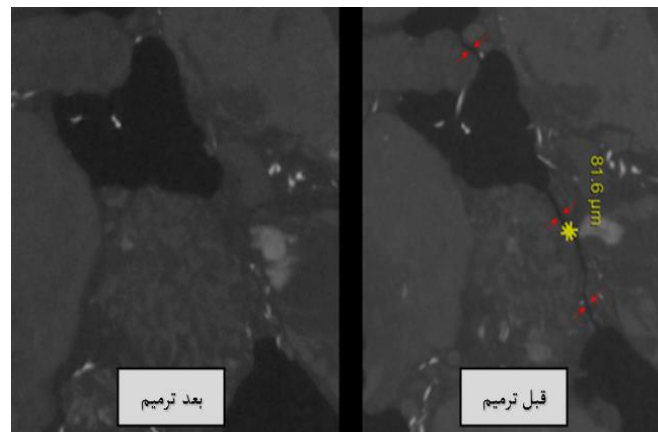
القائی [۱۳]

هم چنین یک تیر آسفالتی را با توجه به عمق به سه قسمت بالا ، پایین و وسط تقسیم کردند و ترمیم هر یک از این قسمت ها را پس از گرما دهی در مدت زمان برابر توسط عکس برداری اشعه ایکس بررسی کردند. بر طبق نتایج که در شکل ۲-۱۵ دیده می شود قسمت بالایی نمونه که نزدیک تر به کویل القائی بود ترمیم بهتری از خود نشان داد زیرا با بالا رفتن دما قیر روان شده و ترک ها را پر کرده است .



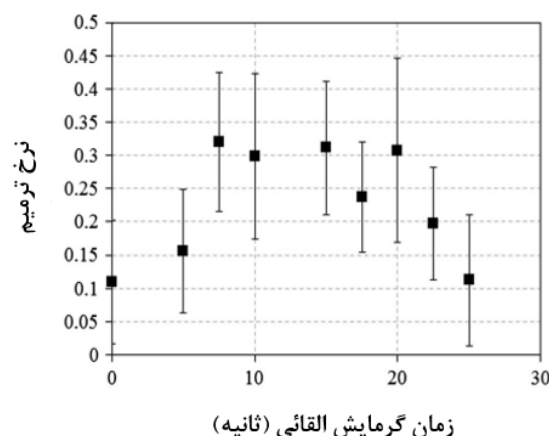
شکل ۲-۱۵ نرخ ترمیم بر حسب زمان در اعماق مختلف یک نمونه [۱۳]

در عکس های گرفته شده توسط اشعه ایکس با توجه به عرض ترک و پردازش این تصاویر میزان ترمیم اندازه گیری می شود به طوری که قبل از ترمیم ترک ها با رنگ مشکی دیده می شوند اما بعد از ترمیم ترک ها بسته شده و این خطوط مشکی به رنگ خاکستری مانند بقیه نمونه دیده می شوند. نمونه ای از این عکس ها که در پژوهش فوق استفاده شده است در شکل ۲-۱۶ نشان داده شده است که می توان در پژوهش های خود ترمیمی به عنوان ابزاری برای بررسی ترمیم استفاده نمود [۱۳] .



شکل ۲-۱۶ عکسبرداری با اشعه ایکس و بررسی ترمیم [۱۳]

قبل از سال ۲۰۱۵ از دستگاه القائی به منظور ترمیم دو قطعه آسفالتی جدا شده به صورت کامل استفاده شده بود ولی به منظور ترمیم میکرو ترک‌های ناشی از خستگی به کار گرفته نشده بود آقای منوزی و همکاران در پژوهش خود دمای مورد نیاز برای ترمیم یافتن ترک‌های ناشی از خستگی را یافتند. ایشان در این پژوهش از قیر ۷۰/۱۰۰ و مصالح بازالتی و فیلر آهکی و برای گرمایش از مقداری فلز استفاده کردند، سپس با ساخت نمونه‌های دالی شکل آزمایش خستگی را انجام دادند. پس از ۲۸۲۶ سیکل اقدام به گرمادهی با دستگاه القائی کردند و نمونه را در فاصله ۲ سانتی متری از کویل دستگاه قرار دادند. همانطور که در شکل ۲-۱۷ مشاهده می‌شود در این مقاله نتیجه شد، اگر از القا به منظور ترمیم استفاده نشود تنها ۱۱ درصد ترمیم رخ می‌دهد ولی با استفاده از دستگاه القائی و گرمادهی به مدت ۸ ثانیه این میزان با رسیدن نمونه به دمای ۵۵ درجه سانتی گراد به ۳۰ درصد افزایش یافت.

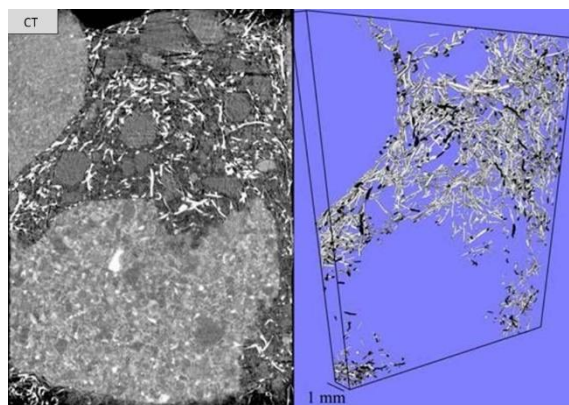


شکل ۲-۱۷ میزان ترمیم عمر خستگی توسط القا [۱۴]

میزان نرخ ترمیم در برخی مقالات تا ۱۰۰ درصد هم رسیده است و نرخ ترمیم ۳۰ درصد در این پژوهش به این دلیل کمتر است که نوع آزمایش به منظور بررسی ترمیم متفاوت است، یعنی در مقالاتی که ترمیم ۱۰۰ درصد گزارش شده است ترمیم نمونه را تحت خمش سه نقطه ای بررسی کرده اند حال آنکه در این پژوهش ترمیم ترک‌های خستگی بررسی شده است. برای این مورد با ساخت نمونه برای آزمایش مقاومت شکست تحت خمش سه نقطه‌ای و بررسی ترمیم آن اقدام شد و نتیجه شد که دمای ۸۵ درجه سانتی گراد دمای بهینه ترمیم این نمونه می‌باشد و باعث رسیدن نرخ ترمیم به میزان ۸۰ درصد شد، طوری که دماهای بالاتر و پایین تر سبب کاهش نرخ ترمیم و رسیدن به ترمیم زیر ۸۰ درصد شدند. هم چنین افزودن میزان تخریب و عرض ترک نمونه‌ها باید به گونه‌ای باشد که تغییر شکل های دائمی و خیلی بزرگی نداشته باشد تا ترمیم در آن اتفاق بیفتد [۱۴].

آقای لیو و همکاران از تراشه‌های فلزی در مخلوط استفاده کرده و گرمایش القائی را به منظور تولید گرما برگزیدند و قیر با درجه نفوذ ۷۰/۱۰۰ را به میزان ۵/۲ درصد برای ساخت نمونه انتخاب کردند. به منظور تامین افزودنی لازم برای گرم شدن تحت القا ۴ درصد (بر اساس حجم قیر) سیم فلزی با طول های تقریبی یک سانتی متر به مخلوط افزودند. برای اطمینان از جمع نشدن انبوه سیم های فلزی در یک قسمت از نمونه به کمک عکس برداری با اشعه ایکس می توان تجمع آنان را بررسی کرد که با توجه

به این نوع عکس باید بررسی کرد تا جمع شدگی افزودنی رخ نداده و به صورت نسبتاً همگن توزیع شده باشد. همان طور که در شکل ۱۸-۲ مشاهده می‌شود نمونه با رنگ آبی دیده می‌شود که سیم‌های فلزی به شکل خطوط سفید رنگ دیده می‌شوند.



شکل ۱۸-۲ بررسی توزیع افزودنی فلزی توسط عکس برداری با اشعه ایکس [۱۵]

به منظور بررسی تاثیر گرمایش القائی در ترمیم شوندگی تیر آسفالتی نمونه‌ها تحت دماهای مختلف ۳۰، ۵۰، ۷۰، ۸۵ و ۱۰۰ درجه سانتی گراد گرم شدند تا در دماهای مختلف میزان ترمیم متناظر با آن دما بررسی گردد. دمای بهینه در این پژوهش برای این قیر ۸۵ درجه سانتی گراد بوده است و با افزایش دما و رسیدن به ۱۰۰ درجه سانتی گراد نرخ ترمیم به میزان ۱۰ درصد کاهش یافته است زیرا باعث روانی بیش از حد قیر و خرابی نمونه می‌گردد. نرخ ترمیم توسط دمای ۸۵ درجه و گرمایش القائی حداکثر به میزان ۷۸ درصد رسید. نرسیدن نرخ ترمیم به میزان ۱۰۰ درصد و به عبارتی عدم ترمیم کامل نمونه و احیای مقاومت اولیه همان طور که در شکل ۱۹-۲ مشاهده می‌شود به این خاطر است که در حین تست خمش نمونه برخی از سنگدانه‌ها دچار شکستگی شدند و همچنین گرمایش القائی، قسمت‌های سطحی نمونه را نسبت به اعماق پایین تر نمونه بیشتر تحت تاثیر قرار می‌دهند [۱۵].



شکل ۲-۱۹ شکستگی سنگدانه بعد از آزمون خمشی [۱۶]

در طول گرمایش القایی ، مخلوط حاوی ذرات رسانا در معرض یک میدان مغناطیسی متناوب با فرکانس بالا قرار دارند . الیاف فلزی توسط جریان گردابی القا کننده حرارت می یابند و این حرارت را به قیر منتقل می کنند و باعث می شود آسفالت ترمیم شود زیرا قیر در زمانی که دمایش بالاتر از نقطه نرمی آن باشد مثل یک سیال نیوتونی عمل می نماید . به طور معمول برای ساخت آسفالت با قابلیت گرم شدن تحت القا یک نوع الیاف فلزی به مخلوط به طور مستقیم و بدون تغییر در دانه بندی اضافه می شود .

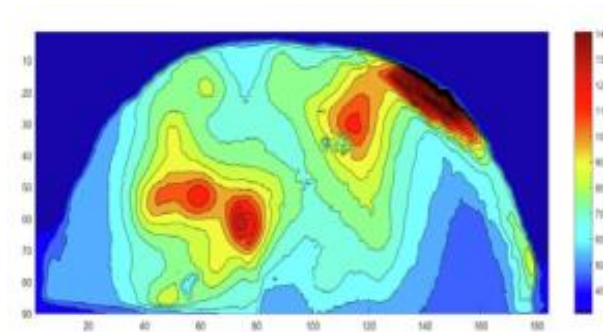
آقای سو و همکاران در سال ۲۰۱۸ در بررسی که روی ترمیم نمونه حاوی الیاف فلزی تحت گرمایش القایی انجام دادند بیان کردند که میانگین نیمه‌ی بالایی نمونه برابر ۷۲ و میانگین نیمه‌ی پایینی حدود ۳۹ درجه (ارتفاع نمونه ۸۰ میلی متر) و این به دلیل اختلاف فاصله آنها نسبت به میدان کوره‌ی القایی می‌باشد که هر چه جریان بر قسمت فلزی و رسانای نمونه بیشتر اثر کند و نزدیک تر باشد دمای آن بالاتر می رود . این یعنی تنها ۵۵ درصد نمونه که دمایشان از نقطه نرمی قیر بالاتر بود فرآیند ترمیم در آن ها اتفاق افتاد و بقیه نمونه با ترمیم کمتر یا بدون ترمیم باقی ماند . هم چنین تغییر نرخ افزایش دما در عمق نمونه با افزایش مدت زمان القا بیشتر می شود یعنی هر چه نمونه زمان بیشتری را تحت القا قرار گیرد اختلاف دما در قسمت بالایی (نزدیک جریان القا) و پایین نمونه بیشتر می شود که می‌توان نتایج دمایی را برای نمونه در زمان‌های مختلف مشاهده نمود .

دمای نقطه نرمی (برای قیر مورد مطالعه ۴۷/۵ درجه سانتی گراد) می تواند یک دمای مناسب برای ترمیم محسوب شود و عمقی از نمونه که به این دما برسد به عنوان عمق موثر انتخاب می گردد . باتوجه به نتایج دیده شد که عمق موثر با افزایش مدت زمان القا افزایش می یابد پس برای مدت زمان ۶۰ ثانیه بیشترین فاصله عمق موثر ۴۲/۸ میلی متر می باشد .

هم چنین در این پژوهش مقاومت احیا شده خمشی را برای یک تیر آسفالتی به کمک گرمایش القائی بررسی کردند که تیر بیشترین نرخ ترمیم را در دمای بهینه ی ۸۵ درجه سانتی گراد نشان داد و افزایش بیشتر دما تا ۹۵ درجه باعث کاهش یافتن نرخ ترمیم آن شد . [۱۶]

۲-۶ توزیع افزودنی در نمونه

آقای لو و همکاران در پژوهشی که از ضایعات فلزی در نمونه استفاده کردند با توجه به عکس برداری توسط دستگاه سی تی اسکن به این نتیجه رسیدند که در هنگام اختلاط این گونه ضایعات به طور یکنواخت توزیع نمی گردد و همانطور که در شکل ۲-۲۰ که تصویر یک دوربین حرارتی می باشد دیده می شود ، با تجمع در قسمتی از نمونه سبب بیش گرمایش در برخی از نقاط آن می شود که در عکس با رنگ قرمز دیده می شود . بنابراین افزودنی هایی نظیر فیبر کربن و پودر کربن فعال می توانند نتیجه ی بهتری را از لحاظ توزیع یکنواخت تر نشان دهند . عکس زیر نشان دهنده ی تجمع ضایعات فلزی در قسمتی از نمونه است که سبب افزایش دمای قابل توجه نسبت به بقیه سطوح نمونه شده است . در استفاده از این نوع افزودنی ها باید زمان ماکروویو را طوری تنظیم نمود تا با گرم شدن قسمت های فلزی که گرما را به مصالح دیگر منتقل می کند ، دمای قیر به بیش از دمای ۱۰۰ درجه نرسد تا از آسیب زدن به نمونه جلوگیری شود [۱۷] .

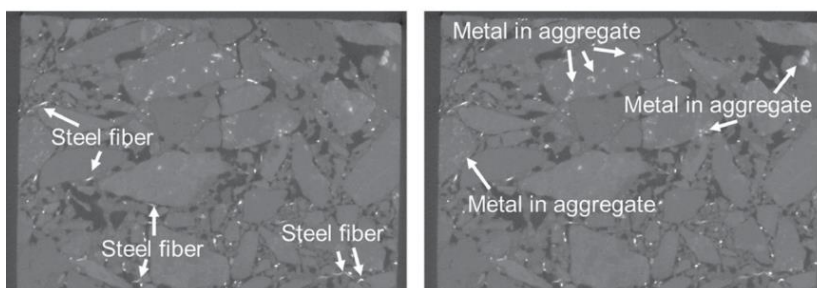


شکل ۲-۲۰ توزیع دمایی نا برابر به دلیل عدم توزیع یکنواخت الیاف فلزی [۱۷]

۲-۷ تاثیر استراحت نمونه پس از گرمایش بر ترمیم

در پژوهشی که به ارزیابی قابلیت‌های ترمیم ترک‌های مخلوط آسفالتی نمونه‌های متعارف بدون مواد افزودنی فلزی پرداخته است، قابلیت ترمیم را با مخلوط‌های اصلاح‌شده حاوی الیاف فلزی، تراشه‌های فلزی و سیلیکون کاربید مقایسه کردند. در این آزمایش مقاله در آزمون خمش نمونه‌های آسفالتی بعد از شکستن آنان و قرار دادن در ماکروویو، پس از رسیدن به دمای مورد نیاز برای ترمیم به مقدار زمانی برای استراحت نیاز دارند تا فرآیند ترمیم صورت گیرد. آقای گونزالز و همکاران گفته‌اند حداقل زمان استراحت لازم در دمای محیط (۲۰ درجه) برای اینکه ترمیم به خوبی صورت گیرد ۴ ساعت می‌باشد تا نمونه مجدد سرد شود و مقاومت اولیه خود را احیا کند. هم چنین با پیر شدن قیر در سیکل‌های مختلف نرخ ترمیم حدود ۱۰ درصد در هفت سیکل کاهش یافت به طوری که در سیکل اول حدود ۶۰ درصد مقاومت اولیه احیا شد اما در سیکل هفتم تنها به نرخ ۵۰ درصد رسید. نکته قابل توجهی که در این آزمایش دیده شد این بود که نمونه‌ی شاهد بدون هیچ گونه افزودنی به خوبی در ماکروویو گرم شد و ترمیم مناسبی از خود نشان داد. با مشاهده نتیجه فوق در صدد آن شدند تا دلیل این اتفاق را بررسی کنند و اقدام به عکس برداری سی تی کردند تا در صورت وجود مواد فلزی موجود در نمونه مشخص گردد. با عکس برداری از نمونه‌ها همانطور که در شکل ۲-۲۱ مشاهده می‌گردد، مشخص شد در سنگدانه‌های نمونه شاهد مقداری مواد فلزی موجود است که در عکس همانند تراشه‌های فلزی به رنگ سفید دیده می‌شدند. در واقع رنگ سفید در بین سنگدانه‌ها نشانه‌ی وجود الیاف فلزی افزوده شده و

رنگ سفید در وسط سنگدانه ها نشانه‌ی وجود مواد فلزی در داخل سنگدانه ها می‌باشد [۱۸].



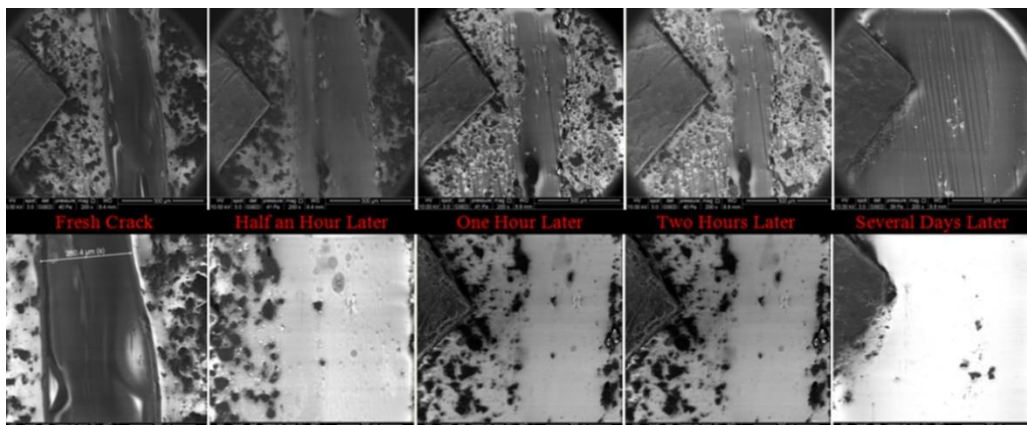
شکل ۲-۲۱ وجود مواد فلزی در سنگدانه (سمت راست) و وجود الیاف افزوده شده در بین

سنگدانه‌ها (سمت چپ) [۱۸]

۲-۸ تاثیر شدت خرابی ، عرض ترک و مدت زمان استراحت بر

ترمیم

عرض ترک به عنوان یکی از معیار های شدت تخریب نمونه بعد از شکست تلقی می گردد که به صورت عملی اندازه گیری می شود. آقای شن و همکاران در بررسی خود از یک نوع قیر استفاده کرده و با ساخت نمونه های قیری ترک هایی با عرض ۸۰ میکرومتر و ۱۶۰ میکرومتر ایجاد کردند. و پس از رها کردن آن در دمای ۲۰ درجه سانتی گراد با استفاده از میکروسکوب الکترونی اقدام به بررسی ابعاد ترک نمودند. همانگونه که در شکل ۲-۲۲ مشاهده می شود بعد از ۱۵ دقیقه عمق ترک کاهش یافته و بعد از ۳۰ دقیقه عرض ترک کمتر شده و بعد از یک ساعت لبه های ترک گرد گوشه شد. پس از آن در ساعت های بعدی اتفاق چشم گیر دیگری رخ نداد و الباقی ترمیم و بسته شدن در طی ساعتهای بیشتری رخ داد.



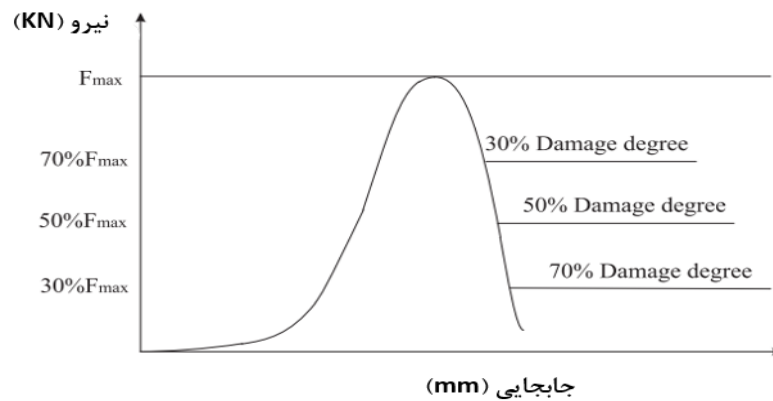
شکل ۲-۲۲ ترمیم یافتن نمونه قیر در طی زمان های مختلف [۱۹]

برای یک نوع قیر در دمای ۳۰ درجه و با ۱۵ دقیقه استراحت ، ترکی که عرض کمتری داشت با سرعت بیشتری ترمیم یافت . هم چنین اشاره کردند که در ترمیم نمونه ای که تحت آزمایش خستگی قرار گرفته بود بعد از ۳ ساعت استراحت در دمای ۲۵ درجه سانتی گراد محیط نرخ ترمیم به میزان ۶۱ درصد رسید حال آنکه با استراحت دادن نمونه ها در دمای محیط به مدت ۲۴ ساعت ترمیم به طور کامل صورت گرفت و مقاومت اولیه مجدداً حاصل شد [۱۹] .

از جمله پارامترهای تاثیر گذار در ترمیم طول ترک ایجاد شده می باشد که این طول نشانگر میزان تخریب نمونه می باشد . آقای مینگشیا لی و همکاران در مقاله ای که به بررسی تاثیر سرباره های آهنی^۱ در ترمیم آسفالت دارد ، اقدام به آزمایش دما و زمان ترمیم و رابطه میزان تخریب نمونه با نرخ ترمیم کردند . برای این منظور آزمایش شکست نمونه تحت خمش سه نقطه ای را در دمای ۱۵ درجه و با سرعت ۵ میلی متر بر دقیقه انجام دادند و تخریب های نمونه را بر اساس طول ترک تشکیل شده به سه دسته (۳۰ ، ۵۰ و ۷۰ درصد) تقسیم کردند به عبارتی حداکثر مقاومت نمونه را بدست آوردند و پس از بارگذاری بیشتر نمونه شروع به ترک خوردن کرد که می توان این مفهوم را در شکل ۲-۲۳ مشاهده نمود . سپس بارگذاری تا جایی ادامه می یابد که نمونه دیگر نیرویی را تحمل نمی کرد و تخریب به

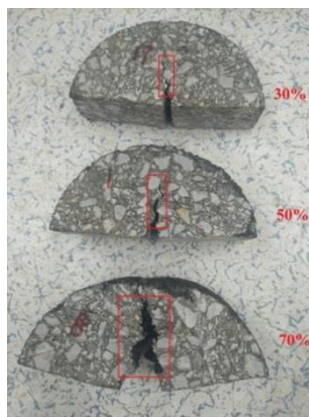
^۱ Slag

صورت کامل انجام شده بود .



شکل ۲-۲۳ مفهوم میزان تخریب نمونه با توجه به نمودار نیرو - جابجایی [۲۰]

با توجه به نودار فوق نمونه‌ها را با توجه به طول ترکی که شکل گرفته بود درجه‌بندی کردند و سه درجه تخریب تعریف کردند که ترک رخ داده در نمونه‌ها در شکل ۲-۲۴ نشان داده شده است .



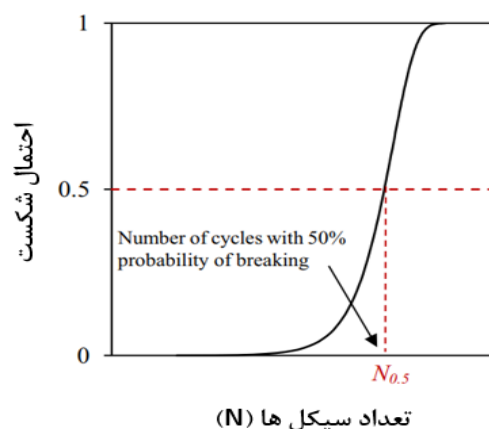
شکل ۲-۲۴ میزان تخریب نمونه با توجه به طول ترک تشکیل شده [۲۰]

با اعمال آزمون بر چهار درصد مختلف سرباره‌ی آهنی (۰، ۱، ۲، ۴) مشاهده شد که بهترین نرخ ترمیم با افزودن ۲ درصد سرباره رخ داد زیرا افزودن بیشتر از این مقدار باعث جذب گرمای بیشتر و سبب پیر شدن قیر می‌شود و خواص رئولوژیکی قیر را تغییر می‌دهد . در ضمن مشاهده شد با بالا رفتن دما تا

۶۰ درجه ترمیم افزایش یافت ولی افزایش دما بیشتر از این مقدار تاثیر منفی داشته است زیرا نقطه نرمی این قیر ۴۸/۵ درجه بوده است و دمای ۶۰ درجه برای روان شدن آن کافی بوده است . در نهایت با مرتبط کردن طول ترک و میزان تخریب با نرخ ترمیم نمونه به این نتیجه رسیدند که افزایش طول ترک از ۳۰ درصد به ۷۰ درصد باعث کاهش نرخ ترمیم از ۵۹ درصد به ۲۴ درصد شد . هم چنین برای نمونه با ۲ درصد سرباره و میزان تخریب ۵۰ درصد ، افزایش زمان استراحت از ۱۰ دقیقه به ۳۰ دقیقه در دمای محیط سبب افزایش ۱۸ درصدی نرخ ترمیم شد [۲۰].

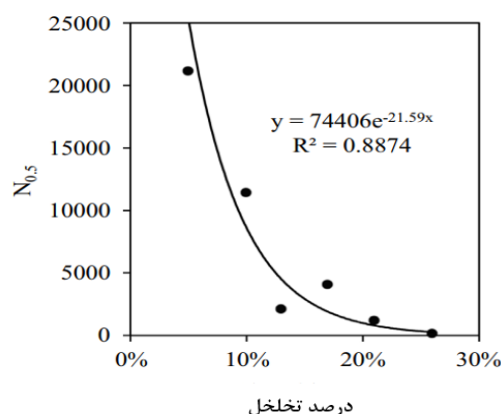
۲-۹ میزان تخلخل و تاثیر آن بر ترمیم

تخلخل مخلوط آسفالتی از جمله پارامترهایی است که می تواند در ترمیم آن نمونه تاثیر زیادی بگذارد آقای صلیح و همکاران تاثیر میزان تخلخل نمونه را بر میزان ترمیم شوندگی در آزمایش خستگی بررسی کردند . در ابتدا با آزمودن خستگی چند نمونه مقاومت نهایی خستگی آنان را بدست آوردند و با توجه به تعداد سیکل های بدست آمده برای مقاومت نهایی احتمال ۵۰ درصد شکست نمونه را مشخص کردند ، یعنی نصف تعداد سیکل هایی که نمونه به خستگی کامل رسیده است ($N_{0.5}$) و این مقدار را به عنوان میانگین عمر خدمت دهی نمونه پیش بینی کردند که این مقدار با توجه به شکل ۲-۲۵ در مقدار ۵۰ درصد احتمال شکست بدست می آید .



شکل ۲-۲۵ بدست آوردن تعداد سیکل خستگی با احتمال ۵۰ درصد شکست نمونه [۲۱]

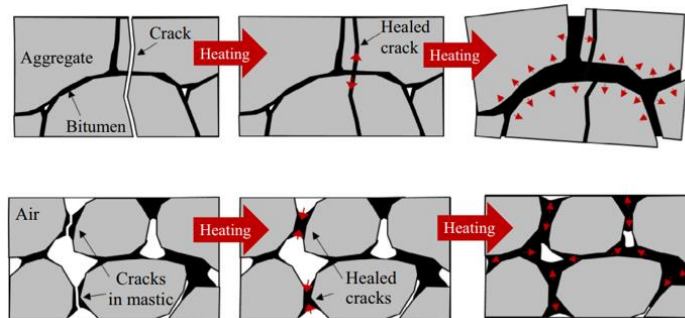
با استفاده از این معیار و با انجام آزمون خستگی و مرتبط کردن آن با تخلخل نمونه (از ۵ درصد تا ۳۰ درصد) با توجه به شکل ۲-۲۶ نتیجه شد با افزایش تخلخل عمر خدمت دهی نمونه کاهش می یابد.



شکل ۲-۲۶ کاهش عمر خستگی با افزایش میزان تخلخل [۲۱]

در نهایت دو سری نمونه را به منظور تاثیر گرمایش در ترمیم نمونه بررسی کردند که در یکی از گرمایش استفاده نشد و در دیگری آزمون خستگی را در سیکل مشخصی متوقف کردند و اقدام به گرمادهی نمونه با لامپ های مادون قرمز کردند ، سپس با استراحت دادن به نمونه اقدام به ادامه دادن آزمون خستگی کردند . نتیجه به گونه ای که در شکل ۲-۲۷ دیده می شود به این صورت شد که هرچه میزان تخلخل بیشتر شود به دلیل سهولت حرکت قیر پس از روان شدن در بین سنگدانه ها ترمیم

بهتری صورت می گیرد اما مقاومت اولیه نمونه با افزایش تخلخل کاهش می یابد در واقع در زمانی که نمونه تخلخل کمی دارد قیر روان شده باعث تخریب نمونه شده حال آنکه در نمونه‌ی متخلخل قیر روان شده تنها در بین فضاهای خالی حرکت کرده و اقدام به پرکردن آنان می نماید .



شکل ۲-۲۷ مقایسه ترمیم و روان شدن قیر در مخلوط متراکم (ردیف بالا) و

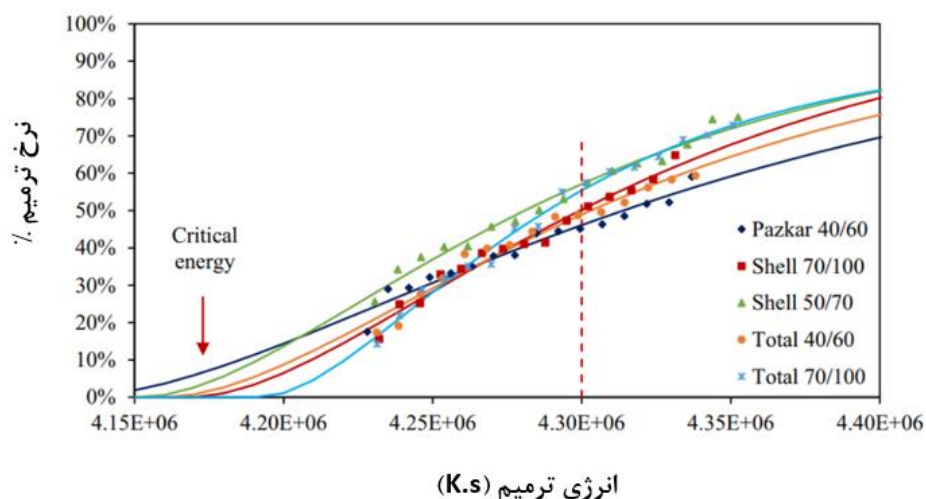
مخلوط متخلخل (ردیف پایین) [۲۱]

با توجه به تعابیر بالا تاثیر تخلخل در ترمیم و مقاومت اولیه با درصد تخلخل‌های متفاوت مقایسه شد و با تخلخل ۵ درصد میزان عمر خستگی و تعداد سیکل‌های آن نسبت به حالت بدون گرمایش و ترمیم ۴۲ درصد و با تخلخل ۲۶ درصد میزان عمر خستگی به مقدار ۲۱۷ درصد ترمیم یافت [۲۱] .

۲-۱۰ تاثیر نوع قیر بر ترمیم

ماهیت ویسکوالاستیک قیر زمینه‌ی ترمیم ترک‌های موجود در آسفالت را فراهم می‌آورد . یکی از راه‌هایی که این فرآیند را تسریع می‌دهد افزودن مواد رسانا به مخلوط و گرمادهی القائی می باشد . آقای گومز و همکاران به بررسی قیرهای رایج مختلف با درجه نفوذ متفاوت و ارتباط آن بر ترمیم شونده پرداختند . برای این مقایسه چون گرانیروی این قیر ها با توجه مشخصاتشان در دمای یکسان متفاوت است از مفهوم انرژی ترمیم که برابرست با مساحت سطح زیر نمودار زمان - دما استفاده کردند . در ساخت نمونه ها برای تمامی آن‌ها از ۴/۵ درصد قیر و با فضای خالی ۴/۷ درصد استفاده شد و به منظور تامین افزودنی برای گرم شدن تحت القا از سنگدانه‌های فلزی با قطر ۱ تا ۲ میلی متر استفاده شد . برای

آزمایش مقاومت نمونه‌ها از آزمایش خمش سه نقطه ای در دمای ۲۰- و با سرعت ۵۰ میلی متر بر دقیقه استفاده شد. با حاصل شدن نتایج که در شکل ۲-۲۸ دیده می‌شود ایشان اشاره کردند که استفاده از قیرهای متفاوت در میزان ترمیم شوندگی مخلوط آسفالتی تاثیر چندانی ندارد و نمونه‌ها نتایج نسبتاً مشابهی را رقم زدند. در واقع هریک از خطوط موجود در شکل ۲-۲۸ که به رنگ‌های مختلف رسم شده است، نشانگر یک نوع قیر است و مشاهده می‌شود که میزان نرخ ترمیم در تمامی این خطوط تفاوت چندانی ندارد [۲۲].

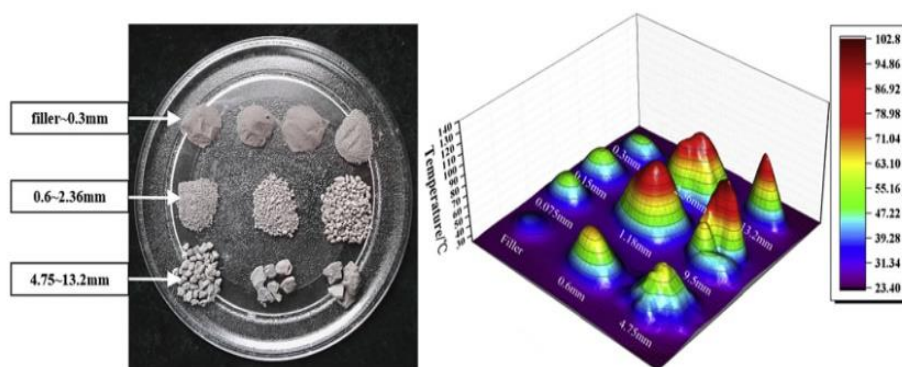


شکل ۲-۲۸ مقایسه نرخ ترمیم قیر های مختلف [۲۲]

آقای سان و همکاران به مطالعه ی خاصیت شیمیایی قیر پرداختند و از آزمایش هایی نظیر کروماتوگرافی نفوذ ژل استفاده کردند و بیان نمودند قیری که LMS بیشتری دارد (LMS یک شاخص رایج به منظور بررسی فاصله بین مولکولی می‌باشد) و به عبارتی آن قیر درشت مولکول تر است ترمیم ضعیف تری از خود نشان داد. برای بررسی ترمیم نیز از آزمایش خستگی استفاده کردند [۲۳].

۲-۱۱ اندازه ی سنگدانه و تاثیر آن بر ترمیم

آقای گایو و همکاران به بررسی استفاده از اسلگ و یافتن بهینه ترین سایز سنگدانه به منظور گرمایش بهتر پرداختند. ایشان ۱۰ نوع سایز مختلف از سنگدانه‌ی سرباره آهن گذاری را به بررسی قرار دادند و همزمان تحت امواج ماکروویو قرار دادند. افزایش دمای سنگدانه‌ها را در یک زمان مشخص توسط دوربین حرارتی ثبت کردند، که در شکل ۲-۲۹ سنگدانه‌ها و داده‌های دمایی آنان ثبت شده است. با توجه به این داده‌ها نتیجه گرفتند که سنگدانه‌ی سرباره با اندازه‌ی بیشتر از ۰/۶ میلی متر ظرفیت گرمایی بالاتری از خود نشان دادند به عبارتی در مدت زمان یکسان دمای بیشتری را ثبت کردند. در نهایت برای هر یک از ابعاد سنگدانه‌هایی که موثر بودند به منظور جلوگیری از بیش گرمایش در نمونه و رسیدن به دمایی برای ذوب یخ، زمان لازم برای قرارگیری تحت امواج را مشخص کردند که برای سنگدانه به اندازه ۹/۵ میلی متر ۲۰ ثانیه، برای سنگدانه ۲/۳۶ میلی متر ۴۰ تا ۶۰ ثانیه و برای سنگدانه ۰/۶ میلی متر ۸۰ ثانیه زمان‌های مناسب بودند [۲۴].

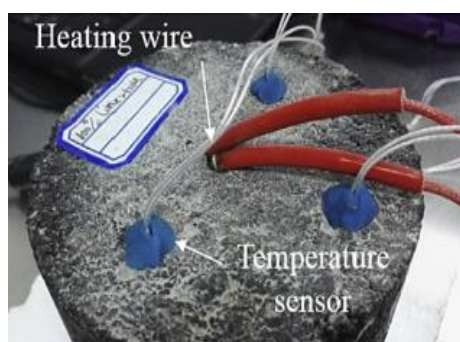


شکل ۲-۲۹ داده های دمایی سرباره با ابعاد مختلف تحت امواج ماکروویو [۲۴]

هم چنین با توجه به عناصر مختلفی که در سرباره وجود دارد به بررسی میزان گرمایش ترکیبات مختلف با توجه به مطالعات قبلی پرداختند که در این بین Fe_3O_4 بیشترین نرخ گرمایش و CaO

کمترین نرخ را دارا بود [۲۵، ۲۶].

در ضمن با ساخت نمونه مارشال مانند شکل ۲-۳۰ و اتصال سنسورای حرارتی به آن با اندازه گیری ضریب انتقال حرارت (بر حسب وات بر متر بر کلوین) مشخص شد که هرچه میزان سرباره در نمونه آسفالتی افزایش یافته ضریب انتقال حرارت نمونه کاهش پیدا کرده است [۲۴].



شکل ۲-۳۰ اندازه گیری ضریب انتقال حرارت نمونه مارشال توسط سنسورها [۲۴]

۱۲-۲ تاثیر افزودنی‌ها بر ترمیم

به منظور رخ دادن فرآیند گرمایش توسط ماکروویو و دستگاه القائی نیاز است تا افزودنی های خاصی به مخلوط اضافه گردد تا مخلوط قابلیت گرم شدن پیدا کند . به این منظور بر روی مواد مختلفی کار شده است که این ویژگی را دارا می باشند . در ادامه به بررسی چند نمونه از این مواد پرداخته شده است

۱-۱۲-۲ خاکستر بادی^۱

آقای ولدیز و همکاران خاکستر بادی (۵/۲ درصد مصالح سنگی) را به مخلوط اضافه کرده و با توجه به عرض ترک‌های تشکیل شده و اندازه گیری آنان با میکروسکوپ و پردازش تصویر، میزان ترمیم را بررسی کردند . دلیل استفاده از این افزودنی وجود ترکیباتی از اکسیدهای فلزی بود که می توانست به خوبی در ماکروویو گرم گردد . میزان وجود این اکسید های فلزی در خاکستر بادی با توجه به آنالیز

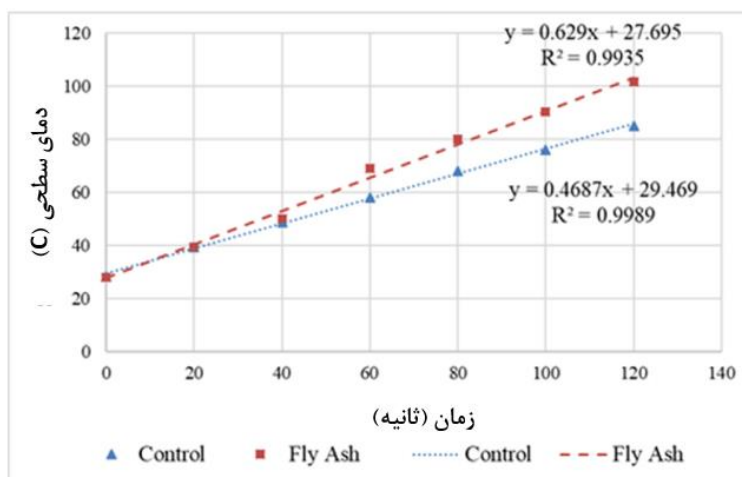
^۱ Fly ash

صورت گرفته در جدول ۳-۲ درج شده است .

جدول ۳-۲ ترکیبات شیمیایی موجود در خاکستر بادی [۲۷]

ترکیب	درصد	ترکیب	درصد
SiO ₂	46.6	Na ₂ O	1.01
Al ₂ O ₃	12.4	K ₂ O	2.28
Fe ₂ O ₃	9.74	SO ₃	5.52
CaO	14.5	Ignition lost	1.08
MgO	7.23		

نمونه‌ها به صورت نیم استوانه ساخته شد و پس از ساخت توسط آزمون خمش سه نقطه‌ای در دمای ۱۸- درجه سانتی گراد تحت آزمایش قرار گرفت و پس از شکسته شدن دو قطعه جدا شده بدون اعمال فشار در کنار یکدیگر قرار گرفت و ترک شکل گرفته توسط یک میکروسکوب عکس برداری شد . عرض ترک‌های تشکیل شده توسط میانگین گیری از سه قسمت در طول ترک ثبت شد و شدت تخریب نمونه توسط عرض ترک‌ها به پنج دسته تقسیم شد . با انجام آزمون خمش سه نقطه ای و با توجه به دسته بندی فوق نتیجه شد که میزان تخریب اولیه در نرخ ترمیم تاثیر خواهد داشت و با افزایش عرض ترک میزان ترمیم کاهش یافت . نکته قابل توجه این بود که میزان تخریب یک نمونه رابطه نسبی با مقاومت اولیه نمونه در اولین شکست داشت یعنی هرچه مقاومت خمشی اولیه نمونه بیشتر بود عرض ترک تشکیل شده بیشتر می‌شد پس می‌توان نتیجه گرفت که اگر مقاومت اولیه نمونه‌ها برابر باشد ترک تشکیل شده در نمونه‌ها نیز دارای عرض تقریبی برابری خواهند بود . ایشان اشاره کردند که افزودن خاکستر بادی به عنوان فیلر می تواند سبب افزایش نرخ رشد دما تحت امواج ماکروویو گردد طوری که در مدت زمان ۱۲۰ ثانیه نمونه ای که حاوی فیلر خاکستر بادی بود دمای آن ۲۰ درجه نسبت به نمونه شاهد بیشتر شد ، که همانطور که در شکل ۲-۳۱ ملاحظه می‌گردد نمودار رشد دمایی آن دارای شیب بیشتری می‌باشد .



شکل ۲-۳۱ مقایسه رشد دمای نمونه حاوی خاکستر بادی تحت ماکروویو با نمونه شاهد [۲۷]

هم چنین با توجه به نرخ رشد دمایی بیشتر ، وجود خاکستر باعث شد تا در نمونه هایی با میزان تخریب متوسط ، مقدار ترمیم به میزان ۱۰ درصد بیشتر حاصل شود اما در نمونه هایی با تخریب زیاد تاثیر چندانی نشان داده نشد [۲۷].

۲-۱۲-۲ میکروکپسول های جوان ساز

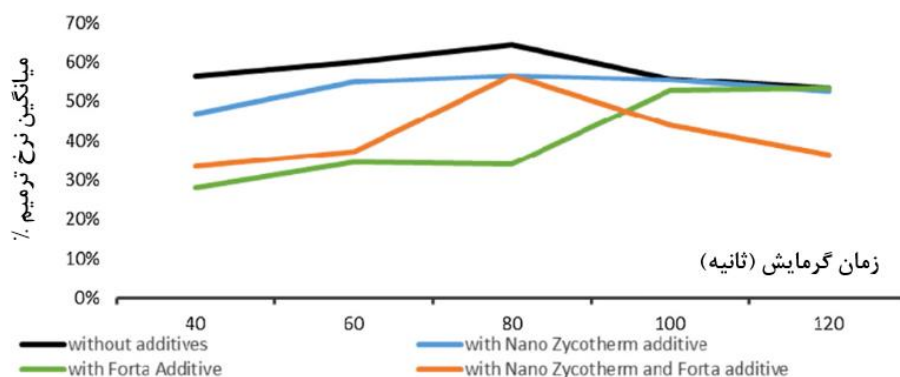
آقای فنگ و همکاران خود ترمیمی نمونه آسفالتی را با افزودن میکرو کپسول های جوانساز روغنی بررسی کردند و با کمک این میکرو کپسول ها قیری که در ابتدا درجه نفوذی برابر ۸۶ میلیمتر داشت و بعد از پیر شدگی به ۴۶ رسیده بود ، با افزودن ۲ درصد وزن مخلوط میکرو کپسول به نمونه به درجه نفوذ ۵۰ و با افزودن ۱۲ درصد به ۸۰ (نزدیک درجه نفوذ ابتدایی) رسید . در مجموع مشاهده شد که افزودن میکروکپسول ها سبب کاهش روانی و در نتیجه ترمیم بهتر شد . در فرآیند تشکیل ترک تا ترمیم شدن کامل آن بعد از ایجاد میکروت ترک در قیر ، جوان سازها آزاد شده و با خاصیت مویینگی که داشتند سبب حرکت در ترک و در نتیجه ترمیم آن شدند [۲۸].

۲-۱۲-۳ نانوزایکوترم و الیاف فورتا

نانوزایکوترم یک ماده افزودنی اورگانوسیلان به قیر می باشد که سبب مقاوم شدن روسازی آسفالتی در برابر، عریان شدگی (به دلیل ایجاد پیوند شیمیایی قوی بین قیر و مصالح سنگی)، اکسیداسیون (پیرشدگی) (به دلیل پوشش دادن کامل قیر بر روی مصالح سنگی) و خستگی (به دلیل تشکیل تراکم یکنواخت و منسجم در آسفالت حین عملیات روسازی) می شود . با استفاده از این افزودنی می توان عملیات پوشش دهی سنگدانه ها توسط قیر را با ۳۰ تا ۴۰ درصد زمان کمتر انجام داد . این ماده باید قبل از اختلاط قیر به سنگدانه ، به قیر اضافه شده و بر اساس نوع قیر بین ۰/۵ تا ۰/۲ وزن قیر استفاده می گردد [۲۹] .

۲-۱۲-۴ فورتا فای

فورتا فای یک مخلوط ترکیبی از سه نوع الیاف می باشد که برای مسلح و تقویت کردن آسفالت های گرم (HMA)، آسفالت های نیمه گرم (WMA)، وصله کاری (PAT)، طراحی شده است . ترکیبات مخصوص این الیاف شامل الیاف آرامید و پلی اولفین می باشد که در افزایش مقاومت و دوام ترکیبی موثر هستند . این افزودنی با کنترل کردن ترک های حرارتی ، انعکاسی و خستگی و همچنین شیار افتادگی ، یک راه حل مقرون به صرفه برای افزایش دوام و طول خدمت روسازی ها می شود . آقای حسنی نصب و همکاران از الیاف فورتا و نانوزایکوترم در مخلوط آسفالتی استفاده کرده و بیان کردند که افزودن ترکیب این دو ماده سبب افزایش مقاومت خمشی به طرز قابل ملاحظه ای شد ، زیرا فیبر فورتا سبب افزایش مقاومت کششی و نانوزایکوترم سبب افزایش چگالی می شود . در بررسی نمونه ها به منظور همانطور که در شکل ۲-۳۲ دیده می شود خطوط سبز رنگ ، آبی و نارنجی که به ترتیب مربوط به مخلوط حاوی فورتا ، نانوزایکوترم و ترکیب نانوزایکوترم با فورتا می باشد نسبت به خط مشکی که مربوط به نمونه شاهد و بدون افزودنی است ، پایین تر قرار گرفته و به عبارتی در ترمیم تفاوت چندانی نسبت به نمونه بدون افزودنی ایجاد نشد طوری که نمونه ی بدون افزودنی نرخ ترمیم بیشتری را حاصل نمود .



شکل ۲-۳۲ میزان ترمیم نمونه حاوی فورتا فای و نانوزایکوترم [۳۰]

درضمن در این پژوهش اشاره کردند که با توجه به استفاده از قیر PG۶۴-۲۲ دمای بهینه‌ی ترمیم بین ۷۰ تا ۸۰ درجه بدست آمد [۳۰].

۵-۱۲-۲ زغال سنگ

آقای مدرس و همکاران از پودر ضایعات زغال سنگ^۱ و خاکستر^۲ آن، در مخلوط آسفالتی داغ استفاده کردند و بیان نمودند که استفاده از پودرزغال سنگ و پودر خاکستر آن به ترتیب می‌تواند مقاومت مارشال را تا ۱۷ و ۴۴ درصد بهبود دهد در حالی که حداقل‌های مورد نیاز به لحاظ حساسیت رطوبتی را برآورده می‌کند.

همچنین عمر خستگی نمونه‌های حاوی این دو افزودنی نسبت به نمونه با فیلر آهکی عمری بیش از دو برابر را نشان دادند.

با انجام آزمایش کشش غیر مستقیم نیز مشاهده شد نمونه‌ی حاوی پودر خاکستر زغال سنگ مقاومتی در حدود ۸ کیلو پاسکال ولی نمونه‌ی حاوی پودر زغال سنگ تنها مقاومتی در حدود ۷/۴ کیلو

۱ CWP

۲ CWA

پاسکال داشت که از نمونه‌ی شاهد حاوی فیلر آهکی نیز کمی کمتر بود [۳۱].

۲-۱۲-۶ مواد کربنی

مواد کربنی به صورت کلی جاذب خوبی برای امواج ماکروویو می باشند به این معنی که می توانند به خوبی در ماکروویو گرم شوند . گرمایش در ماکروویو در اثر برهمکنش مولفه الکتریکی امواج صورت می گیرد که از این رو به گرمایش ماکروویو ، گرمایش دی الکتریک^۱ نیز می گویند .

گرمایش به دو صورت برهمکنش های دوقطبی^۲ و هدایت یونی^۳ صورت می گیرد .

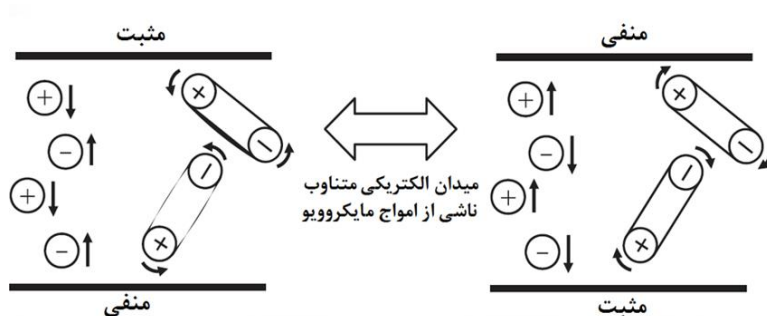
برهمکنش های دوقطبی در مولکول های قطبی رخ می دهد . در اثر عبور امواج مایکروویو از مجاورت مولکول های قطبی، مانند شکل ۲-۳۳ دو انتهای قطبی این مولکول ها شروع به تغییر وضعیت و نوسان خواهند نمود که متناسب با نوسان میدان الکتریکی امواج مایکروویو است . این نوسان در مولکول ها منجر به افزایش برخوردهای بین مولکولی و در نتیجه افزایش دما خواهد شد و هر چه مولکول قطبی تر باشد بهتر با میدان ناشی از امواج مایکروویو جفت خواهد شد .

هدایت یونی نیز در اساس شبیه به برهمکنش های دوقطبی است و تفاوت خیلی اندکی با آن دارد . یون ها ذرات بارداری هستند که در محلول پخش شده اند و می توانند با میدان الکتریکی ناشی از امواج مایکروویو جفت شوند و دامنه حرکت خود را افزایش دهند که این هم منجر به افزایش برخوردها و افزایش دما خواهد شد . پس می توان انتظار داشت که غلظت یون ها اثر قابل توجهی بر روی بازده گرمایش با استفاده از امواج مایکروویو داشته باشد .

۱ Dielectric Heating

۲ Dipole Interactions

۳ Ionic Conduction



شکل ۲-۳ نحوه چرخش مولکول‌ها تحت میدان الکتریکی در ماکروویو

ذکر این نکته لازم است که بعضی وقت‌ها گفته می‌شود امواج ماکروویو با یک مکانیسم دیگر نیز قادر به گرم کردن ترکیبات هستند. این مکانیسم که تحت عنوان اتلاف مغناطیسی^۱ شناخته می‌شود تنها برای برخی ترکیبات با خواص مغناطیسی مشخص، از جمله اکسیدهای فلزی رخ می‌دهد و طی آن در محدوده امواج ماکروویو این ترکیبات خاصیت مغناطیسی خود را از دست می‌دهند که خود را به صورت گرما ظاهر می‌سازد. وقتی فلز را در مایکروویو قرار دهیم، این فلز دارای تعداد زیادی الکترون است که توسط ماکروویو به حرکت درآمده و این باعث می‌شود یک ورق نازک از فلز به سرعت گرم شود. از همین به کار بردن لفظ گرمایش دی الکتریک برای فرایند گرمایش به وسیله امواج مایکروویو لفظ جامعی نمی‌باشد. آقای منندز و همکاران قابلیت گرمایش چند ماده را بر اساس ضریب اتلاف دی الکتریک بررسی کردند و افزودند زغال سنگ خام به عنوان جاذب ماکروویو عملکرد ضعیفی دارد اما موادی مثل کوک زغال، کربن فعال و قیر حاصل از قطران زغال سنگ^۲ می‌توانند جاذب خوبی برای این امواج بوده و سبب تولید گرما شوند [۳۲].

۷-۱۲-۲ خاکستر زغال سنگ

یک نیروگاه با سوخت زغال سنگ در بنگلادش در طول عمر عملکردی خود (حدود ۶۰ سال) بیش بینی می‌شود در حدود ۳۸ میلیون تن خاکستر زغال تولید کند. به طوری که اگر نیمی از آن را

^۱ Magnetic Loss

^۲ coal tar

در ساخت آجر و مصالح بتنی استفاده کنند ، ۲۰ میلیون تن دیگر با برنامه های در دسترس دپو می شوند که منجر به آلودگی های آب و خاک می گردد . خاکستر زغال یک ضایعات معدنی می باشد که در هنگام سوختن زغال سنگ بجا می ماند و حاوی عناصر سمی نظیر آرسنیک ، کروم ، سرب ، جیوه ، نیکل ، و سلنیوم می باشد [۳۳] .

نکته ی قابل توجه این است که اثر سمی بودن این فلزات سنگین و سمی با مخلوط شدن با مخلوط آسفالتی کاهش می یابد [۳۴] .

آقای سویو و همکاران از خاکستر زغال در مخلوط آسفالتی استفاده کردند و این افزودنی را با مقادیر ۱۰، ۲۰ و ۳۰ درصد وزن مصالح ریزدانه جایگزین کردند . به منظور بررسی میزان آلودگی این افزودنی از تست لیچینگ^۱ بهره گرفتند به گونه ای که مقداری از این افزودنی را به مدت ۲۴ ساعت در حمام آب متحرکی قرار داده و پس از آن با عبور از کاغذ صافی محتوی عبور کرده را تحت آزمون قرار دادند که مایع حاصله مانند شکل ۲-۳۴ به رنگ کدر درآمده و تغییر می کند . سپس با آنالیز این مایع حاصله آلودگی خاکستر را بررسی کردند .



شکل ۲-۳۴ تست لیچینگ و تغییر رنگ مایع مخصوص [۳۵]

در این بررسی سمیت خاصی جز مقداری آرسنیک مشاهده نشد که میزان آن از حداکثر مقدار مجاز

^۱ Leaching test

آن کمتر است و در نتیجه قابل چشم پوشی است و می توان این افزودنی را در مخلوط آسفالتی به کار برد. درصد قیر بهینه با افزودن ۱۰ درصد خاکستر تغییری نکرد اما با افزودن مقدار ۳۰ درصد از آن حدود ۰/۸ درصد به درصد قیر بهینه اضافه شد. در رابطه با مشخصات فیزیکی نمونه مقاومت مارشال نمونه حاوی ۱۰ درصد خاکستر بهترین عملکرد را نشان داد و با در نظر گرفتن ۱۰ درصد خاکستر به عنوان درصد بهینه از لحاظ مقاومت مارشال میزان مقاومت خستگی را در همین درصد با نمونه شاهد مقایسه کردند که مشاهده شد نمونه حاوی ۱۰ درصد خاکستر زغال عمر خستگی بیشتری را برابر ۳۰۱۲ سیکل نسبت به نمونه کنترلی که تعداد سیکل خستگی آن ۲۸۷۴ عدد بود، نشان داد. برای بررسی تاثیر وجود خاکستر در مخلوط آسفالتی بر روی حساسیت رطوبتی از آزمایش کشش غیر مستقیم استفاده شد و نتایج گواهی از آن داد که وجود خاکستر تاثیر زیادی در خرابی های رطوبتی ایجاد نمی کند [۳۵].

آقای کریم پور در مقاله ی خود از زغال سنگ به عنوان جایگزینی برای مصالح سنگی در مخلوط بتنی استفاده کرده است و بیان کرد مقدار بهینه زغال سنگ برای رسیدن به بیشترین مقاومت فشاری ، ۵ درصد و برای رسیدن به بیشترین مدول الاستیسیته ۱۰ درصد می باشد [۳۶].

۸-۱۲-۲ ضایعات روغن خوراکی

ترکیبات اصلی در ضایعات روغن خوراکی ، اسیدهای چرب اشباع شده و استرها هستند. علاوه بر این مقدار رطوبت تخمینی در آنها در حدود ۳ درصد است. در ترکیب شیمیایی آن کربن ، هیدروژن ، اکسیژن و مقداری نیتروژن و گوگرد (کمتر از ۱۰ درصد) دیده می شود. آقای گانگ و همکاران به قابلیت استفاده از روغن در آسفالت و همچنین ویژگی های مکانیکی نمونه پرداختند که مشخص شد این افزودنی می تواند باعث افزایش انعطاف و کارایی در نقاط با دمایی پایین شود [۳۷].

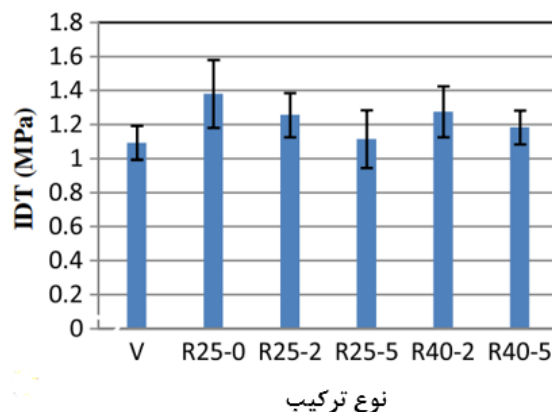
آقای ما و همکاران به منظور بهبود مشخصات آسفالتی که به صورت بازیافتی ساخته می شد از ترکیب و اختلاط ضایعات روغن خوراکی با درصد های مختلف با آن بهره بردند و اقدام به ساخت آسفالت

بازیافتی مخلوط شده با روغن کردند . در این پژوهش با افزودن این نوع روغن عمر خستگی آسفالت بازیافتی تا بیش از دو برابر افزایش یافت اما باعث کاهش مقاومت در برابر خرابی رطوبتی شد ؛ با این وجود حساسیت رطوبتی آن بیشتر از حداقل مجاز استاندارد چین که مقدار ۷۵ درصد است ، بدست آمد . (و) میزان روغن بهینه برای این ترکیبات در صورتی که مصالح درشت دانه جایگزین شود ۲ درصد روغن برحسب وزن مصالح درشت دانه و در صورت جایگزینی مصالح زیردانه ۴ درصد روغن بر حسب مصالح ریز دانه انتخاب شده است [۳۸] .

آقای جیا و همکاران از روغن ضایعات خوراکی به میزان ۰ ، ۲ و ۵ درصد (بر حسب وزن قیر) در مخلوط آسفالتی استفاده کردند و همزمان مقادیر ۰ ، ۲۵ و ۴۰ درصد آسفالت بازیافتی^۱ را جایگزین مصالح کردند تا بهینه ترین ترکیب را بدست آورند . همانطور که در شکل ۲-۳۵ ملاحظه می گردد در تمامی حالت ها مقاومت کششی غیر مستقیم نمونه نسبت به نمونه شاهد افزایش یافت و هم چنین مدول برجهندگی نمونه با افزودن آسفالت بازیافتی نسبت به نمونه شاهد افزایش یافت اما این افزایش در مقاومت کششی غیر مستقیم و مدول برجهندگی تنها به خاطر افزودن مصالح بازیافتی بود زیرا میزان ۲ درصد روغن باعث کاهشی در حدود ۰/۱۵ مگاپاسکال و افزودن ۵ درصد روغن باعث کاهش ۰/۳ مگاپاسکال در مقاومت کششی شد .

(منظور از R40-5 در شکل زیر مخلوط بازیافتی با ۴۰ درصد جایگزینی مصالح بازیافتی و ۵ درصد روغن می باشد)

^۱ RAP



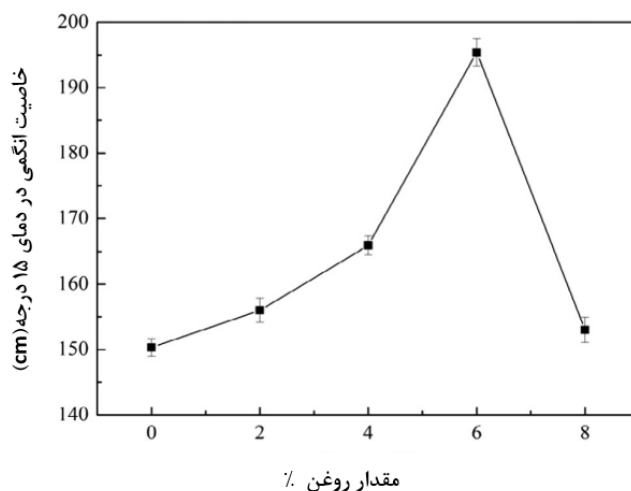
شکل ۲-۳۵ مقاومت کششی غیر مستقیم مخلوط با آسفالت بازیافتی و روغن ضایعاتی [۳۹]

در نهایت با انجام آزمون خستگی نشان دادند با وجود اینکه افزودن آسفالت بازیافتی باعث کاهش مقاومت خستگی می شود اما افزودن ۵ درصد روغن ضایعاتی می تواند مقاومت خستگی را به طرز چشم گیری افزایش دهد ، طوریکه عمر خستگی را از ۴۰۰۰ سیکل به نزدیک ۷۰۰۰ سیکل افزایش داد . در این پژوهش همچنین مشاهده شد که مشارکت روغن باعث کاهش فضای خالی سنگدانه ها و افزایش درصد فضای خالی پر شده با قیر^۱ می شود که این نتیجه سبب می شود مقدار قیر بهینه برای مخلوط آسفالتی کاهش یابد [۳۹].

به منظور بررسی افزودن ضایعات روغن خوراکی به قیر آقای سان و همکاران به کمک یک میکسر دور بالا و در مدت ۴۰ دقیقه در دمای ۱۳۵ درجه سانتی گراد درصد های روغن ۶،۴،۲ و ۸ را به قیر افزودند و بیان کردند این افزودنی می تواند موجب کاهش ویسکوزیته و کاهش نقطه نرمی قیر شود . همچنین شکل پذیری و خاصیت انگمی قیر با بیشتر شدن مقدار روغن افزایش یافت ولی با افزودن بیش از ۶ درصد روغن باتوجه به نمودار شکل پذیری که در شکل ۲-۳۶ مشاهده می گردد ، شکل پذیری به طور ناگهانی و با شدت بیشتری کاهش یافت . به صورت کلی با توجه به آنالیز FTIR (طیف سنجی مادون قرمز) که ترکیب روغن و قیر با یکدیگر هیچ گونه واکنش شیمیایی ندادند ، نتیجه گرفتند استفاده

^۱ VFA

از این روغن برای مناطق سرد و برای عملکرد قیر در دماهای پایین می‌تواند بسیار مفید باشد [۴۰].



شکل ۲-۳۶ خاصیت انگمی قیر بر حسب مقادیر مختلف روغن

در رستوران‌ها به منظور بررسی کیفیت توسط ناظران بهداشت برای عدم استفاده بیش از حد مجاز به منظور سرخ کردن مواد غذایی از اندازه‌گیری میزان کل ترکیبات قطبی روغن^۱ توسط دستگاه‌های مخصوص بهره می‌جویند؛ به گونه‌ای که هر چه روغن بیشتر استفاده شده باشد قطبیت آن بالاتر می‌رود [۴۱].

^۱ TCP

فصل سوم:

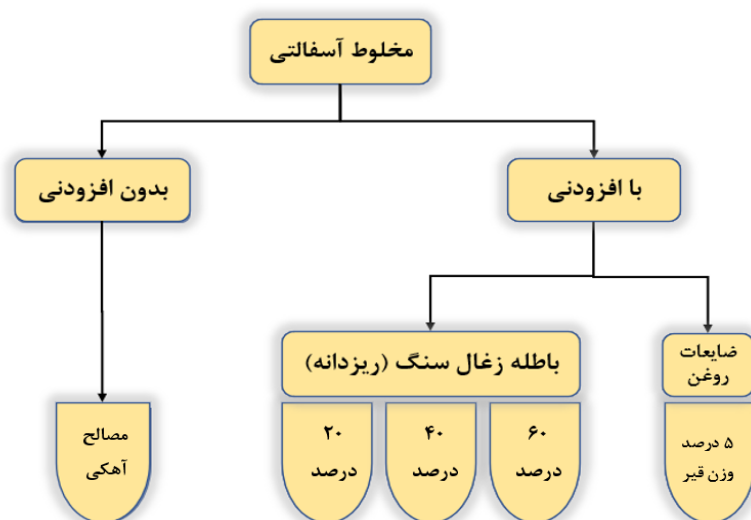
تئوری ها و آزمایشات

۳-۱ مقدمه

خودترمیمی شاخه ای نوین است که تاکنون استاندارد های محدودی را نسبت به آن ثبت نموده اند و پژوهشگران سعی دارند تا با پرداختن به آزمایشات مختلف در این زمینه روش ها ، آزمایشات و استانداردهای بیشتری برای آن تعریف نمایند . در این فصل سعی شده است تا به طور کامل مصالح و نحوه ی تهیه آنان ، آزمایشات ، روش های گرمادهی و دستگاه های لازم معرفی شود تا شناخت کامل تری نسبت به کلیت اجرای کار حاصل شود .

۳-۲ مواد و مصالح مصرفی

مصالح مورد استفاده در این پژوهش با توجه به شکل ۳-۱ شامل سنگدانه ، قیر ، باطله ی زغال سنگ و ضایعات روغن خوراکی می باشد که به شرح هر یک پرداخته شده است .



شکل ۳-۱ مصالح و افزودنی های مورد استفاده در پژوهش

۳-۲-۱ قیر

قیر مورد استفاده در این پژوهش قیر ۶۰/۷۰ می باشد که از شرکت نفت پاسارگاد استان تهران تهیه شده است و با توجه به کاربرد بیشتر آن در سطح کشور به منظور آزمایش برگزیده شده است . مشخصات

قیر تهیه شده با توجه به آزمایشات انجام شده و گزارش ارسالی از شرکت به شرح جدول ۱-۳ می‌باشد

جدول ۱-۳ مشخصات قیر مصرفی (۶۰/۷۰)

نوع آزمایش		استاندارد آزمایش	واحد اندازه گیری	نتایج
۱	وزن مخصوص در دمای ۲۵ درجه سانتی گراد	ASTM D70	گرم بر سانتی متر مکعب	۱.۰۳
۲	درجه نفوذ در دمای ۲۵ درجه سانتی گراد	ASTM D5	درجه سانتی گراد	۶۲
۳	نقطه نرمی (گلوله و حلقه)	ASTM D36	درجه سانتی گراد	۴۹
۴	درجه اشتعال (رو باز-کلوند)	ASTM D92	درجه سانتی گراد	۳۰۸
۵	مقدار کشش در دمای ۲۵ درجه سانتی گراد	ASTM D113	سانتی متر	۱۰۰
۶	ویسکوزیته کینماتیک در دمای ۱۲۰ درجه سانتی گراد	ASTM D2170	سانتی استوکس	۸۱۰
۷	ویسکوزیته کینماتیک در دمای ۱۳۵ درجه سانتی گراد	ASTM D2170	سانتی استوکس	۴۲۰
۸	ویسکوزیته کینماتیک در دمای ۱۵۰ درجه سانتی گراد	ASTM D2170	سانتی استوکس	۲۳۲
حساسیت حرارتی قیر				
۹	PI بر حسب درجه نفوذ در ۲۵ درجه سانتی گراد و نقطه نرمی	-	-	-۱.۱۲
۱۰	PVN بر حسب درجه نفوذ در ۲۵ درجه سانتی گراد و ویسکوزیته بر حسب سانتی استوکس در دمای ۱۳۵ درجه سانتی گراد	-	-	-۰.۵۶

۳-۲-۲ مصالح سنگی

مصالح سنگی از شکستن سنگ‌های معدنی و یا از سنگ بستر رودخانه‌ها تهیه می‌شوند که برای تهیه مخلوط آسفالتی باید سنگدانه‌ها شکسته و دارای سطحی زبر و لبه دار باشند تا سنگدانه‌ها به خوبی در کنار یکدیگر درگیر شوند ، علاوه بر این باید به ویژگی‌هایی چون شکل و سطح سنگدانه ، دوام ، سختی و تمیزی آنان نیز توجه شود . مصالح سنگی مورد استفاده در این پژوهش از معدنی در نزدیکی شهر میامی استان سمنان تهیه شده است که ویژگی‌های لازم که در بالا ذکر شد را برخوردار می‌باشد. جنس مصالح آهکی بوده و فیلر مورد استفاده پودر سنگ می باشد . نتایج مربوط به سنگدانه‌ها بر اساس

جدول ۳-۲ مشخصات مصالح سنگی استفاده شده در پژوهش

آزمایش	مشخصات	نتایج آزمایش		
		مخلوط درشت دانه	ماسه ۰-۶ میلیمتر	فیلر
ارزش ماسه ای AASHTO-T176		-	۹۳	-
درصد افت وزنی در مقابل سایش به روش لس آنجلس AASHTO-T96	نوع دانه بندی تعداد دور درصد سایش	B ۵۰۰ ۲۳	- - -	- - -
حدود اتربرگ AASHTO-T8990	دامنه خمیری PI حد خمیری PL حد روانی LL	- - -	N.P - غیر قابل تعیین	N.P - غیر قابل تعیین
درصد شکستگی مصالح سنگی روی الک شماره ۴ ASTM-5821	در یک وجه در دو وجه	- ۸۸	- -	- -
درصد اندود قیر به مصالح سنگی AASHTO-T182		بیش از ۹۵	-	-
درصد تطویل و تورق BS-812	تطویق تورق	۱۱ ۷	- -	- -
درصد افت وزنی در سولفات سدیم AASHTO-T104	ریزدانه درشت دانه	- ۰/۶۱	۰/۲۲ -	- -

گزارش ارایه شده از معدن به صورت جدول ۲-۳ می‌باشد .

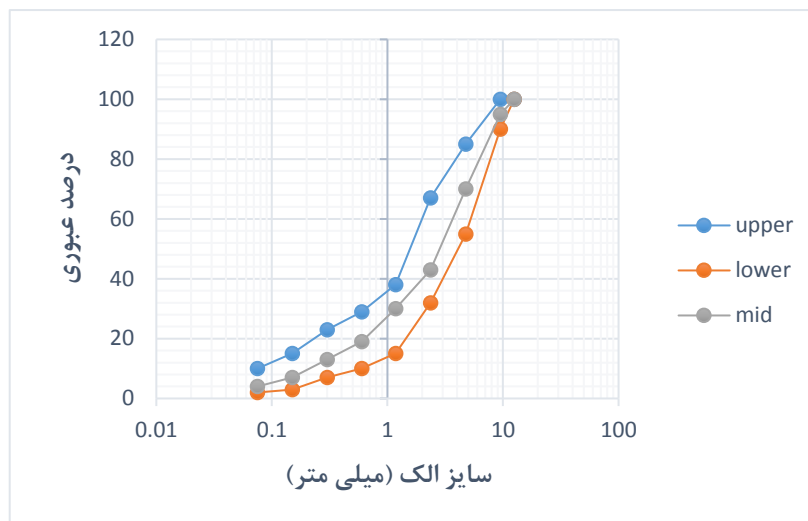
در پژوهش حاضر برای طرح اختلاط و ساخت نمونه آسفالتی از دانه بندی آیین نامه روسازی راه‌های

ایران (نشریه ۲۳۴) استفاده شده است که مقادیر به کار گرفته شده طبق جدول ۳-۳ می‌باشد و نمودار

حدود دانه بندی آن بر طبق آن در شکل ۲-۳ رسم شده است .

جدول ۳-۳ دانه بندی مورد استفاده برای نمونه های مارشال در پژوهش

سایز الک (اینچ)	سایز (میلیمتر)	محدوده درصد عبوری آیین نامه ۲۳۴ (دانه بندی شماره ۵)	درصد عبوری انتخابی	درصد تجمعی مانده	درصد مانده	وزن مصالح مانده روی الک
۱/۲	۱۲/۵	۱۰۰	۱۰۰	۰	۰	۰
۳/۸	۳/۸	۱۰۰-۹۰	۹۵	۵	۵	۶۰
۴	۴/۷۵	۸۵-۵۵	۷۰	۳۰	۲۵	۳۰۰
۸	۲/۳۶	۶۷-۳۲	۴۳	۵۷	۲۷	۳۲۴
۱۶	۱/۱۸	۳۸-۱۵	۳۰	۷۰	۱۳	۱۵۶
۳۰	۰/۶	۲۹-۱۰	۱۹	۸۱	۱۱	۱۳۲
۵۰	۰/۳	۲۳-۷	۱۳	۸۷	۶	۷۲
۱۰۰	۰/۱۵	۱۵-۳	۷	۹۳	۶	۷۲
۲۰۰	۰/۰۷۵	۱۰-۲	۴	۹۶	۳	۳۶
pan	۰		۰	۱۰۰	۴	۴۸
					۱۰۰	۱۲۰۰



شکل ۲-۳ نمودار حدود دانه بندی

۳-۲-۳ باطله زغال سنگ

چند نوع باطله زغال سنگ از شرکت زغال سنگ شاهرود (البرز شرقی) تهیه گشته و از بین آنان نمونه ای که بیشترین دما را در ماکروویو بدست آورد به عنوان مصالح مورد نیاز ما انتخاب شده است و نسبت به دانه بندی آن اقدام شده است. و با مصالح سنگی در سایز ریزدانه (ماسه) و فیلر جایگزین شده است. همچنین آزمایش وزن مخصوص و کنترل های آیین نامه برای این مصالح صورت گرفته است. نتایج آنالیز دریافت شده از شرکت و تحقیقات مشابه روی باطله برای این نوع باطله به شرح جدول ۳-۴ می باشد که باطله زغال سنگ حاوی ۶۰ درصد خاکستر و الباقی آن مواد کربنی می باشند.

جدول ۳-۴ آنالیز باطله زغال سنگ

نوع ترکیب	مقادیر %
Fe ₂ O ₃	کمتر از ۴
Al ₂ O ₃	۱۴
SiO ₂	۳۵
S	کمتر از ۰/۹
CuFeS ₂	کمتر از ۰/۹
مواد کربنی	۴۰
مواد فرار	حدود ۵

وزن مخصوص حقیقی^۱ این مصالح برابر ۲/۱۴ گرم بر سانتی متر مکعب می باشد ، که مانند شکل ۳-۳ به کمک غوطه‌وری در آب و وزن کشی بدست آمده است .



شکل ۳-۳ وزن کشی در حالت غوطه‌ور به منظور بدست آوردن وزن مخصوص حقیقی

در رابطه با باطله‌های زغال سنگ باید این نکته را اشاره کرد که تمامی آنان به یک اندازه در ماکروویو گرم نشده و بسته به نوع باطله هر کدام میزان مشخصی گرم می‌شوند . در شکل ۳-۴ دو نوع باطله که از شرکت زغال سنگ شاهرود تهیه شده است مشاهده می‌شود ، که با مقایسه بین این دو ، باطله ی K^۸

^۱ Bulk Specific Gravity

که رنگ تیره تری دارد و میزان کالکوپیریت آن بالاتر است نسبت به باطله‌ی دیگر که حاوی مقادیر گوگرد بیشتری است ، گرمایش بهتری را از خود نشان داد . به منظور بررسی گرمایش بین این دو ، هر دو نمونه که در دمای محیط بوده‌اند در ماکروویو قرار داده شده و در یک زمان برابر تحت امواج قرار گرفته اند . سپس توسط دوربین حرارتی دمای آنان پس از ماکروویو شدن ثبت شده است و نمونه ای که دمای بالاتری دارد نشان دهنده‌ی مناسب تر بودن به منظور جذب امواج و بالاتر بودن نرخ افزایش دمای آن برای استفاده در مخلوط آسفالتی می باشد .



شکل ۳-۴ دو نوع باطله‌ی زغال سنگ با مشخصات متفاوت

۳-۲-۴ ضایعات روغن خوراکی

این ضایعات از سالن غذاخوری دانشگاه صنعتی شاهرود که دیگر قابلیت استفاده به منظور خوراکی ندارد ، در چند روز مختلف تهیه شده است و توسط شعله مجدد گرم شده و به طور کامل با هم مخلوط شده است. ترکیبات ضایعات روغن خوراکی ، اسید های چرب اشباع شده و استرها بوده و در ترکیب شیمیایی آن کربن ، هیدروژن ، اکسیژن و مقداری نیتروژن و گوگرد مشاهده می شود.

در استفاده از این ضایعات در مخلوط آسفالتی برای بهتر گرم شدن در ماکروویو هر چه قطبیت بالاتر باشد ، مناسب تر است به عبارتی هرچه روغن بیشتر استفاده شده باشد قطبیت آن بالاتر و در نتیجه مناسب تر خواهد بود. لازم به ذکر است که روغن های ضایعاتی وسایل نقلیه قابلیت کمتری برای گرمایش در ماکروویو نسبت به روغن های خوراکی دارند .



شکل ۳-۵ گرم کردن و اختلاط روغن های استفاده شده به صورت همگن

۳-۳ آزمایشات و ساخت نمونه

در این پژوهش به منظور بررسی مشخصات مکانیکی و همچنین قابلیت ترمیم شوندگی نمونه آسفالتی آزمایشات زیر که در جدول ۳-۵ درج شده است ، استفاده شده است .

جدول ۳-۵ آزمایشات انجام شده در پژوهش

نام آزمایش	استاندارد	نوع نمونه
مقاومت مارشال و درصد قیر بهینه	ASTM D1559	استوانه ی مارشال
کشش غیر مستقیم لاتمن اصلاح شده	AASHTO T283	استوانه ی مارشال
خمش سه نقطه ای	ASTM D8044	نیم دایره scb
شاخص مارشال	ASTM D1559	استوانه ی مارشال

۳-۳-۱ روش ساخت نمونه

به منظور بررسی تاثیر هر کدام از افزودنی ها ملزم به ساخت سه نوع نمونه با افزودنی های متفاوت شده ایم (نمونه شاهد ، نمونه با زغال سنگ ، نمونه با ضایعات روغن) و با توجه به اینکه نمونه های هر کدام از نوع استوانه ای مارشال می باشد باید گام های زیر را طی نمود .

- دانه بندی مصالح و وزن کشی به مقدار لازم
- به منظور دانه بندی مصالح باید از تمیز بودن و خشک بودن آنان اطمینان حاصل کنیم تا در حین الک کردن سبب مسدود کردن شبکه‌های الک نگردد . برای این امر مانند شکل ۳-۶ مصالح را در محیط با دمای ۳۲ درجه پهن کرده تا از خشک بودن کامل آنان اطمینان حاصل شود . پس از بررسی آنان و خشک شدن مصالح اقدام به الک کردن مصالح با دستگاه شیکر که در عکس ۳-۷ مشاهده می‌گردد ، شده است و هر یک از مصالح با ابعاد مشخص در ظرفی جداگانه تفکیک می‌گردد .



شکل ۳-۶ خشک کردن مصالح به منظور الک کردن آنان



شکل ۳-۷ الک کردن مصالح و تفکیک در ظروف جداگانه

- قرار دادن مصالح در گرمخانه با دمای ۱۷۰ درجه سانتی گراد به مدت ۲۴ ساعت (شکل ۳-۸)



شکل ۳-۸ گرمخانه به منظور خشک کردن مصالح

- قرار دادن قیر در گرمخانه به مدت یک ساعت در دمای ۱۵۵ درجه سانتی گراد (شکل ۳-۹)
- برای ساخت چندین نمونه به جهت جلوگیری از پیر شدگی قیر، آنان را وزن کشی کرده و در فاصله‌های نیم ساعتی در درون گرمخانه قرار داده تا هر ظرف قیر تنها مدت یک ساعت درون گرمخانه قرار گیرد .



شکل ۳-۹ گرمخانه مخصوص گرم کردن قیر و شماره گذاری ظروف قیر

- آماده سازی قالب ها و قرار دادن در گرمخانه به منظور هم دما شدن با مصالح (شکل ۳-۱۰)



شکل ۳-۱۰ قالب های مارشال مخصوص ساخت نمونه

- اختلاط قیر و سنگدانه ها به میزان لازم و مخلوط کردن به مدت مشخص توسط همزن در دمای کنترل شده

مصالح سنگی را از گرمخانه خارج کرده و درون ظرف میکسر ریخته (۱۲۰۰ گرم برای نمونه مارشال) اکنون ترازو را صفر کرده و قیر گرم شده را نیز از گرمخانه خارج نموده و توسط ترازو به مقدار مورد نیاز به مصالح اضافه می نماییم ، که در شکل ۳-۱۱ مشاهده می گردد . سپس مصالح و قیر توسط همزن (شکل ۳-۱۲) مخلوط می گردد تا قیر به صورت کامل مصالح سنگی را پوشش دهد .



شکل ۳-۱۲ دستگاه همزن قیر و سنگدانه



شکل ۳-۱۱ اختلاط قیر و سنگدانه

به منظور حفظ دمای مخلوط در حین اختلاط از یک هیتر که در شکل ۳-۱۳ مشاهده می‌گردد ، استفاده کرده تا با قرارگیری آن در زیر ظرفی که قیر و سنگدانه در حال اختلاط هستند ، دمای مخلوط ثابت باشد .



شکل ۳-۱۳ هیتر گرم کردن ظرف اختلاط

- ریختن مصالح ترکیب شده با قیر در قالب روغن زده (به منظور جلوگیری از چسبیدن مصالح به بدنه‌ی قالب و خارج شدن راحت تر و بدون آسیب نمونه پس از تراکم) ، همانند شکل ۳-۱۴ و متراکم کردن مصالح با چکش مارشال به تعداد ۷۵ ضربه در هر طرف (شکل ۳-۱۵)



شکل ۳-۱۵ دستگاه چکش مارشال



شکل ۳-۱۴ روغن کاری قالب‌ها

- خارج کردن نمونه‌ها با جک مخصوص (شکل ۳-۱۶) پس از سرد شدن
برای این منظور باید نمونه‌ها مدتی در دمای محیط باشند و بعد از سرد شدن اقدام به خارج کردن آنان از قالب کرد تا منجر به پاشیدگی و تخریب نمونه نشود.



شکل ۳-۱۶ جک خارج کردن نمونه از قالب مارشال

۳-۳-۲ نمونه حاوی باطله زغال سنگ

برای ساخت این نوع نمونه ۲۰، ۴۰ و ۶۰ درصد از باطله زغال سنگ را به صورت حجمی با سنگدانه‌ها جایگزین کرده‌ایم و فرآیند ساخت نمونه شبیه نمونه با سنگدانه معمولی می‌باشد و فقط درصد قیر مصرفی متفاوت می‌باشد. دانه بندی مصالح و ترکیب آن‌ها با باطله زغال سنگ به شرح جدول ۳-۶ می‌باشد.

جدول ۳-۶ دانه بندی نمونه حاوی باطله زغال سنگ

سایز الک (اینچ)	۲۰ درصد باطله	مصالح آهکی	۴۰ درصد باطله	مصالح آهکی	۶۰ درصد باطله	مصالح آهکی
۳/۸		۶۰		۶۰		۶۰
۴		۳۰۰		۳۰۰		۳۰۰
۸	۴۷/۸	۲۷۶/۲	۹۵/۷	۲۲۸/۳	۱۴۳/۵	۱۸۰/۵
۱۶	۲۳	۱۳۳	۴۶/۱	۱۰۹/۹	۶۹/۱	۸۶/۹
۳۰	۱۹/۵	۱۱۲/۵	۳۹	۹۳	۵۸/۵	۷۳/۵
۵۰	۱۰/۶	۶۱/۴	۲۱/۳	۵۰/۷	۳۱/۹	۴۰/۱
۱۰۰	۱۰/۶	۶۱/۴	۲۱/۳	۵۰/۷	۳۱/۹	۴۰/۱
۲۰۰	۵/۳	۳۰/۷	۱۰/۶	۲۵/۴	۱۵/۹	۲۰/۱
pan	۱/۷	۴۰/۹	۱۴/۲	۳۳/۸	۲۱/۳	۲۶/۷
مجموع	۱۲۰۰	۱۲۰۰	۱۲۰۰	۱۲۰۰	۱۲۰۰	۱۲۰۰

۳-۳-۳ نمونه حاوی ضایعات روغن

ابتدا روغن ضایعاتی را به همراه قیر در گرمخانه به مدت یک ساعت قرار داده تا هر دو به میزان ۱۵۵ درجه گرم گردند. سپس به میزان ۵ درصد وزن قیر، روغن به قیر اضافه شده است و ترکیب این دو را در مخلوط کن دور بالا (هایشیر) ریخته و به مدت ۲۰ دقیقه با دور ۳۰۰۰ rpm (دور در دقیقه) مخلوط شده است. به منظور حفظ شدن دمای قیر اصلاح شده با روغن حین هم زدن از یک ترموستات و هیتر با قابلیت ثابت نگه داشتن دما استفاده شده است.



شکل ۳-۱۷ مخلوط کن دور بالا (high shear)

۳-۳-۴ درصد قیر بهینه

در فرایند ترمیم شدن نمونه‌ی آسفالتی میزان قیر موجود در مخلوط بسیار با اهمیت است زیرا هر چه میزان آن بیشتر باشد قیر به راحتی ترک‌های شکل گرفته به واسطه خرابی را پر می‌نماید. برای بدست آوردن درصد قیر بهینه نمونه‌ها با افزودنی‌های مختلف طبق استاندارد مارشال ASTM-D1559 بهره گرفته و آزمایشات وزن مخصوص، مقاومت مارشال، فضای خالی، روانی، فضای خالی که با قیر پر شده و فضای خالی مصالح سنگی برای هر یک از افزودنی‌ها صورت گرفته و درصد قیر بهینه مختص خود بدست آورده شده است.

۳-۳-۵ آزمایش مقاومت مارشال (ASTM-D1559)

استقامت مارشال یکی از پارامترهای مهم در طراحی مخلوط‌های آسفالتی می باشد. حداکثر مقاومتی که نمونه ساخته شده بر اساس روش مارشال می‌تواند متحمل شود، مقاومت مارشال نامیده می‌شود. برای این آزمون نمونه‌های ساخته شده را شماره گذاری کرده و به ترتیب در داخل دستگاه حمام بنماری (شکل ۳-۱۸) در دمای ۶۰ درجه سانتی گراد به مدت ۳۰ دقیقه قرار داده به گونه‌ای که قرار گرفتن

آنان تحت این دما از ۳۰ دقیقه تجاوز نکند و تمام نمونه‌ها مدت زمان ثابتی در این دما باشند .



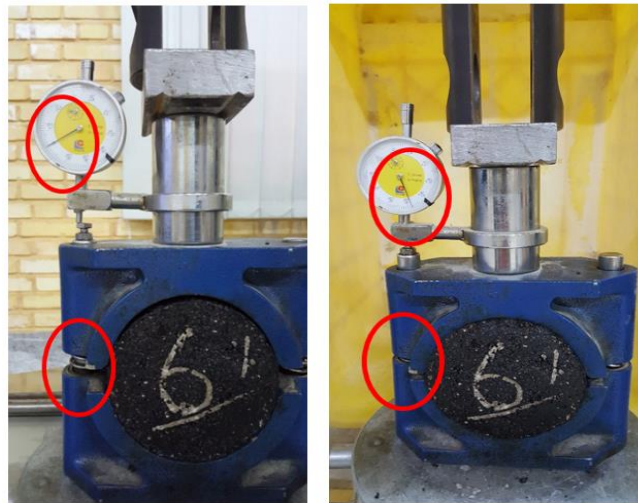
شکل ۳-۱۸ دستگاه حمام بنماری

اکنون بهتر است فک دستگاه را نیز درون گرمخانه گذاشته تا با نمونه‌ها هم دما شود و قسمت‌های متحرک آن قبل از تست روغن کاری شود . برای اعمال بار و تست نمونه‌ها از دستگاه تک محوره یونیورسال (شکل ۳-۱۹) ساخت شرکت zwick/roell آلمان استفاده شده است . این دستگاه می‌تواند حداکثر باری معادل ۱۵ تن را به نمونه اعمال نماید . به منظور تعیین مقدار بار و کرنش متناظر با آن یک نیروسنج (load cell) و یک عدد کرنش سنج (LVDT) به جک دستگاه متصل شده است و با انتقال داده‌ها به کامپیوتر می‌توان داده‌های بارگذاری مربوط به هر نمونه را بدست آورد .



جدول ۳-۱۹ دستگاه تک محوره‌ی یونیورسال (UTM)

با استفاده از نرم افزار مخصوص رابط با دستگاه ابتدا تنظیمات مرتبط با استاندارد آزمایش مارشال را ثبت کرده و سرعت بارگذاری (۵۰/۸ میلی متر بر دقیقه) تنظیم شده است. سپس نمونه را از حمام بنماری خارج و درون فک مخصوص آزمایش مارشال قرار داده و با استفاده از فیکسچرهایی این فک در زیر محور دستگاه UTM قرار داده شده است. با پایین آمدن جک به نمونه بار وارد شده و فک‌های دستگاه به یکدیگر نزدیک تر می‌گردد که منجر به تغییر عقربه کرنش سنج می‌گردد. این جابجایی سبب تغییر شکل نمونه می‌گردد که می‌توان در شکل ۳-۲۰ مشاهده نمود.



شکل ۳-۲۰ قرارگیری نمونه در فک آزمایش مارشال قبل از بارگذاری (سمت چپ) و بعد از

بارگذاری (سمت راست)

پس از اتمام بارگذاری نرم افزار با توجه به داده‌های ثبت کرده یک فایل خروجی ارائه می‌دهد که شامل مقدار مقاومت و کرنش نمونه در هر لحظه می‌باشد و بر اساس آن نموداری رسم می‌گردد. آزمایش مقاومت مارشال به عنوان تنها معیار برای پایداری نمونه محسوب نمی‌گردد بلکه به منظور بررسی پایداری کامل آن باید روانی نیز بررسی گردد.

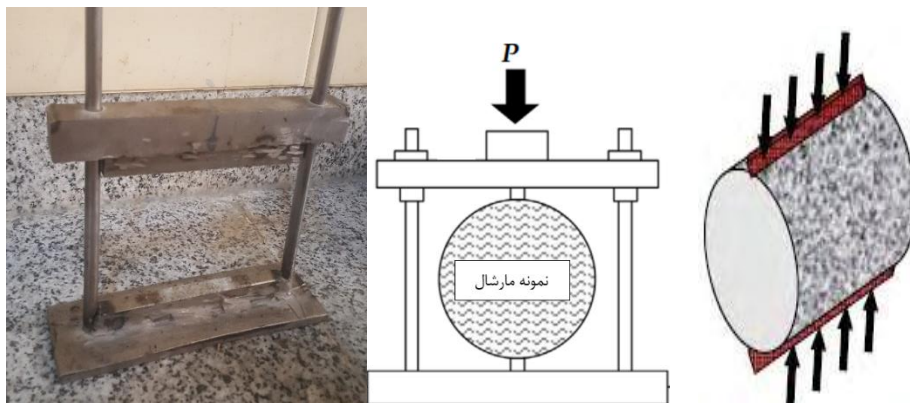
۳-۳-۶ شاخص مارشال (MQ)

روانی یا تغییر شکل نسبی به مقدار فشردگی نمونه تحت بار اطلاق می‌گردد که هر چه تغییر شکل

آسفالت بیشتر باشد روانی آن تحت بار بیشتر است. اگر استقامت مارشال (kN) را بر میزان روانی (mm) تقسیم نماییم به مقدار حاصله خارج قسمت مارشال یا شاخص مارشال MQ (KN/mm) گفته می‌شود. مقدار MQ معیاری برای مقاومت مخلوط در برابر تغییر شکل‌های ماندگار در طول خدمت و سرویس دهی خود می‌باشد که هر چه بیشتر باشد نشان دهنده مخلوطی سفت و مقاوم تر در برابر تنش‌های برشی و تغییر شکل‌های دائمی می‌باشد. از مقدار شاخص مارشال می‌توان برای مقاومت شیار شدگی نیز استفاده کرد که در طراحی‌ها باید به دنبال بیشترین مقاومت و روانی در حد تعریف آیین نامه بود.

۷-۳-۳ آزمایش کشش غیر مستقیم لاتمن اصلاح شده

آزمایش کشش غیر مستقیم لاتمن اصلاح شده برای بررسی مقاومت کششی نمونه آسفالتی صورت می‌گیرد که بر اساس استاندارد AASHTO T283 انجام شده است. قالب مربوط به این آزمایش که در شکل ۲۱-۳ مشاهده می‌گردد به گونه‌ای است که نمونه بر روی دو تیغه فلزی قرار گرفته و بار در راستای قطر دایره‌ای نمونه مارشال اعمال می‌گردد و باعث نصف شدن نمونه از وسط می‌گردد.



شکل ۲۱-۳ قالب آزمایش کشش غیر مستقیم

این آزمایش در دمای محیط (۲۵ درجه) صورت می‌گیرد و پس از اتمام آزمون دستگاه یک نیرو (N) به عنوان خروجی ارائه می‌دهد که بر اساس رابطه زیر می‌توان مقدار مقاومت کششی را بدست آورد.

$$ITS = \frac{2000P}{\pi h d}$$

رابطه‌ی ۱-۳

در این رابطه P (N) حداکثر نیروی متحمل شده ، h و d به ترتیب ارتفاع و قطر نمونه (mm) و ITS مقدار مقاومت کششی (KPa) می باشد .

۳-۳-۸ آزمایش حساسیت رطوبتی

گرچه عامل اصلی خرابی روسازی‌ها بار های ترافیکی و تغییرات دما می باشد اما حضور رطوبت می‌تواند عوامل فوق را تحریک کرده و اثر آنان را تشدید کند و آسیب پذیری روسازی را افزایش دهد [۴۲]. زمانی که مخلوط‌های آسفالتی در حضور آب مقاومت و دوام خود را از دست بدهند خرابی رطوبتی رخ می‌دهد . با وجود اینکه عوامل زیادی در عریان شوندگی مصالح نقش دارند اما مهم ترین عامل آن وجود آب می باشد و با وجود اینکه تلاش‌های زیادی برای جلوگیری از نفوذ آب می‌شود اما آب بند کردن آن به طور کامل هم امری اجتناب ناپذیر است . از جمله عواملی که می تواند سبب عریان شدگی شود می‌توان به فشار منفذی (در شرایط زهکشی نشده موجب شکستن لایه قیری اطراف سنگدانه و نفوذ آب می‌شود) ، شرایط محیطی ، جداسدگی (لایه نازک آب دور سنگدانه باعث جدایی قیر و سنگدانه می‌شود) و جابجایی (عدم پوشش کامل سنگدانه توسط قیر و نفوذ آب) اشاره کرد [۴۳]. حساسیت رطوبتی به وسیله‌ی آزمایشی با استاندارد AASHTO T283 سنجیده می‌شود . در این آزمایش طبق رابطه‌ی ۲-۳ نسبت مقاومت کششی نمونه اشباع به نمونه‌ی خشک به عنوان معیار حساسیت رطوبتی (TSR) بیان می‌گردد .

$$TSR = 100 \times \frac{ITS_{wet}}{ITS_{dry}}$$

رابطه ۲-۳

در رابطه فوق ITS_{wet} میانگین مقاومت کششی نمونه‌های شرایطی و اشباع و ITS_{dry} میانگین مقاومت کششی نمونه‌های خشک می‌باشد و معیار TSR به عنوان شاخصی برای تعیین حساسیت در برابر عریان شدگی می‌باشد، که بر اساس استاندارد AASHTO T283 باید حداقل به مقدار ۷۵ درصد باشد.

به منظور آماده سازی نمونه‌ها برای این آزمایش نیاز است تا طبق استاندارد نمونه‌هایی با درصد هوای ۷ درصد را بسازیم. برای این امر نمونه‌های متعددی با تعداد ضربات متفاوت توسط چکش مارشال ساخته (برای نمونه شاهد و نمونه حاوی باطله زغال سنگ ۳۵ ضربه) و سپس اقدام به سنجش میزان هوای آن کرده و درصد آن ثبت شده است.

ابتدا نمونه‌ها به دو دسته خشک و اشباع دسته بندی کرده و روی آنان با علامت گذاری مشخص شده است. نمونه‌های اشباع به کمک دستگاه وکیوم و محفظه خلا به میزان ۷۰ تا ۸۰ درصد اشباع شده است (شکل ۲-۲۲). نمونه‌ها در فشار خلا ۴۰۰ میلی متر جیوه و با زمان‌های ۳۰ ثانیه تا ۵ دقیقه اقدام به آزمون و خطا به جهت اشباع شدن به مقدار مجاز قید شده در استاندارد شده است. سپس نمونه درون کیسه‌های پلاستیکی قرار گرفته و درب کیسه را به خوبی بسته تا آب به داخل آن نفوذ نکند.



شکل ۳-۲۲ دستگاه وکیوم به منظور اشباع کردن نمونه

کیسه حاوی نمونه را درون کیسه‌ای دیگر گذاشته و درون آن به مقدار ۱۰ میلی لیتر آب ریخته و درب کیسه دوم را بسته (شکل ۳-۲۳) و درون یخچال در دمای ۱۸- درجه سانتی گراد به مدت ۱۶ ساعت قرارداده می‌شود (شکل ۳-۲۴). پس از آن نمونه‌ها را از یخچال خارج کرده و پلاستیک آن را جدا کرده و درون حمام بنماری با دمای ۶۰ درجه به مدت ۲۴ ساعت قرار داده می‌شوند (شکل ۳-۲۵). بعد از خارج کردن نمونه‌ها از حمام بنماری آنان را به مدت ۲ ساعت در آب ۲۵ درجه قرار داده تا آماده آزمون کششی غیر مستقیم گردد.



شکل ۳-۲۵ قرارگیری

نمونه‌ها در حمام آب به

منظور اعمال چرخه ذوب



شکل ۳-۲۴

قرارگیری نمونه‌ها در

یخچال



شکل ۳-۲۳ ریختن آب

درون کیسه پلاستیکی

با سرنگ مدرج

اکنون نمونه‌ها را طبق شکل ۳-۲۶ با فاصله مشخص و به ترتیب در زیر فک دستگاه گذاشته به طوری

که دقیقاً قطر نمونه در راستای اعمال بار باشد. نیروی بدست آمده از این آزمون را در رابطه TSR

گذاشته و حساسیت رطوبتی هر یک از نمونه‌ها مقایسه می‌شود.



شکل ۳-۲۶ فک دستگاه کشش غیر مستقیم و اعمال نیرو در راستای قطر نمونه

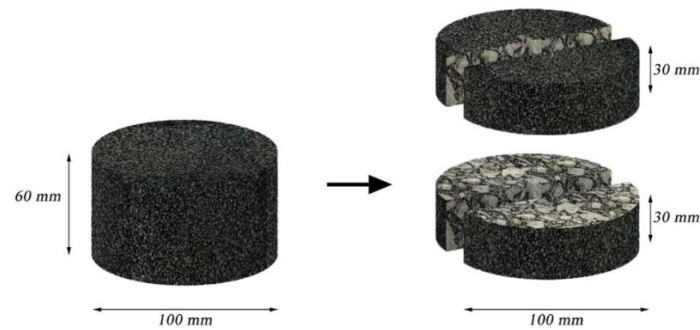
۳-۳-۹ آزمایش خمش سه نقطه ای (نمونه ی scb)

آزمایش‌هایی از ترمیم که مبتنی بر گسیختگی هستند به منظور بررسی مقاومت بازبایی شده پس از

جدایی دو سطح شکسته شده و ترک خورده صورت می‌گیرد. یکی از روش‌های رایج ارزیابی شاخص

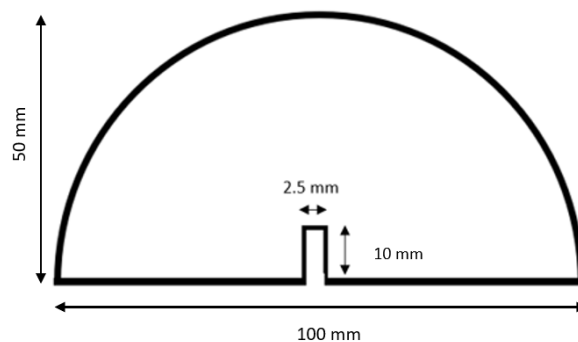
ترمیم آزمایش خمش نمونه های scb می‌باشد که برای ساخت نمونه‌های scb از نمونه‌های مارشال

استفاده شده است و با برش آن از محل ارتفاع و قطر به دو نیمه مساوی ، نمونه‌های نیمه استوانه‌ای ساخته می‌شود ، طوری که همانند شکل ۳-۲۷ از یک نمونه مارشال ۴ نمونه نیمه استوانه‌ای (scb) تولید گردیده است .



شکل ۳-۲۷ برش نمونه مارشال و ساخت نمونه scb

پس از برشکاری نمونه نیاز است تا به منظور یکسان بودن شرایط نمونه‌ها ، ترک ایجاد شده در نمونه‌ها تحت بار خمشی به یک شکل و در یک راستا باشد که برای این همانطور که در شکل ۳-۲۸ ملاحظه می‌گردد از یک شیار در زیر نمونه‌های نیمه استوانه‌ای بهره گرفته شده است .



شکل ۳-۲۸ ایجاد شیار در زیر نمونه scb

برشکاری نمونه های آسفالتی توسط صفحه های برش گرانیات در کارگاه های سنگبری همراه با آب به منظور خنک کردن مقطع برش انجام شده است . همچنین به منظور جلوگیری از جابجایی نمونه حین برش نمونه و دقت در برش شیار زیر نمونه نیمه استوانه ای ، قالب های فلزی ، متناسب با ابعاد نمونه ها ساخته تا عملیات برش با دقت بالایی صورت گیرد (شکل ۳-۲۹) .

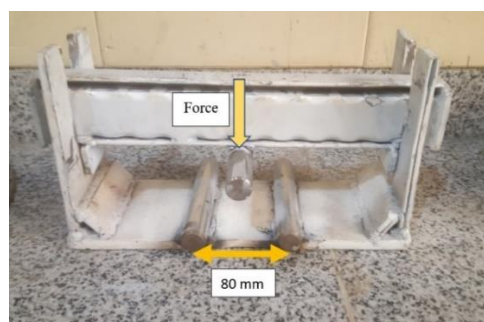


شکل ۳-۲۹ عملیات برشکاری نمونه مارشال به منظور تولید نمونه scb

پس از اتمام عملیات برشکاری نمونه ها به مدت ۲۴ ساعت در محیط رها شده تا رطوبت ناشی حین برشکاری که با آب صورت می گیرد خشک گردد . اکنون نمونه ها آماده برای آزمون خمش سه نقطه ای شده اند . به منظور این آزمایش از یک دستگاه تک محوری (شکل ۳-۳۰) بهره گرفته که جابه جایی قائم آن ، به وسیله یک عدد کرنش سنج (LVDT) با قابلیت اندازه گیری حداکثر ۱۰۰ میلی متر و با دقت ۰,۰۱ میلی متر اندازه گیری شده است . پس از قرارگیری نمونه در زیر جک دستگاه خمش سه نقطه ای (شکل ۳-۳۱) بار وارده به وسیله یک نیروسنج ۵ تنی با دقت ۰,۱۵ کیلوگرم اندازه گیری شده [۱۲] و داده های ثبت شده به وسیله یک دیتالاگر ۸ کاناله به کامپیوتر منتقل شده است (شکل ۳-۳۲) . اطلاعات خروجی کامپیوتر ، در نرم افزار Vira data soft ثبت و پردازش می شوند . در این نرم افزار برای هریک از سنسورها ، کانالی مجزا اختصاص داده شده که می توان کالیبره کردن سنسور را در آن کانال انجام داد و پارامترهای لازمه را اندازه گیری کرد .



شکل ۳-۳۰ دستگاه خمش سه نقطه‌ای



شکل ۳-۳۱ جک دستگاه خمش سه نقطه‌ای شکل ۳-۳۲ دیتالاگر ثبت داده‌های نیرو و کرنش

پس از کالیبره کردن دستگاه توسط وزنه‌های مشخص و اطمینان از صحت کارکرد سنسورها تنظیمات مربوطه را ذخیره کرده تا برای آزمون سه نقطه‌ای آماده باشد. نمونه‌های نیمه استوانه‌ای مارشال به منظور ایجاد شکست ترد و جلوگیری از تغییر شکل‌های دائمی تحت بار خمشی به مدت ۲۴ ساعت در فریزر در دمای ۲۰- قرار داده شده است [۴۴]. به منظور جلوگیری از جذب رطوبت در فریزر نمونه‌ها نام گذاری و درون کیسه پلاستیکی قرار می‌گیرند. پس از آن نمونه‌ها را به نوبت از فریزر خارج کرده و در زیر فک دستگاه خمش سه نقطه‌ای قرار داده تا دمای خود را از دست ندهند. نمونه را

به طور دقیق در مرکز قالب قرار داده طوری که مرکز نیم دایره منطبق با محور بالایی فک و پایین نمونه در روی دو تکیه گاه پایینی و دقیقا در وسط قرار بگیرد . فاصله تکیه گاه های پایینی فک برابر ۸۰ میلی متر می باشد [۱۸] . در ساخت فک بالایی قالب از مصالحی استفاده شده تا حین تحمل بار ، وزن قابل توجهی نداشته باشد تا سبب بروز تنش و ایجاد بار نشود . نمونه را زیر دستگاه قرار داده و با دکمه های تنظیم کننده فک را منطبق با نمونه کرده سپس سنسورها را در نرم افزار ویرا سافت مجدد صفر کرده و آزمون آغاز شده است . پس از آن از روی دستگاه تک محوری دکمه استارت را زده تا با بالا آمدن جک نمونه تحت بار قرار گیرد . بارگذاری تا جایی که ترک ایجاد شده و باعث شکستن نمونه شود ادامه پیدا می کند. بعد از اتمام آزمون و شکسته شدن نمونه اطلاعات ثبت شده در نرم افزار که از نیروسنج و کرنش سنج ذخیره شده است را در فایل اکسل خروجی گرفته تا داده های کرنش و نیرو را با یکدیگر مرتبط نمود . بلافاصله بعد از اتمام تست دو وجه جدا شده نمونه در کنار هم قرار داده شده تا ترک ایجاد شده تا حد ممکن بسته شود و در محیط رها می شوند . نمونه ها به مدت ۲ ساعت در دمای ۲۰ درجه محیط رها می گردند تا با محیط هم دما شده و رطوبت جذب شده آنان پس از انجماد از دست برود [۴۵] .

۳-۴ گرمایش به وسیله امواج ماکروویو و ترمیم نمونه ها

پس از اتمام آزمون خمش سه نقطه ای و رسیدن نمونه ها به دمای محیط باید توسط امواج ماکروویو دمای نمونه را بالا برد تا با روان شدن قیر باعث بسته شدن ترک ها و ترمیم نمونه شود . برای این پژوهش از یک ماکروویو ۴۰ لیتری سامسونگ با قدرت خروجی ۸۰۰ وات و فرکانس ۲۴۵۰ مگاهرتز استفاده شده است .

نمونه را پس از کنار هم چسبانیدن روی ظرف شیشه ای مخصوص ماکروویو گذاشته تا از جداشدگی و بهم ریختن نمونه بعد از گرمایش جلوگیری شود همچنین ظرف شیشه ای در ماکروویو گرم نمی شود و این عمل باعث بالا رفتن دقت آزمایش و جلوگیری از انتقال گرما از ظرف به نمونه می شود و تنها

افزایش دمای خالص نمونه بررسی می‌گردد . در عمل برای پروژه های میدانی نیز از امواج ماکروویو استفاده می‌شود ولی فقط به منظور تابش این امواج به سطح راه به صورت موثر شکل ظاهری و طراحی آن اندکی متفاوت است و تجهیزات آن بر روی یک خودروی سنگین متحرک (شکل ۳-۳۳) نصب می‌گردد .



شکل ۳-۳۳ ماشین ماکروویو در عملیات میدانی ترمیم

در این پژوهش ۴ زمان مختلف به منظور یافتن دما و زمان بهینه تر، در نظر گرفته شده است و پس از اتمام این زمان دمای نمونه توسط دوربین حرارتی اندازه گیری می‌شود . در این آزمایش از یک دوربین حرارتی ساخت ژاپن با قابلیت اندازه گیری دما تا ۲۰۰۰ درجه سانتی گراد و دقت یک درجه سانتی گراد مدل NEC-AVIO-R300SR-HD استفاده شده است .

به وسیله این دوربین و کادر بندی و تمرکز دوربین بر روی نمونه می‌توان تنها دمای نمونه را به طور دقیق و به صورت لحظه‌ای اندازه گیری کرد و سه خروجی دمای حداکثر ، دمای حداقل و میانگین دمای نمونه را بدست آورد . نمونه را در ماکروویو قرار داده و با فشار جزئی دو وجه جدا شده را به یکدیگر چسبانده سپس ماکروویو را روی زمان ۳۰ ثانیه تنظیم و استارت کرده و برای نمونه‌های بعدی همین عمل با زمان‌های ۶۰ ، ۹۰ و ۱۲۰ ثانیه انجام شده است ، طوریکه نمونه شماره یک با ۳۰ ثانیه تحت

امواج قرار گرفتن به یک دمای مشخص می‌رسد و نمونه چهارم با ۱۲۰ ثانیه به دمایی بالاتر می‌رسد . پس از اتمام زمان ماکروویو دمای نمونه توسط دوربین حرارتی ثبت و عکس گرافیکی دمای سطح نمونه ذخیره می‌گردد تا به صورت کامل تمام سطح نمونه مورد بررسی قرار گیرد . هم چنین به دلیل ثبت دما به صورت لحظه‌ای و نداشتن تاخیر توسط دوربین حرارتی از کاهش دمای نمونه حین اندازه‌گیری دما جلوگیری شده است زیرا در هنگام ثبت دما توسط دماسنج‌های دستی و الکترونیکی تا رسیدن دماسنج به دمای نمونه و هم دما شدن ، لحظاتی طول می‌کشد که در این مدت دمای نمونه با سرعت زیادی کاهش می‌یابد و سبب بروز خطا در آزمایش می‌شود .



شکل ۳-۳۴ اندازه‌گیری دمای نمونه توسط دوربین حرارتی

پس از بیرون آوردن نمونه از ماکروویو باید توسط یک قالب یا کش فشار ناچیزی به نمونه وارد کرد تا دو قطعه جدا شده از یکدیگر جدا نشود و قیر روان شده ترک مابین آنان را پر کرده و سبب ترمیم شود . به منظور تامین این فشار از کش‌های یک اندازه با ضخامت یک سانت استفاده شده است (شکل ۳-۳۵) و نیرویی که با توجه به کشیده شدن آنان بر نمونه وارد می‌شود ، توسط نیرو سنج و با کشیدن کش به میزان مورد نیاز برای قرار گرفتن در اطراف نمونه کنترل شده است .



شکل ۳-۳۵ اعمال فشار ناچیز به نمونه‌ی گرمایش یافته توسط کش

نمونه‌ها پس از محصور شدن توسط کش‌ها و کنار هم قرار گرفتن دو قطعه‌ی جدا شده آنها، به مدت ۲۴ ساعت در دمای ۲۵ درجه سانتی گراد محیط قرار گرفته تا نمونه استراحت کرده و ترک به خوبی ترمیم شود. مدت زمان ۲۴ ساعت به خاطر رعایت احتیاط به منظور استراحت کامل و ترمیم یافتن کامل می‌باشد زیرا در مقالاتی که زمان استراحت به میزان ۳ ساعت تغییر یافته بود ترمیم خستگی تنها به میزان ۶۰ درصد نسبت به زمانی که نمونه ۲۴ ساعت استراحت کرده بود به وقوع پیوسته بود [۱۹].

پس از اتمام زمان استراحت کش محصور کننده نمونه‌ها را باز کرده و نمونه را درون کیسه پلاستیکی قرار داده، سپس کیسه حاوی نمونه نام گذاری شده و درون فریزر با دمای ۲۰- قرار گرفته است و پس از آن مجدد آزمون خمش سه نقطه‌ای توسط دستگاه تک محوری صورت می‌گیرد. این فرآیند تا ۷ سیکل تکرار می‌گردد که البته در برخی از نمونه‌ها به دلیل افزایش دما و از هم پاشیدگی نمونه قبل از ۷ سیکل نمونه مقاومتی نشان نمی‌دهد و از ادامه آزمایش حذف می‌گردد. پس از اتمام آزمون‌ها در سیکل‌های مختلف اقدام به ذخیره داده‌ها در نرم افزار کرده و خروجی داده‌ها را در قالب فایل اکسل خروجی می‌گیریم.

فصل چهارم:

بررسی و تحلیل نتایج

۴-۱ مقدمه

در این فصل بر مبنای نتایج بدست آمده از آزمایش‌هایی که در فصل قبل شرح داده شد به بررسی سه نوع مخلوط آسفالتی پرداخته شده است. در ابتدا نتایج مربوط به تعیین درصد قیر بهینه برای هر سه نوع مخلوط شرح داده شده است.

در ادامه نتایج آزمایش خمشی سه نقطه ای طبق استاندارد ASTM D8044 به منظور بررسی مقاومت خمشی نمونه در صورت افزودن باطله زغال سنگ و روغن ضایعات خوراکی شرح داده شده است و سپس با انجام فرآیند ترمیم توسط ماکروویو داده‌های دمایی و نرخ ترمیم برای هر یک از مخلوط‌های آسفالتی ذکر شده است. به منظور بررسی حساسیت رطوبتی نمونه‌ها آزمایش حساسیت رطوبتی با سیکل ذوب و یخ (AASHTO T283) صورت گرفته است و مقادیر مربوطه ثبت شده است.

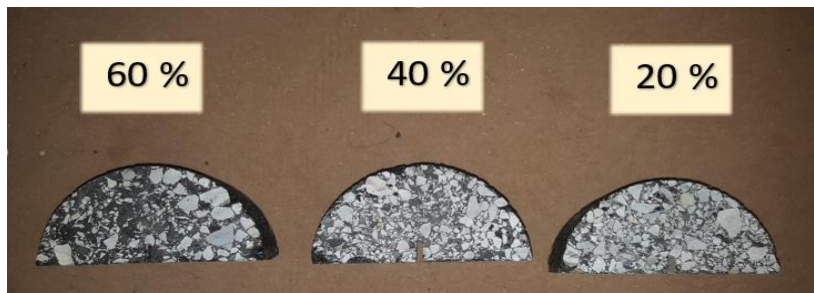
در جدول ۴-۱ انواع مخلوط‌های آسفالتی، که با ترکیبات مختلفی ساخته شده است شرح داده شده است.

جدول ۴-۱ ترکیبات استفاده شده در پژوهش به عنوان افزودنی

نام نمونه	ترکیب افزودنی ها
L (lime)	نمونه شاهد با مصالح آهکی
C20	نمونه حاوی ۲۰ درصد باطله زغال جایگزین شده با ریز دانه
C40	نمونه حاوی ۴۰ درصد باطله زغال جایگزین شده با ریز دانه
C60	نمونه حاوی ۶۰ درصد باطله زغال جایگزین شده با ریز دانه
Oil	نمونه ساخته شده با قیر اصلاح شده با روغن ضایعاتی

شایان ذکر است که جایگزینی باطله های زغال سنگ به جای مصالح آهکی ریزدانه به صورت حجمی

صورت گرفته است . در شکل ۴-۱ برشی از نمونه‌ی آسفالتی با سه درصد مختلف باطله زغال سنگ مشاهده می‌شود ، که با توجه به رنگ تیره تر زغال سنگ نسبت به مصالح آهکی می توان یکنواختی توزیع آن در سطح نمونه را بررسی نمود .



شکل ۴-۱ برشی از نمونه‌ها با درصد‌های مختلف باطله‌ی زغال سنگ

۴-۲ درصد قیر بهینه

درصد قیر بهینه مخلوط‌های آسفالتی بر اساس وزن مخصوص حقیقی ، درصد هوا ، فضای خالی مصالح ، مقاومت مارشال و روانی برگزیده شده است . به منظور مختصر نمودن نتایج تنها روند محاسبه‌ی این درصد به علاوه‌ی محاسبات و نمودارهای آن برای نمونه حاوی ۶۰ درصد باطله زغال سنگ شرح داده شده است و بقیه ترکیبات با روندی کاملاً مشابه بدست آمده است . برای هر ترکیب سه نمونه به منظور تکرار آزمایش ساخته و مورد آزمایش قرار داده شده است و در نهایت میانگین این سه تکرار به عنوان عدد نهایی ثبت شده است . نتایج بدست آمده در جدول ۴-۲ درج شده است .

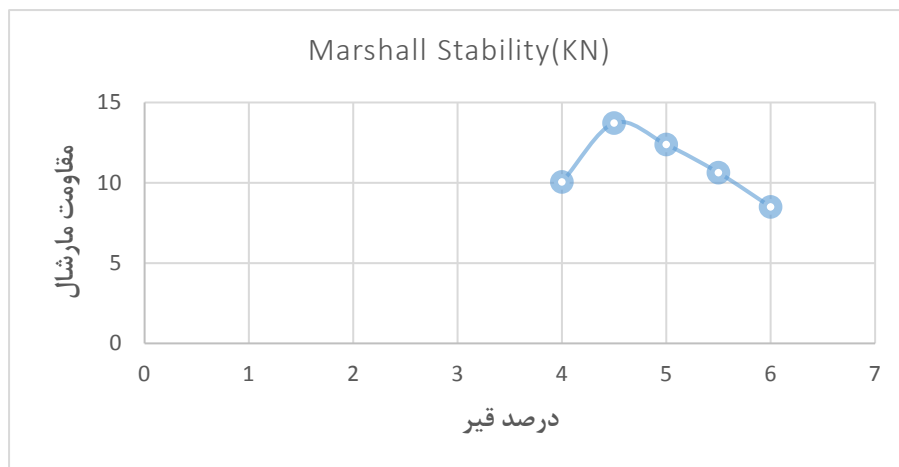
جدول ۴-۲ درصد قیر بهینه برای هر یک از ترکیبات

نام نمونه	درصد قیر بهینه
L	۴/۸۶
C20	۴/۶۹
C40	۴/۵۳
C60	۴/۳۷
Oil	۴/۸۰

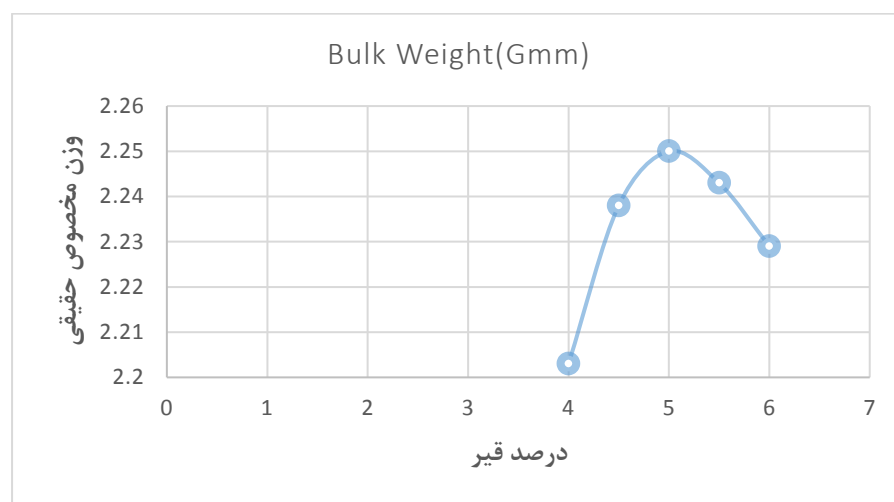
برای بدست آوردن مقدار درصد قیر بهینه ابتدا به ازای هر ترکیب ۵ نمونه با درصد قیرهای مختلف ساخته شده است و مقادیر مقاومت مارشال (شکل ۴-۲) ، حداکثر وزن مخصوص نمونه ، وزن مخصوص حقیقی نمونه (شکل ۴-۳) و درصد هوای نمونه (شکل ۴-۴) برای هر یک بدست آمده است که در جدول ۴-۳ ثبت شده است و بر اساس این مقادیر نمودارها را رسم کرده تا بتوان درصد قیر بهینه را برگزید .

جدول ۴-۳ مشخصات نمونه حاوی ۶۰ درصد باطله ی زغال سنگ با درصد های مختلف قیر

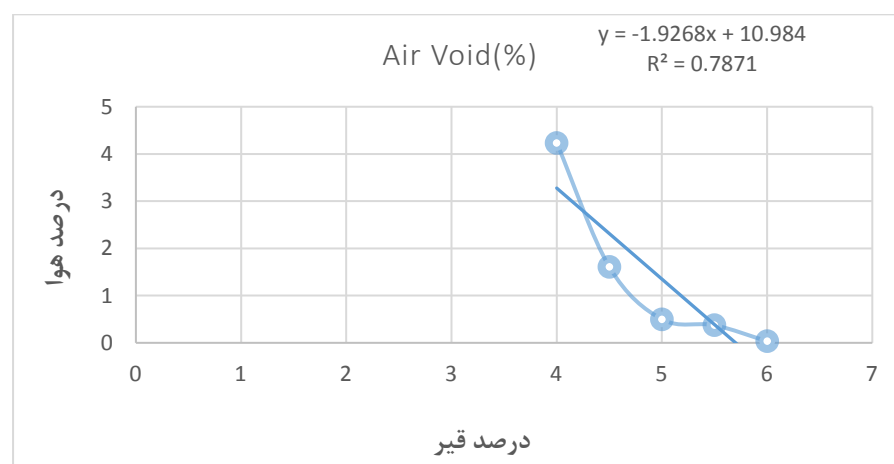
درصد قیر	Gmb	Gmm	Pa %	استقامت مارشال اصلاح شده (kN)
۴	۲/۲۰	۲/۳۰	۴/۲۳	۱۰/۰۵
۴/۵	۲/۲۳	۲/۲۷	۱/۶۰	۱۳/۷۱
۵	۲/۲۵	۲/۲۶	۰/۴۹	۱۲/۳۷
۵/۵	۲/۲۴	۲/۲۵	۰/۳۷	۱۰/۶۲
۶	۲/۲۲	۲/۲۲	۰/۰۳	۸/۴۹



شکل ۲-۴ نمودار مقاومت مارشال نمونه حاوی ۶۰ درصد باطله با درصدهای قیر مختلف



شکل ۳-۴ نمودار وزن مخصوص حقیقی نمونه حاوی ۶۰ درصد باطله با درصدهای قیر مختلف



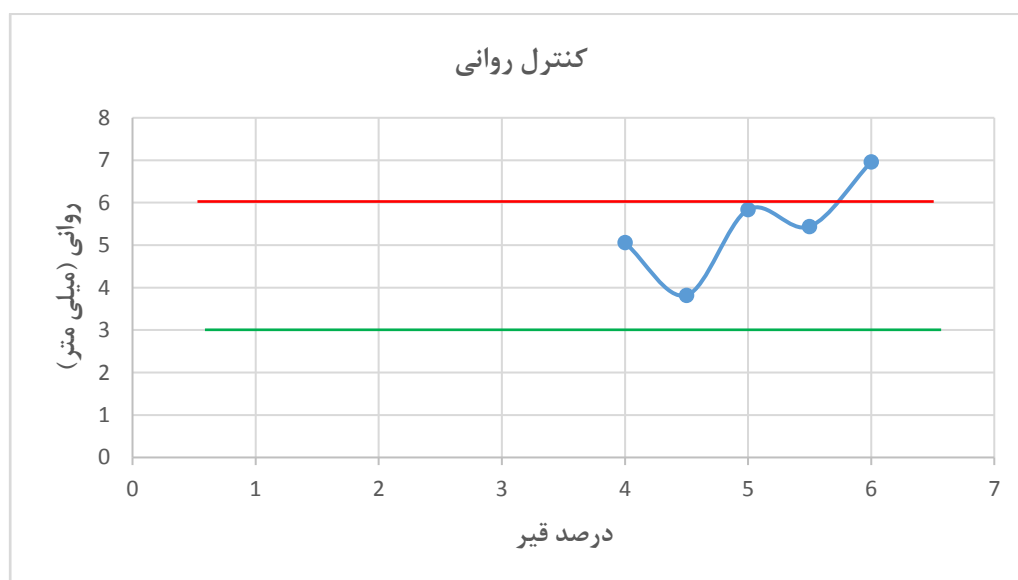
شکل ۴-۴ نمودار درصد هوای نمونه حاوی ۶۰ درصد باطله با درصدهای قیر مختلف

با توجه به نمودارهای فوق از هریک از داده‌ها یک درصد بهینه برای قیر بدست می‌آید که با میانگین گیری از میان این داده‌ها میزان درصد قیر بهینه بدست می‌آید. نقاطی از نمودار که در آن درصد قیر، مقاومت مارشال و وزن مخصوص حداکثر شده است و درصد هوا برابر ۴ درصد می‌باشد، نقاط بهینه می‌باشند که در جدول ۴-۴ میانگین این درصد ها ثبت شده و درصد قیر بهینه نهایی درج شده است.

جدول ۴-۴ میانگین درصد قیر بهینه برای نمونه C۶۰

معیار انتخاب بر اساس	درصد قیر بهینه باتوجه به معیار
حداکثر مقاومت مارشال	۴/۵
درصد هوا	۳/۶۲
وزن مخصوص حقیقی	۵
درصد قیر بهینه (میانگین سه معیار فوق)	۴/۳۷

سپس مقدار درصد فوق در نمودار حد روانی نیز بررسی گردیده تا شرایط لازم به لحاظ روانی را نیز تامین کند. همانطور که در شکل ۴-۵ مشاهده می‌شود درصد قیر بهینه (۴/۳۷) در بین روانی ۳ تا ۶ میلی‌متر می‌باشد و مورد تایید است.



شکل ۴-۵ کنترل روانی نمونه C۶۰ در نقطه‌ی درصد قیر بهینه

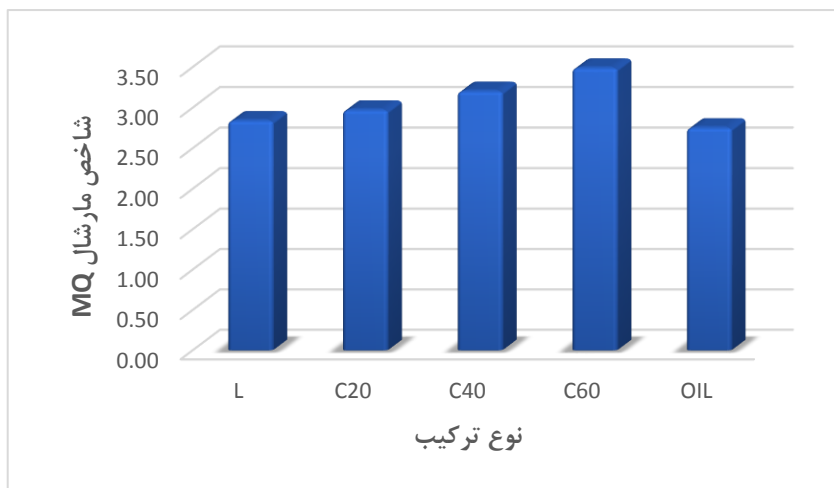
۳-۴ نتایج آزمایش شاخص مارشال

شاخص مارشال مقداری است که از تقسیم مقاومت مارشال (کیلو نیوتن) بر میزان روانی (میلی متر) بدست می آید و از این مقدار می توان به سختی نمونه و همچنین مقاومت آن در برابر شیار شدگی پی برد . برای بدست آوردن این نتایج اقدام به ساخت نمونه های استوانه ای مارشال کرده و مطابق با استاندارد ASTM D1559 اقدام به آزمایش شده است . این نتایج در جدول ۴-۵ جمع آوری شده است .

جدول ۴-۵ نتایج شاخص مارشال

نام نمونه	مقاومت مارشال (KN)	روانی (mm)	شاخص مارشال (MQ)
L	۱۱/۲۶	۴/۲۱	۲/۸۴
C20	۱۳/۰۸	۴/۴۰	۲/۹۷
C40	۱۳/۲۳	۴/۱۳	۳/۲۰
C60	۱۳/۸۲	۳/۹۶	۳/۴۹
Oil	۱۰/۹۶	۳/۹۸	۲/۷۵

با توجه به این نتایج با رسم نمودار شاخص مارشال مربوط به هر یک از ترکیبات که در شکل ۴-۶ رسم شده است ، مشاهده می شود که افزودن باطله زغال سنگ به مخلوط آسفالتی سبب سخت تر شدن آن و مقاومت بیشتر آن تحت شیار شدگی می شود و هرچه درصد باطله افزایش یافته است میزان شاخص مارشال نیز افزایش یافته است ؛ اما افزودن روغن ضایعاتی به قیر سبب کاهش سختی نمونه شده است و شاخص مارشال نسبت به نمونه شاهد کاهش یافته است .



شکل ۴-۶ نمودار شاخص مارشال ترکیبات

۴-۴ آزمایش خمشی سه نقطه‌ای و بررسی میزان ترمیم

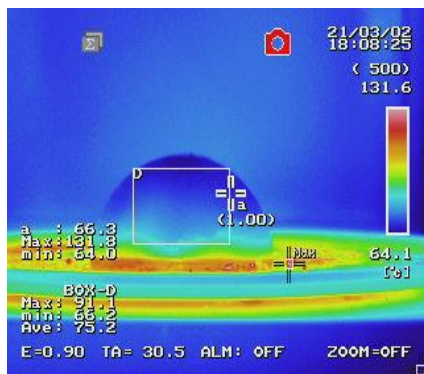
در این بخش به بررسی مهم ترین قسمت این پژوهش پرداخته شده است که نتیجه‌ی اصلی آن بدست آوردن میزان نرخ ترمیم مخلوط‌های آسفالتی برای هر یک از ترکیب‌ها می‌باشد. هر چه میزان نرخ ترمیم یک نمونه بیشتر باشد نشان دهنده‌ی بهبود بهتر آن نمونه بعد از رخ دادن ترک می‌باشد که این ترمیم توسط گرمایش نمونه صورت گرفته است.

یکی دیگر از پارامترهایی که در ترمیم حائز اهمیت می‌باشد دمای ترمیم می‌باشد. به منظور رخ دادن فرآیند ترمیم باید دمای قیر بالا رفته تا بتواند به صورت روان درآید و ترک‌های ایجاد شده در نمونه را ترمیم نماید. این دما بسته به نوع قیر و افزودنی‌های به کار برده شده در آن متفاوت خواهد بود. در این بین برای هر نوع مخلوط آسفالتی دمایی که در آن بیشترین نرخ ترمیم رخ می‌دهد به عنوان دمای بهینه‌ی ترمیم نامیده می‌شود. برای هر یک از ترکیب‌های مورد بررسی ابتدا با توجه به مشخصات مصالح آن ترکیب نمونه‌ی استوانه‌ای مارشال ساخته و سپس با برشکاری این استوانه به چهار نمونه‌ی نیم دایره ای (scb) تبدیل شده است و با انجام آزمایش بر روی این چهار نمونه می‌توان به عنوان تکرار استفاده کرد.

آزمایش خمش سه نقطه‌ای به منظور بدست آوردن مقاومت خمشی نمونه طبق استاندارد ASTM D8044 انجام گرفته است . به منظور محاسبه‌ی نرخ ترمیم یک نمونه ابتدا مقاومت خمشی آن بعد از آزمون تحت دستگاه تک محوری و به کمک قالب خمش سه نقطه‌ای انجام و ثبت شده است و پس از آن نمونه در دمای محیط رها شده و با اطمینان از نداشتن رطوبت درون ماکروویو قرار گرفته است . برای هر ترکیب چهار نمونه در نظر گرفته و هر یک تحت زمان مختلف در ماکروویو قرار گرفته است . زمان‌های مورد استفاده در این پژوهش برای مخلوط آسفالتی تحت امواج ماکروویو ۳۰ ، ۶۰ ، ۹۰ و ۱۲۰ ثانیه می‌باشد تا مقدار ترمیم و دمای متناظر با آن برای هر یک از ترکیب ها بدست آید . بعد از گرمایش نمونه تحت امواج ماکروویو و ترد شدن نمونه در فریزر برای بار دوم نمونه تحت آزمون خمش سه نقطه‌ای قرار گرفته است و به صورت مشابه با حالت اول این فرآیند تا ۷ دوره (سیکل) تکرار شده است . رابطه ۴-۱ مقدار حاصل از تقسیم مقاومت نمونه بعد از ترمیم به مقاومت اولیه آن می‌باشد که بیانگر نرخ ترمیم در آن سیکل می‌باشد .

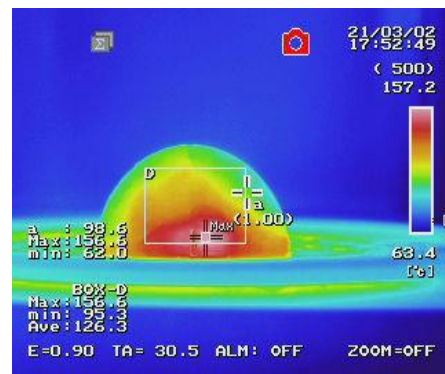
$$\text{رابطه ۴-۱} \quad \text{مقاومت نمونه در سیکل } i \quad \div \quad \text{مقاومت اولیه نمونه} = \text{نرخ ترمیم در سیکل } i \text{ ام}$$

در حین انجام فرآیند ترمیم برای هر زمان مشخص دمای نمونه را توسط دوربین حرارتی اندازه گرفته و میانگین دمای سطح نمونه ثبت شده است . همچنین با تصاویر ثبت شده از دوربین می توان تا حد زیادی نحوه توزیع افزودنی ها را در سطح نمونه بررسی کرد به طور مثال در عکس ۴-۷ که مربوط به نمونه‌ی حاوی باطله زغال سنگ می باشد ، مشاهده می شود سطح کل نمونه به طور کاملاً یکنواخت هم دما نیست و برخی نقاط که باطله در آنجا حضور دارد دارای دمای بالاتری است که در عکس به رنگ قرمز مشخص شده است ولی در شکل ۴-۸ نمونه‌ی حاوی روغن ضایعات خوراکی به دلیل اینکه روغن با قیر قبل از ساخت نمونه مخلوط شده تقریباً دمای سطح نمونه یکنواخت می باشد .



شکل ۴-۸ گرمایش نمونه حاوی روغن

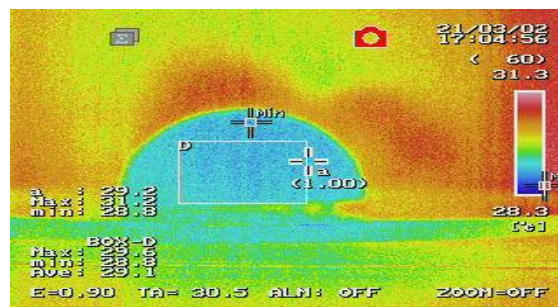
ضایعاتی



شکل ۴-۷ گرمایش نمونه حاوی باطله زغال

سنگ

هم چنین عکس ۴-۹ مربوط به نمونه‌ی شاهد با مصالح آهکی می باشد که نشان می دهد این نمونه چندان گرم نشده است .



شکل ۴-۹ عکس گرمایش نمونه شاهد آهکی

۴-۵ محاسبات مقاومت خمشی و نرخ

جدول ۴-۶ ترمیم سیکل اول

ترمیم

سیکل اول		
نمونه	زمان (s)	ترمیم %
C20-1	۳۰	۱۶/۷۲
C20-2	۶۰	۴۱/۸۸
C20-3	۹۰	۵۰/۷۵
C20-4	۱۲۰	۱۶/۳۲
C40-1	۳۰	۲۸/۵۶
C40-2	۶۰	۴۸/۷۱
C40-3	۹۰	۴۱/۱۸
C40-4	۱۲۰	۳۱/۱۹
C60-1	۳۰	۴۰/۱۷
C60-2	۶۰	۳۶/۹۶
C60-3	۹۰	۳۲/۰۷
C60-4	۱۲۰	۱۱/۱۹
C60-5	۱۵	۲۶/۳۶
LM-1	۳۰	۶/۱۵
LM-2	۶۰	۷/۴۳
LM-3	۹۰	۷/۵۳
LM-4	۱۲۰	۱۰
Oil-1	۳۰	۳۳/۳۴
Oil-2	۶۰	۳۳/۳۴
Oil-3	۹۰	۵۴/۲۵
Oil-4	۱۲۰	۳۸/۲۱

محاسبات مربوط به مقاومت خمشی نمونه‌ها و میزان نرخ ترمیم

آنان در سیکل‌های مختلف به شرح زیر می‌باشد .

۴-۵-۱ سیکل اول :

همانطور که در جدول ۴-۶ مشاهده می‌شود نتایج ترمیم نمونه‌ها

در سیکل اول در زمان‌های مختلف نشان داده شده است . با توجه به

جدول ۴-۷ بیشترین نرخ ترمیم در سیکل اول مربوط به نمونه‌ی

حاوی روغن ضایعاتی خوراکی می‌باشد که برابر ۵۴/۲۵ درصد می‌باشد

و کمترین مقدار مربوط به نمونه‌ی شاهد با مصالح آهکی می‌باشد زیرا

این مصالح قابلیت گرم شدن در ماکروویو را نداشته و دمای آنان با

توجه به این که ۱۲۰ ثانیه تحت امواج ماکروویو بوده اما افزایش زیادی

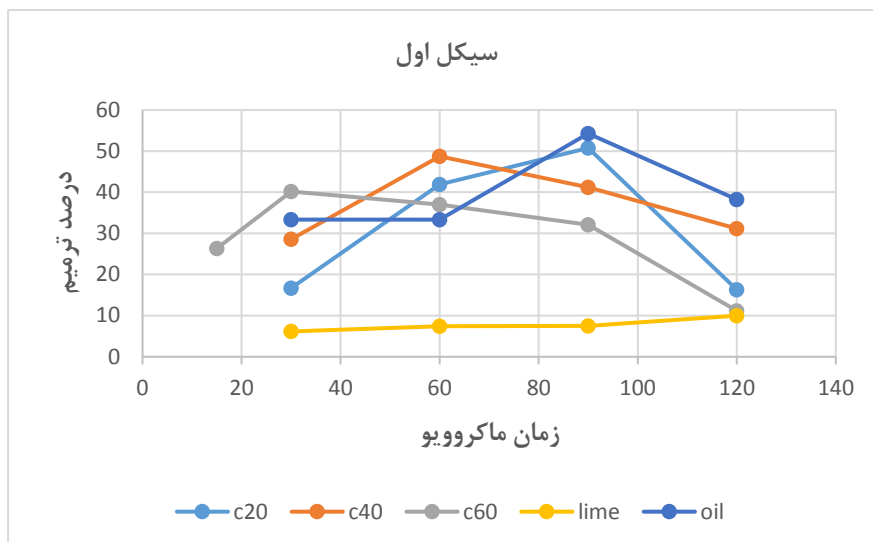
نداشته است تا باعث روانی قیر و در نتیجه ترمیم نمونه شود .

جدول ۴-۷ حداکثر ترمیم در دما و زمان بهینه سیکل اول

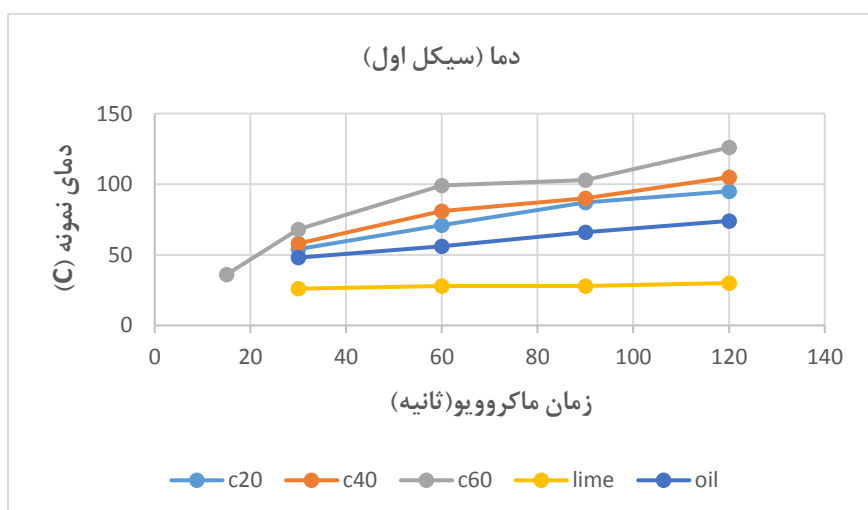
سیکل اول			
نمونه	حداکثر ترمیم %	زمان بهینه ترمیم (ثانیه)	دمای ترمیم حداکثر (°C)
L	۱۰	۱۲۰	۳۰
C20	۵۰/۷۵	۹۰	۸۷
C40	۴۸/۷۱	۶۰	۸۱
C60	۴۰/۱۷	۳۰	۶۷
Oil	۵۴/۲۵	۹۰	۶۶

در صورت افزودن باطله زغال سنگ به نمونه طبق نمودار ترمیم آن در شکل ۴-۱۰ و نمودار دما که در شکل ۴-۱۱ مشاهده می‌شود که نمونه به خوبی امواج ماکروویو را جذب کرده و سبب گرم شدن نمونه شده است و همچنین با افزایش میزان باطله زغال سنگ از ۲۰ درصد به ۶۰ درصد نرخ افزایش دما رشد چشمگیری داشته است ، طوری که نمونه‌ی حاوی ۲۰ درصد باطله در عرض ۳۰ ثانیه ۵۴ درجه سانتی گراد گرم شده است حال آن که نمونه حاوی ۶۰ درصد باطله در این زمان به میزان ۶۷ درجه گرم شده است .

البته شایان ذکر است که بالاتر بودن نرخ افزایش دما در نمونه حاوی ۶۰ درصد زغال دال بر برتری آن در بحث ترمیم نمی‌باشد ، زیرا نمونه حاوی ۲۰ درصد باطله دارای مصالح آهکی بیشتری بوده و مقدار باطله زغال لازم به منظور گرم کردن نمونه را در حد کافی دارا می‌باشد و توانسته در مدت زمان ۹۰ ثانیه باعث رسیدن به دمای ۸۷ درجه سانتی گراد رسیده و با روان شدن قیر حداکثر نرخ ترمیم را رقم بزند .



شکل ۴-۱۰ نمودار ترمیم نمونه‌ها بر حسب زمان ماکروویو در سیکل اول



شکل ۴-۱۱ نمودار دمای نمونه‌ها بر حسب زمان ماکروویو در سیکل اول

۴-۵-۲ سیکل دوم :

جدول ۴-۸ ترمیم سیکل دوم

سیکل دوم		
نمونه	زمان (s)	ترمیم %
C20-1	۳۰	۱۶/۶۷
C20-2	۶۰	۳۴/۹۸
C20-3	۹۰	۴۷/۱۶
C20-4	۱۲۰	۱۶/۰۷
C40-1	۳۰	۲۶/۴۲
C40-2	۶۰	۴۶/۸۱
C40-3	۹۰	۳۷/۵۰
C40-4	۱۲۰	۲۸/۹۰
C60-1	۳۰	۳۵/۳۱
C60-2	۶۰	۳۲/۶۸
C60-3	۹۰	۳۲/۰۷
C60-4	۱۲۰	۰
C60-5	۱۵	۲۳/۴
LM-1	۳۰	۰
LM-2	۶۰	۰
LM-3	۹۰	۵/۷۹
LM-4	۱۲۰	۷/۹۸
Oil-1	۳۰	۳۲/۹۰
Oil-2	۶۰	۳۳/۰۴
Oil-3	۹۰	۵۲/۳۰
Oil-4	۱۲۰	۳۸/۱۳

در نتایج حاصله در سیکل دوم که در جدول ۴-۸ ثبت شده است

ترمیم هر یک از نمونه‌ها در زمان‌های مختلف درج شده است که با

توجه به جدول ۴-۹ حداکثر نرخ ترمیم در بین نمونه‌ها مانند سیکل

اول مربوط به نمونه‌ی حاوی روغن ضایعاتی خوراکی می‌باشد که

برابر ۵۲/۳ درصد می‌باشد و کمترین نرخ ترمیم مربوط به نمونه با

مصلح آهکی می‌باشد .

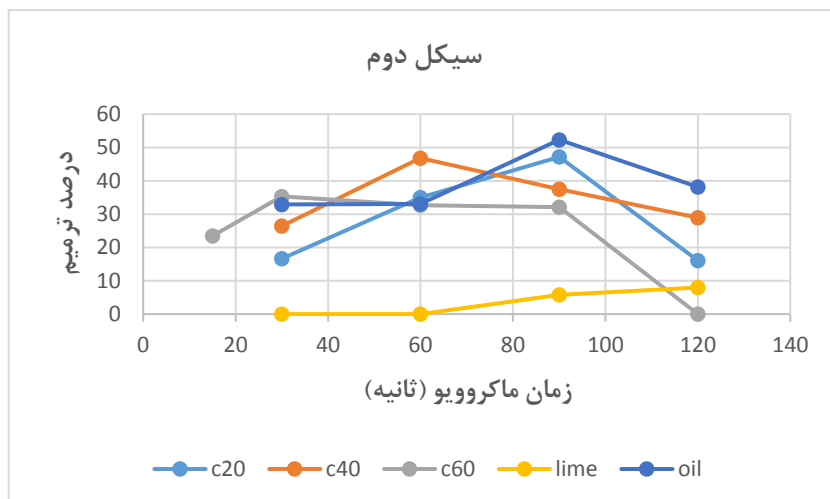
جدول ۴-۹ حداکثر ترمیم در دما و زمان بهینه سیکل دوم

سیکل دوم			
نمونه	حداکثر ترمیم %	زمان بهینه ترمیم (ثانیه)	دمای ترمیم حداکثر (°C)
L	۷/۹۸	۱۲۰	۳۱
C20	۴۷/۱۶	۹۰	۸۸
C40	۴۶/۸۱	۶۰	۸۵
C60	۳۵/۳۱	۳۰	۶۸
Oil	۵۲/۳۰	۹۰	۷۲

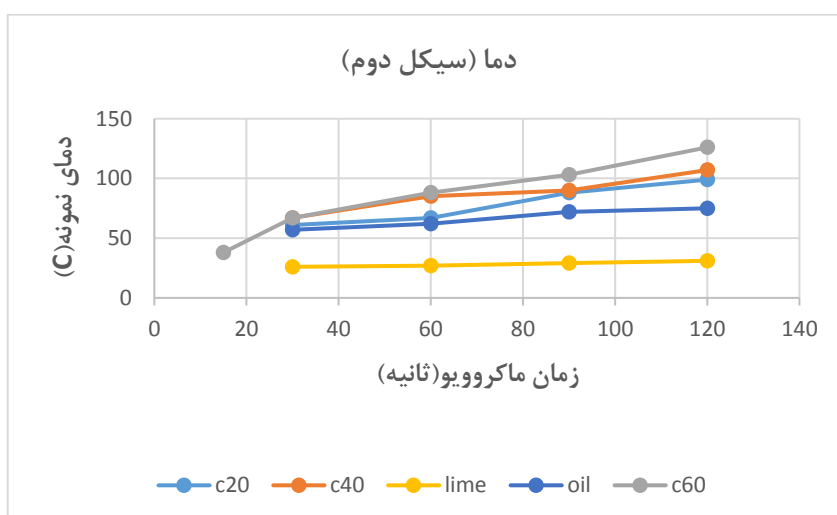
نکته ی قابل توجه در سیکل دوم اینست که با توجه به نمودار ترمیم در سیکل دوم که در شکل ۴-۱۲ رسم گردیده و همچنین نمودار دما که در شکل ۴-۱۳ رسم گردیده است ، تمامی ترکیبات نسبت به سیکل اول نرخ ترمیم کمتری را نشان دادند که این می تواند دلیل بر پیر شدگی قیر باشد که هر بار قیر گرم می شود سبب پیر شدن آن و در نتیجه کاهش مقاومت نمونه می شود .

سوالی که ممکن است پیش بیاید اینست که چرا با وجود استفاده از یک نوع قیر ، نمونه ی حاوی روغن ضایعاتی با اینکه دمای کمتری (۶۶ درجه سانتی گراد) را تجربه می کند اما نرخ ترمیم بهتری را نسبت به نمونه حاوی ۲۰ درصد باطله زغال که به دمای بالاتری (۸۷ درجه سانتی گراد) می رسد ، نشان می دهد .

برای پاسخ به این سوال باید گفت افزودن روغن ضایعاتی موجب نرم تر شدن قیر و کاهش ویسکوزیته آن می شود پس قیر در دمای پایین تری روان شده و ترک ها را ترمیم می نماید. همانطور که در شکل ۴-۱۳ دیده می شود با افزایش زمان ماکروویو دما افزایش یافته است که در نمونه ی C60 با توجه به مقدار بیشتر باطله در آن شیب نمودار (خط خاکستری رنگ) بیشتر است .



شکل ۴-۱۲ نمودار ترمیم نمونه‌ها بر حسب زمان ماکروویو در سیکل دوم



شکل ۴-۱۳ نمودار دمای نمونه‌ها بر حسب زمان ماکروویو در سیکل دوم

۴-۵-۳ سیکل سوم :

در جدول ۴-۱۰ مقادیر ترمیم هر یک از نمونه‌ها با توجه

جدول ۴-۱۰ ترمیم سیکل سوم

سیکل سوم		
نمونه	زمان (s)	ترمیم %
C20-1	۳۰	۱۴/۷۵
C20-2	۶۰	۳۳/۷۵
C20-3	۹۰	۴۷/۰۷
C20-4	۱۲۰	۷/۵۸
C40-1	۳۰	۲۴/۲۸
C40-2	۶۰	۴۳/۴۷
C40-3	۹۰	۳۵/۲۷
C40-4	۱۲۰	۲۷/۱۲
C60-1	۳۰	۳۴/۲
C60-2	۶۰	۳۱/۶
C60-3	۹۰	۲۸/۶
C60-4	۱۲۰	۰
C60-5	۱۵	۰
LM-1	۳۰	۰
LM-2	۶۰	۰
LM-3	۹۰	۰
LM-4	۱۲۰	۴/۷۵
Oil-1	۳۰	۲۹/۶۰
Oil-2	۶۰	۳۱/۶۰
Oil-3	۹۰	۴۶/۲۴
Oil-4	۱۲۰	۳۴/۴۰

به زمانی که در ماکروویو قرار گرفته‌اند درج شده است . بر

اساس جدول ۴-۱۱ که مقادیر حداکثر ترمیم برای هر

ترکیب تفکیک شده است ، بهترین ترمیم متعلق به نمونه

حاوی ۲۰ درصد باطله زغال سنگ به میزان ۴۷/۰۷ درصد

می‌باشد که در دمای ۸۶ درجه سانتی گراد به وقوع پیوسته

است و پس از آن نمونه حاوی روغن ضایعاتی با اختلاف

ناچیز به میزان ۴۶/۲۴ درصد ترمیم یافته است . کمترین

میزان ترمیم متعلق به نمونه‌ی شاهد با مصالح آهکی می-

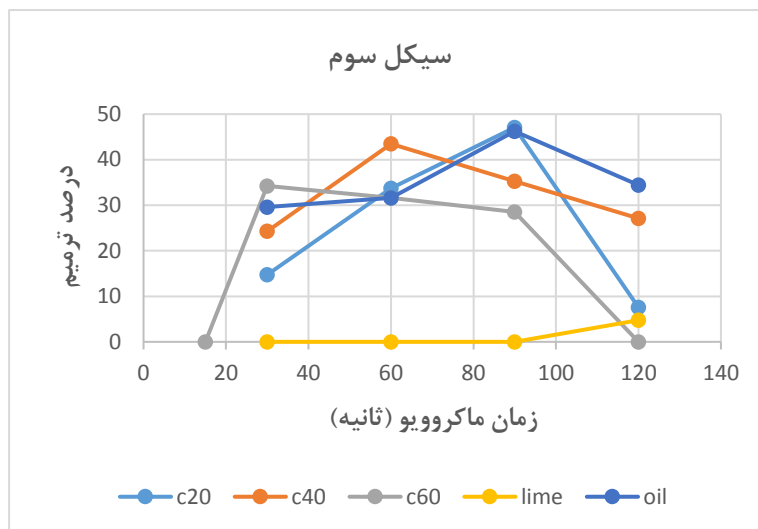
باشد که تنها به میزان ۴/۷۵ درصد آن هم در مدت زمان

۱۲۰ ثانیه تحت امواج ماکروویو ترمیم یافته است.

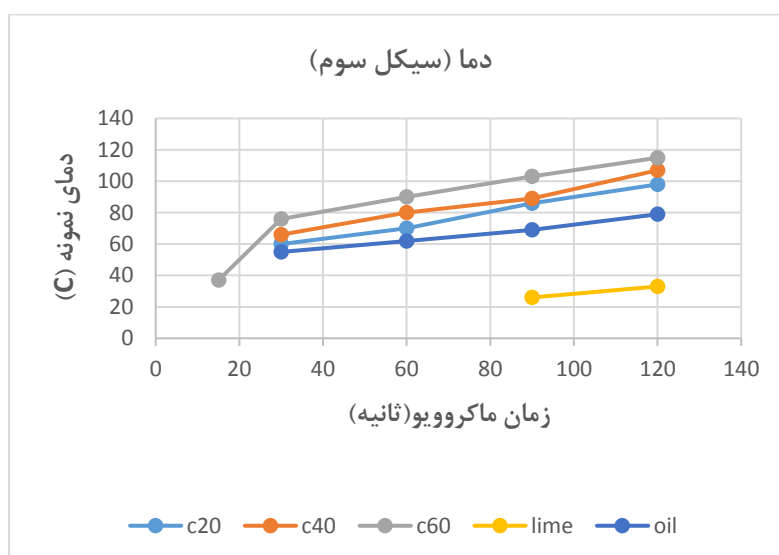
جدول ۴-۱۱ حداکثر ترمیم در دما و زمان بهینه سیکل سوم

سیکل سوم			
نمونه	حداکثر ترمیم %	زمان بهینه ترمیم (ثانیه)	دمای ترمیم حداکثر (°C)
L	۴/۷۵	۱۲۰	۳۳
C20	۴۷/۰۷	۹۰	۸۶
C40	۴۳/۴۷	۶۰	۸۰
C60	۳۴/۲	۳۰	۷۶
Oil	۴۶/۲۴	۹۰	۶۹

با کمک مقادیر جدول ۴-۸ و رسم نمودار ترمیم برای هر یک از ترکیبات در شکل ۴-۱۴ نمونه های C20-3 (نمونه حاوی ۲۰ درصد زغال در زمان ۹۰ ثانیه) و نمونه ی Oil-3 که به رنگ خطوط آبی تیره دیده می شوند ، بالاترین ترمیم را داشته اند ؛ همچنین دیده می شود خط خاکستری رنگ که مربوط به نمونه C60 می باشد با شیب بیشتری رسم شده است که نشانگر افزایش دمای بیشتر آن در مدت زمان برابر نسبت به نمونه های دیگر می باشد . در شکل ۴-۱۵ که مربوط به نمودار دمایی سیکل سوم می باشد نمونه ی آهکی که خطی به رنگ زرد می باشد ، تنها شامل دو نقطه می باشد زیرا نمونه هایی که مدت زمان ماکروویو آنان زیر ۹۰ ثانیه بوده است ترمیم نیافته و حذف شده اند و تنها نمونه هایی که باقی مانده اند گرم شده و مقداری ترمیم یافته اند ؛ همچنین در نمونه ی C60-5 که مدت زمان ماکروویو آن ۱۵ ثانیه بوده است ، شیب نمودار نسبت به بقیه نمودار اختلاف بیشتری دارد ، و این مشاهده حاکی از آن است که این مقدار زمان به قدری کافی نبوده است که مولکول های ماده را به جنبش درآورده و باعث گرم شدن آن شود .



شکل ۴-۱۴ نمودار ترمیم نمونه‌ها بر حسب زمان ماکروویو در سیکل سوم



شکل ۴-۱۵ نمودار دمای نمونه‌ها بر حسب زمان ماکروویو در سیکل سوم

۴-۵-۴ سیکل چهارم

در جدول ۱۲-۴، مقادیر ترمیم برای تمامی ترکیبات درج شده

است، که با توجه به مقادیر حداکثر ترمیم در جدول ۱۳-۴ مشاهده می‌شود، حداکثر ترمیم در این سیکل، متعلق به نمونه C20 (حاوی ۲۰ درصد باطله زغال سنگ) به میزان ۴۶/۹۰ درصد و کمترین ترمیم متعلق به نمونه C60 (حاوی ۶۰ درصد باطله زغال سنگ) به میزان ۳۰/۳ درصد می‌باشد.

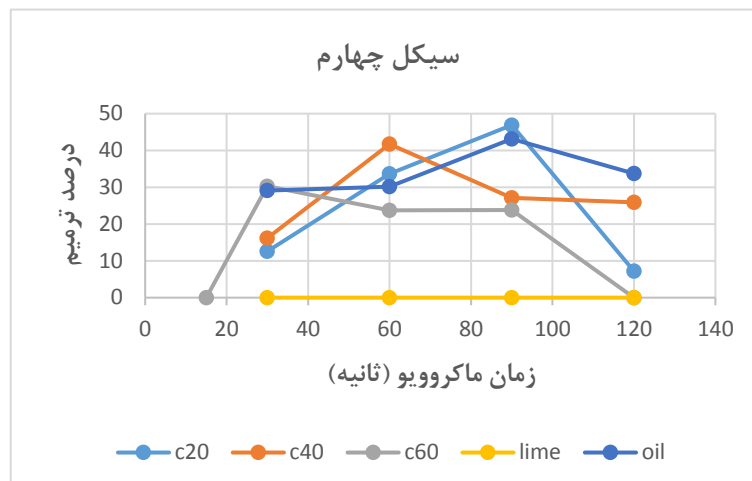
جدول ۱۳-۴ حداکثر ترمیم در دما و زمان بهینه سیکل چهارم

سیکل چهارم		
نمونه	زمان (s)	ترمیم %
C20-1	۳۰	۱۲/۶۱
C20-2	۶۰	۳۳/۶۷
C20-3	۹۰	۴۶/۹۰
C20-4	۱۲۰	۷/۲۲
C40-1	۳۰	۱۶/۱۹
C40-2	۶۰	۴۱/۷۲
C40-3	۹۰	۲۷/۱۰
C40-4	۱۲۰	۲۵/۹۰
C60-1	۳۰	۳۰/۳
C60-2	۶۰	۲۳/۷
C60-3	۹۰	۲۳/۸
C60-4	۱۲۰	۰
C60-5	۱۵	۰
LM-1	۳۰	۰
LM-2	۶۰	۰
LM-3	۹۰	۰
LM-4	۱۲۰	۰
Oil-1	۳۰	۲۹/۱۰
Oil-2	۶۰	۳۰/۲۰
Oil-3	۹۰	۴۳/۱۴
Oil-4	۱۲۰	۳۳/۷۵

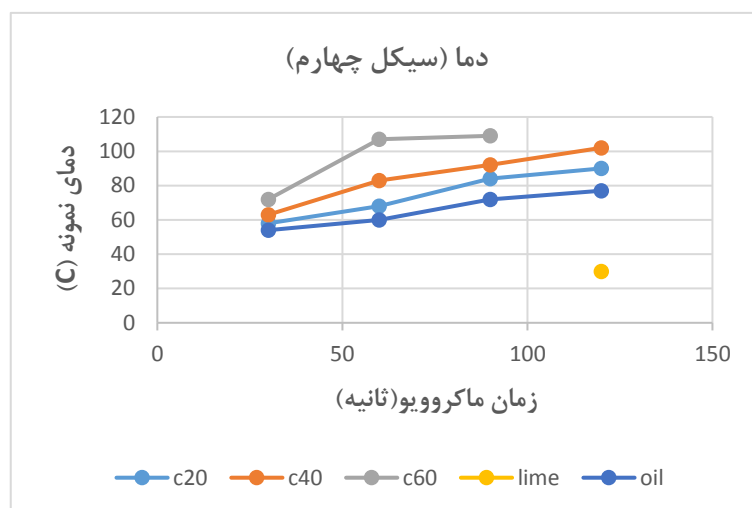
سیکل چهارم			
نمونه	حداکثر ترمیم %	زمان بهینه ترمیم (ثانیه)	دمای ترمیم حداکثر (°C)
L	۰	۱۲۰	۳۰
C20	۴۶/۹۰	۹۰	۸۴
C40	۴۱/۷۲	۶۰	۸۳
C60	۳۰/۳	۳۰	۷۲
Oil	۴۳/۱۴	۹۰	۷۲

نمونه‌ی شاهد حاوی مصالح آهکی با توجه به پیر شدگی قیر در این سیکل و همچنین دمای پایین آن پس از قرارگیری تحت امواج ماکروویو موفق به ترمیم نشده است و دو تکه‌ی جدا شده‌ی نمونه به یکدیگر اتصال نیافته است در نتیجه هم‌طور که در نمودار ترمیم سیکل چهارم در شکل ۴-۱۶ دیده می‌شود ، میزان ترمیم آن صفر درصد می‌باشد و خط زرد رنگ کاملاً افقی می‌باشد . به عبارتی این ترکیب فقط تا سه سیکل آن هم به میزان بسیار ناچیز ترمیم یافته است و دیگر قابلیت ترمیم را نداشته است .

ترمیم نمونه C60 که با خط خاکستری رنگ نشان داده شده است ، در زمان ۳۰ ثانیه به اوج خود رسیده است و پس از آن ، با وجود افزایش دما طبق نمودار شکل ۴-۱۷ اما ترمیم روند نزولی گرفته است و در زمان ۱۲۰ ثانیه به علت افزایش دمای بیش از حد باعث روانی زیاد قیر شده که منجر به تخریب نمونه شده است ، همچنین در مدت زمان ۱۵ ثانیه ماکروویو ، با توجه به عدم افزایش دمای کافی نمونه ترمیم صورت نگرفته است .



شکل ۴-۱۴ نمودار ترمیم نمونه‌ها بر حسب زمان ماکروویو در سیکل سوم



شکل ۴-۱۵ نمودار دمای نمونه‌ها بر حسب زمان ماکروویو در سیکل سوم

۴-۵-۵ سیکل پنجم

در این سیکل با توجه به جدول ۴-۱۴ مشاهده می‌شود نسبت

به سیکل قبل نمونه ۳-۶۰ C که حاوی ۶۰ درصد باطله است و

مدت زمان ۹۰ ثانیه تحت ماکروویو بوده است ، به علت تجربه

کردن دماهای بالا طی سیکل های قبل منجر به پیر شدن قیر آن

شده و در این سیکل ترمیم نیافته است . در این سیکل با توجه

به جدول ۴-۱۵ بهترین نرخ ترمیم متعلق به نمونه ۳-۲۰ C می-

باشد . همچنین صفر بودن نرخ ترمیم در نمونه های آهکی به

دلیل گرم نشدن آنان و صفر بودن این مقادیر در نمونه های حاوی

زغال به دلیل افزایش دمای بیش از حد و پیر شدگی قیر می‌باشد

که منجر به تخریب نمونه شده است .

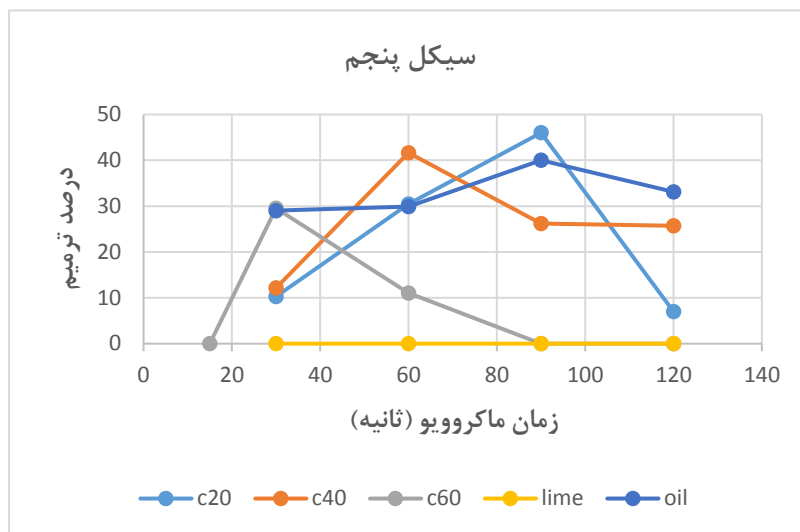
جدول ۴-۱۵ حداکثر ترمیم در دما و زمان بهینه سیکل پنجم

سیکل پنجم		
نمونه	زمان (s)	ترمیم %
C20-1	۳۰	۱۰/۲۵
C20-2	۶۰	۳۰/۴۷
C20-3	۹۰	۴۶/۰۰
C20-4	۱۲۰	۷/۰۰
C40-1	۳۰	۱۲/۱۶
C40-2	۶۰	۴۱/۶۵
C40-3	۹۰	۲۶/۲۰
C40-4	۱۲۰	۲۵/۷۲
C60-1	۳۰	۲۹/۵
C60-2	۶۰	۱۱/۰۰
C60-3	۹۰	۰
C60-4	۱۲۰	۰
C60-5	۱۵	۰
LM-1	۳۰	۰
LM-2	۶۰	۰
LM-3	۹۰	۰
LM-4	۱۲۰	۰
Oil-1	۳۰	۲۹/۰۳
Oil-2	۶۰	۲۹/۹۰
Oil-3	۹۰	۴۰/۰۱
Oil-4	۱۲۰	۳۳/۱۲

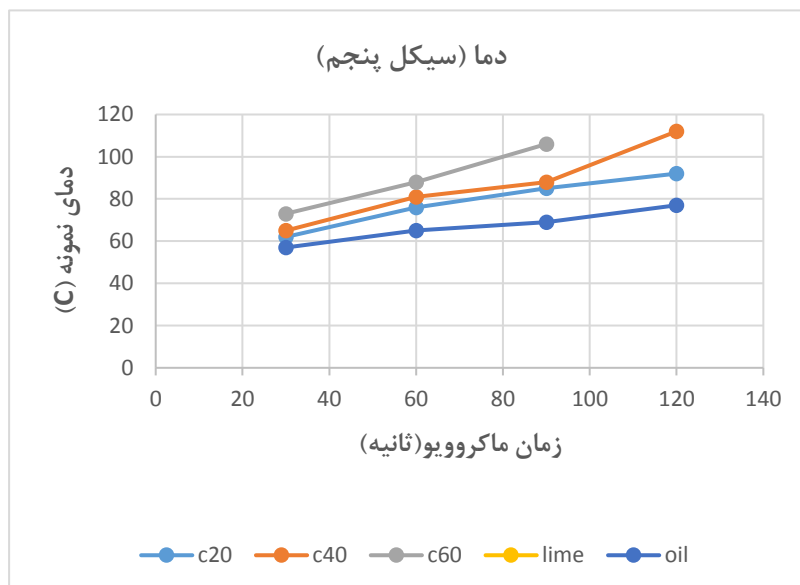
سیکل پنجم			
نمونه	حداکثر ترمیم %	زمان بهینه ترمیم (ثانیه)	دمای ترمیم حداکثر (°C)
L	۰	۰	۰
C20	۴۶	۹۰	۸۵
C40	۴۱/۶۵	۶۰	۸۱
C60	۲۹/۵	۳۰	۷۳
Oil	۴۰/۰۱	۹۰	۶۹

در این سیکل همانطور که در نمودار ترمیم در شکل ۴-۱۶ دیده می‌شود ، در نمونه‌ی C60 فقط دو نمونه‌ی C60-1 و C60-2 ترمیم یافته‌اند ، زیرا بقیه نمونه ها با توجه به بالا رفتن دمای قیر در این سیکل و سیکل‌های قبل تخریب شده‌اند .

در نمودار دمایی شکل ۴-۱۷ با توجه به حذف شدن نمونه C60-4 در سیکل‌های قبل ، بیشترین دما مربوط به نمونه C40-4 می‌باشد که با خط نارنجی رنگ دیده می‌شود و دمایی بیش از ۱۱۰ درجه سانتی گراد را تجربه کرده است ؛ پس تجربه‌ی این دما باعث شده است تا ترمیم آن در این دما کاهش یابد ، به عبارتی از مقدار حداکثر آن که برابر ۴۱/۶۵ درصد در دمای ۸۰ درجه اتفاق افتاده است ، به مقدار ۲۵ درصد کاهش یابد .



شکل ۴-۱۶ نمودار ترمیم نمونه‌ها بر حسب زمان ماکروویو در سیکل پنجم



شکل ۴-۱۷ نمودار دمای نمونه‌ها بر حسب زمان ماکروویو در سیکل پنجم

۴-۵-۶ سیکل ششم

جدول ۴-۱۶ ترمیم سیکل ششم

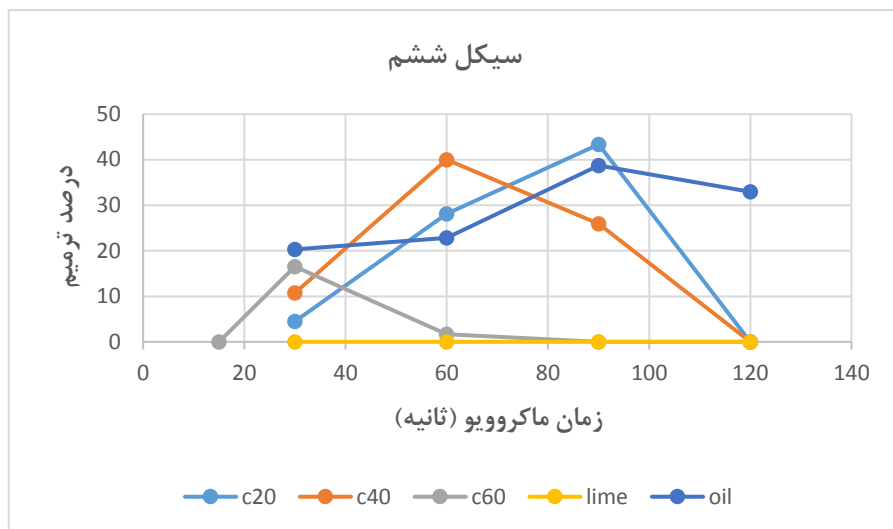
سیکل ششم		
نمونه	زمان (s)	ترمیم %
C20-1	۳۰	۴/۴۹
C20-2	۶۰	۲۸/۱۲
C20-3	۹۰	۴۳/۳۶
C20-4	۱۲۰	۰
C40-1	۳۰	۱۰/۷۲
C40-2	۶۰	۴۰/۰۱
C40-3	۹۰	۲۵/۹۰
C40-4	۱۲۰	۰
C60-1	۳۰	۱۶/۵
C60-2	۶۰	۱/۷
C60-3	۹۰	۰
C60-4	۱۲۰	۰
C60-5	۱۵	۰
LM-1	۳۰	۰
LM-2	۶۰	۰
LM-3	۹۰	۰
LM-4	۱۲۰	۰
Oil-1	۳۰	۲۰/۳۰
Oil-2	۶۰	۲۲/۸۰
Oil-3	۹۰	۳۸/۷۳
Oil-4	۱۲۰	۳۲/۹۶

هر چه سیکل‌های ترمیم تکرار می‌شود ، کاهش مقادیر ترمیم در تمامی نمونه‌ها به چشم می‌خورد که دلیل این اتفاق پیر شدن و سخت شدن قیر می‌باشد . در سیکل ششم ترمیم همانطور که در جدول ۴-۱۶ دیده می‌شود مقادیر ترمیم با توجه به زمان‌های مختلف برای تمامی ترکیبات درج شده است . همانطور که در جدول ۴-۱۷ مقادیر بهینه را جمع آوری کرده‌ایم ، بهترین نرخ ترمیم همانند سیکل‌های قبل ، متعلق به نمونه C20-3 می‌باشد که نسبت به سیکل قبل ۳ درصد کاهش یافته است . کمترین نرخ ترمیم نیز متعلق به نمونه C60-2 است که نسبت به سیکل قبل در حدود ۹ درصد کاهش یافته است و در این سیکل از نمونه‌ی حاوی ۶۰ درصد باطله تنها دو نمونه که زمان های ۳۰ و ۶۰ ثانیه را در ماکروویو تجربه کرده اند باقی مانده است زیرا بقیه نمونه ها به دلیل دمای بیش از حد تخریب شده اند ؛ هم چنین نمونه ای که ۶۰ ثانیه تحت امواج بوده نیز ترمیم ناچیزی برابر ۱/۷ درصد حاصل کرده است .

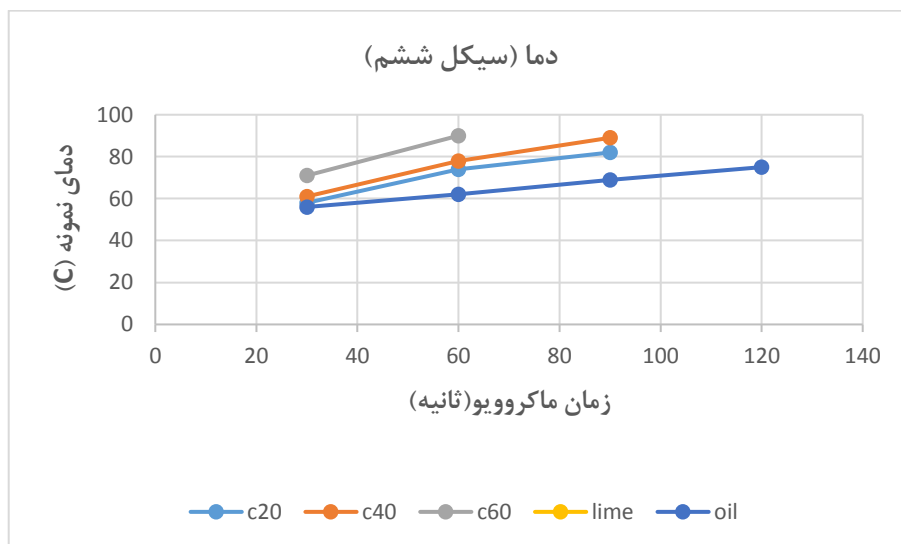
جدول ۴-۱۷ حداکثر ترمیم در دما و زمان بهینه سیکل ششم

سیکل ششم			
نمونه	حداکثر ترمیم %	زمان بهینه ترمیم (ثانیه)	دمای ترمیم حداکثر (°C)
L	۰	۰	۰
C20	۴۳/۳۶	۹۰	۸۲
C40	۴۰/۰۱	۶۰	۷۸
C60	۱۶/۵	۳۰	۷۱
Oil	۳۸/۷۳	۹۰	۶۹

در نمودار ترمیم شکل ۴-۱۸ مشاهده می‌شود نمونه C60 که با خط خاکستری رنگ دیده می‌شود ، در این سیکل نسبت به الباقی ترکیبات پایین تر است و تنها یک نقطه اوج در مقدار ۱۶/۵ درصد دارد ؛ این درحالیست که در این سیکل نمونه های C20 ، C40 و Oil ترمیم هایی در حدود ۴۰ درصد را حاصل کرده‌اند . مقادیر دما بر اساس مدت زمان ماکروویو در نمودار شکل ۴-۱۹ رسم شده است که در این بین مانند سیکل‌های قبل تمامی ترکیبات با افزایش مقدار باطله زغال ، نرخ افزایش دمای آنان نیز افزایش یافته و شیب نمودار بیشتر شده است .



شکل ۴-۱۸ نمودار ترمیم نمونه‌ها بر حسب زمان ماکروویو در سیکل ششم



شکل ۴-۱۹ نمودار دمای نمونه‌ها بر حسب زمان ماکروویو در سیکل ششم

۴-۵-۷ سیکل هفتم

جدول ۴-۱۸ ترمیم سیکل هفتم

سیکل هفتم		
نمونه	زمان (s)	ترمیم %
C20-1	۳۰	۰
C20-2	۶۰	۲۴/۳۷
C20-3	۹۰	۳۷/۴۲
C20-4	۱۲۰	۰
C40-1	۳۰	۱۰/۶۹
C40-2	۶۰	۳۴/۷۷
C40-3	۹۰	۴/۷
C40-4	۱۲۰	۰
C60-1	۳۰	۸/۳
C60-2	۶۰	۰
C60-3	۹۰	۰
C60-4	۱۲۰	۰
C60-5	۱۵	۰
LM-1	۳۰	۰
LM-2	۶۰	۰
LM-3	۹۰	۰
LM-4	۱۲۰	۰
Oil-1	۳۰	۱۳/۵۰
Oil-2	۶۰	۱۷/۶
Oil-3	۹۰	۳۴/۳۷
Oil-4	۱۲۰	۷/۵

در سیکل هفتم که آخرین سیکل چرخه‌ی ترمیم می‌باشد

همانطور که در جدول ۴-۱۸ ملاحظه می‌گردد ، نسبت به سیکل

اول بسیاری از نمونه‌ها تخریب شده و دیگر ترمیم نیافته‌اند .

بیشترین میزان ترمیم در این سیکل با توجه به جدول ۴-۱۹

کماکان مانند سیکل‌های قبل مربوط به نمونه‌ی حاوی ۲۰ درصد

باطله زغال سنگ می‌باشد که برابر ۳۷/۴۲ درصد بدست آمده

است و این درحالیست که از این ترکیب تنها دو نمونه که مدت

زمان ۶۰ و ۹۰ ثانیه در ماکروویو گرما دیدند ، توانایی ترمیم دارند

و باقی مانده‌اند . در ترکیب حاوی ۶۰ درصد باطله هم به دلیل

تجربه‌ی دماهای بالا در طول سیکل‌ها و درصد بالای باطله تنها

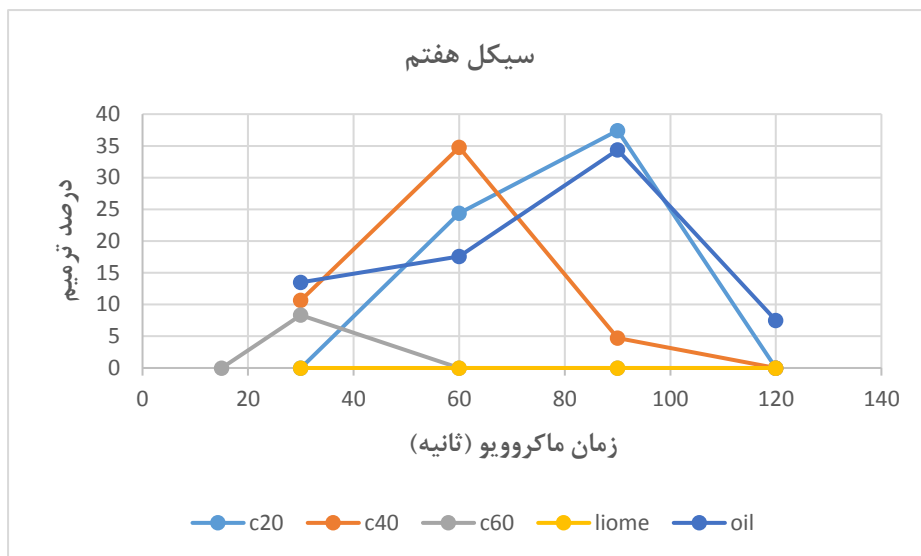
یک نمونه با ترمیم ناچیزی باقی مانده است .

جدول ۴-۱۹ حداکثر ترمیم در دما و زمان بهینه سیکل هفتم

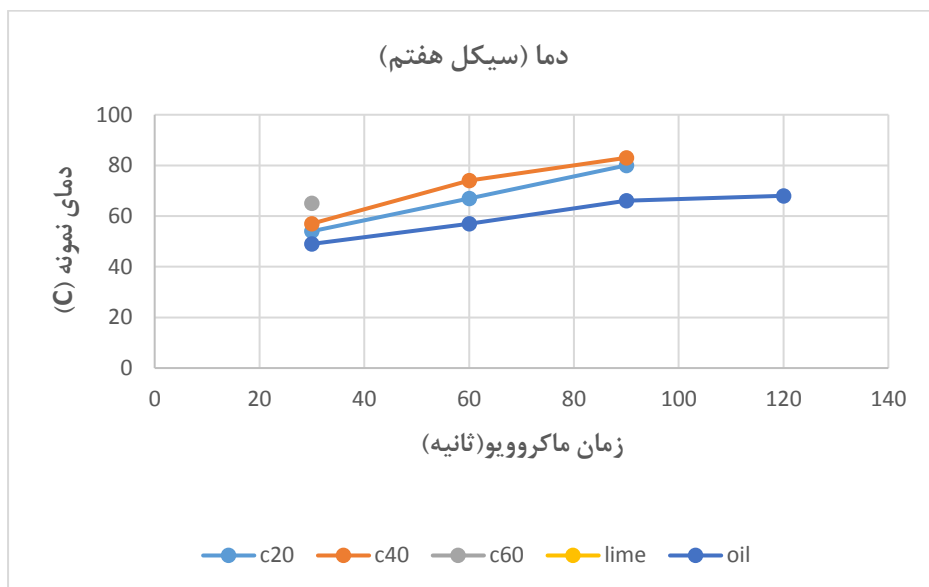
سیکل هفتم			
نمونه	حداکثر ترمیم %	زمان بهینه ترمیم (ثانیه)	دمای ترمیم حداکثر (°C)
L	۰	۰	۰
C20	۳۷/۴۲	۹۰	۸۰
C40	۳۴/۷۷	۶۰	۷۴
C60	۸/۳	۳۰	۶۵
Oil	۳۴/۳۷	۹۰	۶۶

در نمودار شکل ۴-۲۰ که مربوط به سیکل هفتم ترمیم می‌باشد ، نکته‌ی قابل توجه در این سیکل و طی سیکل‌های قبل پایداری تمامی نمونه‌های حاوی روغن ضایعاتی خوراکی می‌باشد که اگر چه نسبت به سیکل‌های اولیه نرخ ترمیم آن کاهش یافته است اما کماکان نمونه‌ها سالم بوده و قابلیت ترمیم دارند و این به دلیل تاثیر روغن بر جلوگیری از پیر شدن قیر می‌باشد .

در ضمن وجود روغن باعث شده است که در طی سیکل‌ها نمونه‌ها دماهای پایین تری را به منظور ترمیم بهینه تجربه کنند که این خود نقش مهمی در کمتر پیر شدن قیر و پایداری نمونه‌ها دارد . همانطور که ملاحظه می‌گردد در این سیکل طبق نمودار شکل ۴-۲۱ در بیشترین زمان ماکروویو (۱۲۰ ثانیه) به دمای ۷۰ درجه سانتی گراد رسیده است ، که در مقایسه با نمونه های حاوی باطله‌ی زغال که در زمان ۹۰ ثانیه به دمای بالای ۸۰ درجه رسیده اند ، مقدار کمتری می‌باشد .



شکل ۴-۲۰ نمودار ترمیم نمونه‌ها بر حسب زمان ماکروویو در سیکل هفتم

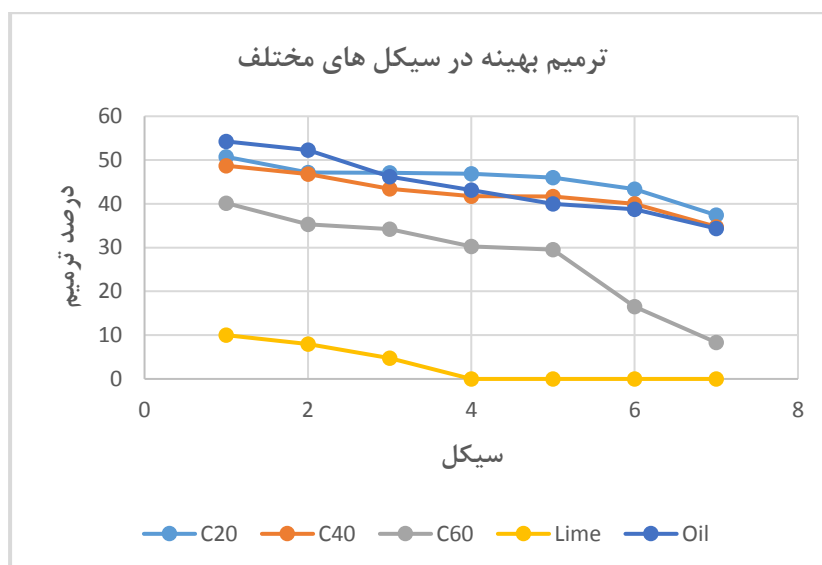


شکل ۴-۲۱ نمودار دمای نمونه‌ها بر حسب زمان ماکروویو در سیکل ششم

۴-۵-۸ جمع بندی ترمیم

در این پژوهش به منظور بررسی تاثیر باطله‌ی زغال سنگ درصدهای مختلفی از آن را انتخاب کرده تا تاثیر افزایش یا کاهش آن در نمونه بررسی گردد. در نمودار شکل ۴-۲۲ ترمیم بهینه‌ی هر یک از ترکیبات در هر سیکل جمع آوری شده است و به صورت گراف در کنار یکدیگر مقایسه شده اسند. طبق نمودار شکل ۴-۲۲ و با توجه به نتایج دمایی در بخش‌های قبل مشخص گردید هر چه درصد مشارکت باطله در نمونه بیشتر باشد نرخ افزایش دمای نمونه به دلیل جذب بهتر امواج ماکروویو توسط باطله بیشتر می‌شود اما با توجه به خاصیت ذاتی این مواد و کمتر بودن وزن مخصوص آنان نسبت به مصالح آهکی با افزایش مقدار باطله، نرخ ترمیم تا حد مشخصی افزایش می‌یابد به عبارتی با افزودن ۲۰ درصد باطله و جایگزین کردن آن با مصالح آهکی ترمیم نمونه بهبود یافت و نرخ افزایش دما نیز افزایش یافت اما با افزودن ۶۰ درصد باطله و جایگزینی آن بجای مصالح آهکی تنها نرخ افزایش دما افزایش یافت و ترمیم نمونه نسبت به نمونه‌ی حاوی ۲۰ درصد باطله عملکرد ضعیف تری داشت. همانطور که ملاحظه می‌گردد خط آبی روشن که مربوط به نمونه C20 می‌باشد در این هفت سیکل رنج ترمیم آن از ۵۲ تا ۳۵ درصد رسیده است، در حالیکه خط خاکستری رنگ که مربوط به ترمیم نمونه‌ی C60 است، از ۴۰ تا ۹ درصد کاهش یافته است. به صورت کلی در تمامی نمونه‌ها از سیکل اول تا آخر میزان ترمیم به دلیل پیرشدگی قیر و همچنین قرارگیری در دمای منفی ۲۰ درجه در هر سیکل ترمیم روند نزولی داشته است. ترمیم نمونه C40 که با خط نارنجی رنگ مشخص شده است تا حدودی نزدیک ترمیم نمونه C20 می‌باشد ولی با توجه به دوبرابر شدن مقدار باطله زغال در آن باعث کاهش جزئی در ترمیم شده است. علاوه بر این ضایعات روغن خوراکی با مخلوط شدن با قیر بررسی شده است که منجر به افزایش نرخ ترمیم و نرخ افزایش دما شده است. نرخ افزایش دمای نمونه حاوی روغن ضایعاتی و میزان ترمیم آن تقریباً مانند نمونه C20 می‌باشد که با توجه به انجام فرآیند ترمیم در دماهای پایین تر نسبت به نمونه‌های حاوی باطله زغال سنگ و پایداری تمامی نمونه‌های آن تا سیکل هفتم می‌توان

علاوه بر نمونه‌ی C20، از نمونه حاوی روغن ضایعات خوراکی به عنوان نمونه‌ی بهینه نام برد.



شکل ۴-۲۲ ترمیم بهینه‌ی ترکیبات در سیکل‌های مختلف

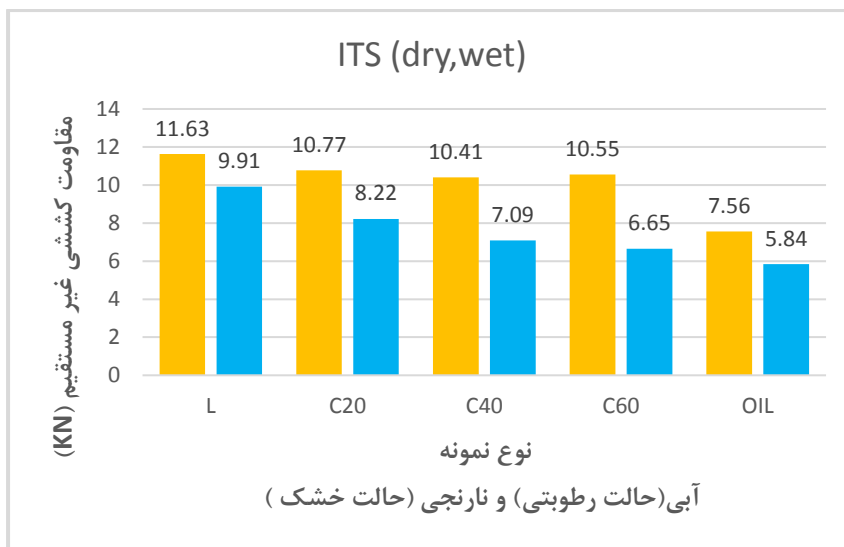
۴-۶ آزمون حساسیت رطوبتی

عامل رطوبت می‌تواند موجب تشدید خرابی‌های روسازی گردد و پرداختن به این مورد حائز اهمیت می‌باشد. حساسیت رطوبتی نمونه آسفالتی به کمک آزمایش کشش غیر مستقیم بر مبنای استاندارد AASHTO T283 صورت گرفته است. ابتدا برای تمامی نمونه‌ها مقاومت آنان در حالت خشک (ITS_{dry}) و سپس در حالت مرطوب (ITS_{wet}) بررسی شده است. از تقسیم حاصل مقاومت کششی در حالت مرطوب به حالت خشک نسبتی بدست می‌آید (TSR) که می‌توان از روی آن میزان حساسیت رطوبتی را سنجید و هرچه این عدد بزرگتر باشد مقاومت رطوبتی نمونه‌ی آسفالتی بیشتر است. نتایج این آزمایش در جدول ۴-۲۰ ثبت شده است.

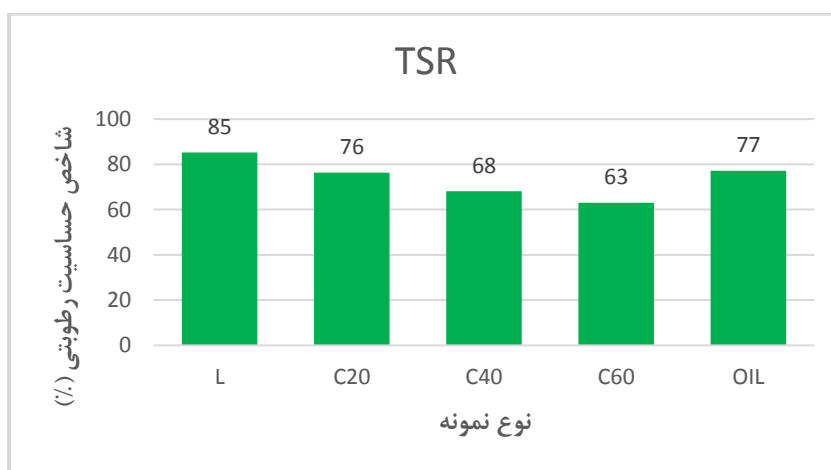
جدول ۴-۲۰ مقادیر ITS و TSR ترکیبات

TSR (%)	ITS (wet, w ^۱)		ITS (dry, w ^۲)		نام نمونه
	E _{max} (mm)	F _{max} (KN)	E _{max} (mm)	F _{max} (KN)	
۸۵	۳/۰۷	۹/۹۱	۲/۳	۱۱/۶۳	LM
۷۶	۲/۸۹	۸/۲۲	۱/۹۱	۱۰/۷۷	C20
۶۸	۳/۹۹	۷/۰۹	۲/۶۳	۱۰/۴۱	C40
۶۳	۴/۲۲	۶/۶۵	۲/۵۳	۱۰/۵۵	C60
۷۷	۱/۹۶	۸۴/۵	۲/۰۵	۷/۵۶	OIL

در نمودار شکل ۴-۲۳ نتایج مربوط به مقاومت کششی غیر مستقیم تمامی ترکیبات در حالت رطوبتی و خشک رسم شده است که مشاهده می‌شود نمونه‌ی شاهد (LM) بیشترین مقدار ITS را در هر دو حالت رطوبتی و خشک دارد و با افزودن باطله‌ی زغال سنگ، هرچه میزان جایگزینی باطله با مصالح آهکی بیشتر می‌شود، ITS آنان کاهش می‌یابد، که در نمونه C60 به کمترین مقدار خود می‌رسد. البته مقدار ITS نمونه C60 نسبت به نمونه‌ی Oil در هر دو حالت رطوبتی و خشک بیشتر بوده است. با تقسیم مقدار TSR در حالت مرطوب به مقدار آن در حالت خشک مقادیر بدست آمده در نمودار شکل ۴-۲۴ رسم شده است. با مقایسه‌ی مقادیر TSR ترکیبات مشاهده می‌شود، بیشترین مقاومت رطوبتی مربوط به نمونه شاهد آهکی بوده و با افزودن باطله‌ی زغال سنگ این مقدار کاهش یافته است. در رابطه با نمودار نمونه‌ی Oil اگرچه کمترین مقاومت کششی غیر مستقیم را در بین ترکیبات داشت اما به دلیل اختلاف کم آن در حالت رطوبتی و اشباع میزان TSR آن نسبت به نمونه‌های حاوی باطله زغال سنگ بیشتر شد.



شکل ۴-۲۳ نمودار مقادیر ITS در حالت خشک و رطوبتی



شکل ۴-۲۴ نمودار مقادیر TSR

همانطور که در نتایج حساسیت رطوبتی دیده می‌شود نمونه‌ی شاهد بیشترین مقدار TSR را دار می‌باشد که به دلیل وجود آهک در مصالح باعث مقاومت رطوبتی مخلوط شده است. با توجه به نتایج آزمون ترمیم نمونه‌ی حاوی ۲۰ درصد باطله زغال سنگ و نمونه حاوی روغن ضایعاتی خوراکی در مجموع بهترین نتیجه را حاصل کردند. حال با بررسی حساسیت رطوبتی در این ترکیبات برتری آنان به لحاظ مقاومت رطوبتی نیز بررسی شده است. با افزودن باطله‌ی زغال سنگ به عنوان جایگزینی برای مصالح به صورت کلی میزان TSR کاهش یافته است اما در نمونه‌ی حاوی ۲۰ درصد باطله این

کاهش مجاز می‌باشد و حداقل TSR لازمه را (حداقل ۷۵ درصد) به منظور پایداری نمونه تحت شرایط رطوبتی با میزان حساسیت رطوبتی ۷۶ درصد دارا می‌باشد. افزودن باطله زغال سنگ بیش از ۲۰ درصد به میزان ۴۰ و ۶۰ درصد به ترتیب باعث کاهش میزان TSR به مقادیر ۶۸ و ۶۳ درصد شد. همچنین نمونه‌ی حاوی روغن علاوه بر قابلیت مناسب در بحث ترمیم شوندگی در حساسیت رطوبتی نیز دارای نسبت TSR برابر ۷۷ درصد می‌باشد که این مقدار برای نمونه آسفالتی قابل قبول می‌باشد و این ترکیب می‌تواند در اثر خرابی‌های رطوبتی مقاومت مناسبی نشان دهد.

فصل پنجم:

جمع‌بندی نتایج و ارائه‌ی مشاهدات

۵-۱ مقدمه

یکی از ابزارات مهم در صنعت حمل و نقل کشور راه‌ها می‌باشد که کیفیت سطح راه‌ها می‌تواند تاثیر بسزایی در آن بگذارد. با توجه به اهمیت مسائل زیست محیطی در سال‌های اخیر در این پژوهش ترمیم آسفالت در سه نوع مخلوط مختلف؛ مخلوط با مصالح آهکی (نمونه شاهد)، مخلوط حاوی باطله زغال سنگ و مخلوط با قیر اصلاح شده با روغن ضایعات خوراکی توسط آزمایش خمش سه نقطه‌ای و تحت گرمایش ماکروویو مورد بررسی قرار گرفته اند. عوامل زیادی نظیر دمای نمونه، زمان استراحت، نوع قیر، نوع افزودنی و شدت تخریب هستند که در خود ترمیمی نقش دارند که در این پژوهش این موارد مورد توجه قرار گرفته‌اند. همچنین حساسیت رطوبتی و شاخص مارشال هر یک از مخلوط‌ها با آزمایش‌های کشش غیر مستقیم و مقاومت مارشال بدست آمده است.

۵-۲ نتیجه‌گیری

اهم نتایج حاصل شده در این پژوهش به شرح زیر می‌باشد:

- با بررسی باطله‌های مختلف زغال سنگ که از معادن مختلف استخراج شده است، مشخص شد باطله‌ی زغال سنگ K8 معدن زغال سنگ شاهرود که دارای مقادیر گوگرد و کالکوپیریت حتی به مقدار ناچیز می‌باشد (Fe_2O_3 کمتر از ۴ درصد، Al_2O_3 حدود ۱۴ درصد، SiO_2 حدود ۳۵ درصد و گوگرد و کالکوپیریت کمتر از ۰/۹ درصد) پتانسیل زیادی برای گرم شدن در ماکروویو دارد. بطوریکه در مدت زمان ۶۰ ثانیه حدود ۱۲۰ درجه سانتی‌گراد گرم شد، در حالیکه باطله‌های دیگر در حد ۶۰ تا ۸۰ درجه سانتی‌گراد گرم شدند.
- روغن ضایعاتی خوراکی با توجه به چند بار استفاده از آن دارای قطبیت بالاتری نسبت به روغن استفاده نشده دارد و این قطبیت بالاتر منجر به گرمایش بهتر در ماکروویو می‌شود. به گونه‌ای که در مدت زمان ۶۰ ثانیه به دمایی نزدیک به ۸۰ درجه سانتی‌گراد رسید. پس با آزمایش

آن در ماکروویو مشاهده شد نسبت به نمونه‌های سنگ آهک که قابلیت گرم شدن در ماکروویو را ندارند می‌تواند به منظور استفاده در مخلوط آسفالتی و فرآیند خود ترمیمی مفید باشد.

- با بررسی درصد قیر بهینه توسط آزمایش مارشال مشخص شد نمونه‌ی حاوی باطله زغال سنگ موجب کاهش درصد قیر بهینه شد به گونه‌ای که این درصد برای نمونه‌ی شاهد آهکی $4/86$ و برای نمونه حاوی 20 درصد باطله زغال سنگ که در ترمیم عملکرد بهتری داشت $4/69$ بدست آمده است. هم چنین مشارکت روغن ضایعاتی با قیر منجر به کاهش درصد قیر تا مقدار $4/80$ درصد شده است.

- با ثبت میزان روانی و مقاومت نمونه طی آزمایش مارشال، شاخص مارشال (MQ) بدست آمده است که نشان دهنده‌ی مقاومت شیار شدگی و سختی نمونه آسفالتی می‌باشد. بر طبق نتایج این آزمون مشخص شد بیشترین مقدار شاخص مارشال مربوط به نمونه‌های حاوی باطله زغال سنگ است که به ترتیب برای نمونه‌های $C20$ ، $C40$ و $C60$ برابر $2/97$ ، $3/20$ و $3/49$ می‌باشد و بعد از آن نمونه‌ی شاهد با مصالح آهکی با مقدار $2/84$ در رتبه دوم قرار دارد. نمونه‌ی حاوی روغن ضایعاتی به دلیل افزایش نرمی قیر توسط روغن اضافه شده باعث کاهش میزان شاخص ماشال شده است که دارای کمترین مقدار MQ در بین انواع مخلوط‌ها به میزان $2/75$ می‌باشد.

- به موجب بررسی خود ترمیمی از آزمایش خمش سه نقطه ای بهره گرفته شده است که در نتایج حاصله از این آزمایش بهترین عملکرد در بین نمونه‌های حاوی باطله زغال سنگ، مربوط به نمونه‌ی حاوی 20 درصد باطله زغال سنگ بوده است که حداکثر به میزان $50/75$ درصد در دمای 87 درجه سانتی گراد ترمیم یافته است و تا سیکل هفتم اگرچه مقدار ترمیم آن به دلیل پیر شدگی قیر کاهش یافت اما ترمیم شونده‌ی آن بدون تخریب نمونه ادامه یافت. نمونه‌ی حاوی 5 درصد روغن ضایعاتی (بر اساس وزن قیر) بهترین نرخ ترمیم به میزان $54/25$ درصد

در دمای ۶۶ درجه سانتی گراد را حاصل کرده است و دلیل رسیدن به این مقدار ترمیم در دمای پایین تر نسبت به نمونه‌های حاوی باطله زغال سنگ کاهش دادن نقطه نرمی و ویسکوزیته قیر توسط روغن افزوده شده می‌باشد. کمترین مقدار ترمیم مربوط به نمونه‌های شاهد با مصالح آهکی می‌باشد که به علت عدم گرمایش در ماکروویو به علت خاصیت مصالح آن میزان ترمیم آنان بسیار ناچیز بوده و از سیکل سوم به بعد قابلیت ترمیم نداشته اند .

- برای بررسی مقاومت رطوبتی نمونه‌های مختلف اقدام به انجام آزمون حساست رطوبتی به کمک آزمایش مقاومت کششی غیر مستقیم شده است . بر طبق این آزمایش نمونه‌ی شاهد به دلیل آنکه جنس مصالحش آهکی می‌باشد ، دارای بیشترین مقدار TSR به میزان ۸۵ درصد می‌باشد . پس از آن نمونه‌ی حاوی روغن ضایعات با TSR برابر ۷۷ درصد ، دارای بیشترین میزان مقاومت رطوبتی در بین نمونه‌های افزودنی‌دار می‌باشد . نمونه‌های حاوی ۲۰ ، ۴۰ و ۶۰ درصد باطله زغال سنگ به ترتیب دارای مقادیر TSR برابر ۷۶ ، ۶۸ و ۶۳ درصد هستند که مشخص می‌شود با اضافه شدن مقادیر باطله و جایگزینی آنان با مصالح آهکی باعث کاهش مقاومت رطوبتی شده و عدد TSR کاهش می‌یابد ؛ البته نمونه‌ی حاوی ۲۰ درصد باطله مقاومت رطوبتی حداقل (۷۵ درصد) را تامین می‌نماید و با توجه به عملکرد خوبش در ترمیم و آزمایش شاخص مارشال می‌تواند ترکیب بهینه‌ای باشد .

۵-۳ پیشنهادات

پیشنهادات ذیل به موجب ادامه کار توسط پژوهشگران می‌باشد :

- بررسی و استفاده از مصالح مختلف به موجب ترمیم مخلوط آسفالتی به گونه‌ای که قابلیت گرم شدن در ماکروویو را داشته باشد .
- اندازه‌گیری میزان قطبیت ضایعات روغن خوراکی و یافتن رابطه‌ی میان میزان قطبیت و گرمایش و در نتیجه میزان ترمیم مخلوط آسفالتی

- انجام آزمایش خستگی نمونه آسفالتی با مقادیر افزودنی استفاده شده در این پژوهش
- ساخت نمونه‌های متعدد و یافتن درصد بهینه افزودن باطله زغال سنگ به موجب بهترین

ترمیم

مراج

۱. بهری . (۱۳۹۰) بررسی امکان فرآوری مجدد باطله های جیگ کارخانه زغالشویی زیرآب ، دانشگاه صنعتی شاهرود.
۲. عامری . (۱۳۹۳) ارزیابی استفاده از آسفالت خود ترمیم شونده ، ششمین همایش ملی قیر و آسفالت ایران.
3. Tabaković, A. and E. Schlangen, (2015) Self-healing technology for asphalt pavements. *Self-healing materials*: p. 285-306.
4. Schlangen, E., Other materials, applications and future developments, in *Self-healing phenomena in cement-based materials*. 2013, Springer. p. 241-256.
5. Kringos, N ,.et al., (2011) Towards an understanding of the self-healing capacity of asphaltic mixtures. *Heron*. 56(1/2): p. 45-74.
6. Sun, Y., et al., (2017) Self-healing performance of asphalt mixtures through heating fibers or aggregate. *Construction and Building Materials*. 150: p. 673-680.
7. Gallego, J., et al., (2013) Heating asphalt mixtures with microwaves to promote self-healing. *Construction and Building Materials*. 42: p. 1-4.
8. Katsuki, H., N. Kamochi, and S. Komarneni, (2008) Novel energy-saving materials for microwave heating. *Chemistry of Materials*. 20(15): p. 4803-4807.
9. Trigos, L., J. Gallego, and J.I. Escavy, (2020) Heating potential of aggregates in asphalt mixtures exposed to microwaves radiation. *Construction and Building Materials*. 230.
10. Hopstock, D.M. and L.M. Zanko, (2005) Minnesota taconite as a microwave-absorbing road aggregate material for deicing and pothole patching applications.

- .11 Ajam, H., et al., Self-Healing of Dense Asphalt Concrete by Two Different Approaches: Electromagnetic Induction and Infrared Radiation, in 8th RILEM International Conference on Mechanisms of Cracking and Debonding in Pavements. 2016. p. 241-246.
- .12 Xu, S., et al., (2020) A novel self-healing system: Towards a sustainable porous asphalt. *Journal of Cleaner Production*. 259.
- .13 Li, H., et al., (2019) Study on the gradient heating and healing behaviors of asphalt concrete induced by induction heating. *Construction and Building Materials*. 208: p. 638-645.
- .14 Menozzi, A., et al., (2015) Induction healing of fatigue damage in asphalt test samples. *Construction and Building Materials*. 74: p. 162-168.
- .15 Liu, Q., E. Schlangen, and M. van de Ven, (2013) Induction Healing of Porous Asphalt Concrete Beams on an Elastic Foundation. *Journal of Materials in Civil Engineering*. 25(7): p. 880-885.
- .16 Xu, S., et al., (2018) Self-Healing Asphalt Review: From Idea to Practice. *Advanced Materials Interfaces*. 5.(17)
- .17 Lou, B., et al., (2020) Effect of metallic-waste aggregates on microwave self-healing performances of asphalt mixtures. *Construction and Building Materials*. 246.
- .18 González, A., J. Valderrama, and J. Norambuena-Contreras, (2019) Microwave crack healing on conventional and modified asphalt mixtures with different additives: an experimental approach. *Road Materials and Pavement Design*. 20(sup1): p. S149-S162.
- .19 Shen, S., et al., (2016) Investigation of the influence of crack width on healing properties of asphalt binders at multi-scale levels. *Construction and Building Materials*. 126: p. 197-205.
- .20 Li, M., et al., (2020) Investigating the healing capacity of asphalt mixtures containing iron slag. *Construction and Building Materials*. 261.

- .21 Salih, S., et al., (2018) Effect of porosity on infrared healing of fatigue damage in asphalt. *Construction and Building Materials*. 167: p. 716-725.
- .22 Gómez-Meijide, B., et al., (2018) Effect of bitumen properties in the induction healing capacity of asphalt mixes. *Construction and Building Materials*. 190: p. 131-139.
- .23 Sun, D., et al., (2017) Effect of chemical composition and structure of asphalt binders on self-healing. *Construction and Building Materials*. 133: p. 495-501.
- .24 Gao, J., et al., (2017) Utilization of steel slag as aggregate in asphalt mixtures for microwave deicing. *Journal of Cleaner Production*. 152: p. 429-442.
- .25 Wong, D.K., Microwave dielectric constants of metal oxides at high temperatures. 1975, Thesis (M. Sc.)--University of Alberta.
- .26 Tinga, W., (1988) Microwave dielectric constants of metal oxides, part 1 and part 2. *Electromagnetic Energy Reviews*. 1(5): p. 2-6.
- .27 Yıldız, K. and M. Atakan, (2020) Improving microwave healing characteristic of asphalt concrete by using fly ash as a filler. *Construction and Building Materials*. 262.
- .28 Su, J.-F., E. Schlangen, and Y.-Y. Wang (2015) ,Investigation the self-healing mechanism of aged bitumen using microcapsules containing rejuvenator. *Construction and Building Materials*. 85: p. 49-56.
- .29 Jian, Q., Self Healing of Asphalt Mixtures Towards a Better Understanding of the Mechanism,. Vol. 2 ,2012 .42Delft University of Technology.
- .30 HasaniNasab, S., M. Arast, and M. Zahedi, (2019) Investigating the healing capability of asphalt modified with nano-zycotherm and Forta fibers. *Case Studies in Construction Materials*. 11.

- .31 Modarres, A., M .Rahmanzadeh, and P. Ayar, (2015) Effect of coal waste powder in hot mix asphalt compared to conventional fillers: mix mechanical properties and environmental impacts. *Journal of Cleaner Production*. 91: p. 262-268.
- .32 Menéndez, J.A., et al., (2010) Microwave heating processes involving carbon materials. *Fuel Processing Technology*. 91(1): p. 1-8.
- .33 Lemly, A.D., (2017) Environmental hazard assessment of coal ash disposal at the proposed Rampal power plant. *Human and Ecological Risk Assessment: An International Journal*. 24(3): p. 627-641.
- .34 Chen, J.-S., et al., (2008) Engineering and environmental characterization of municipal solid waste bottom ash as an aggregate substitute utilized for asphalt concrete. *Journal of Materials in Civil Engineering*. 20 :(6)p. 432-439.
- .35 Yoo, B.-S., D.-W. Park, and H.V. Vo, (2016) Evaluation of Asphalt Mixture Containing Coal Ash. *Transportation Research Procedia*. 14: p. 797-803.
- .36 Karimipour, A., (2020) Effect of untreated coal waste as fine and coarse aggregates replacement on the properties of steel and polypropylene fibres reinforced concrete. *Mechanics of Materials*. 150.
- .37 Gong, M., et al., (2016) Physical–chemical properties of aged asphalt rejuvenated by bio-oil derived from biodiesel residue. *Construction and Building Materials*. 105: p. 35-45.
- .38 Ma, J., et al., (2019) Potential of recycled concrete aggregate pretreated with waste cooking oil residue for hot mix asphalt. *Journal of Cleaner Production*. 221: p. 469-479.
- .39 Jia, X., et al., (2015) Influence of Waste Engine Oil on Asphalt Mixtures Containing Reclaimed Asphalt Pavement. *Journal of Materials in Civil Engineering*. 27.(12)

- 40 Sun, Z., et al., (2016) Properties of asphalt binder modified by bio-oil derived from waste cooking oil. *Construction and Building Materials*. 102: p. 496-504.
- 41 Farhoosh, R. and S. Moosavi, (2009) Evaluating the performance of peroxide and conjugated diene values in monitoring quality of used frying oils. *Journal of Agricultural Science and Technology*. 11(2): p. 173-179.
- 42 نظر. (۱۳۹۴) بررسی آزمایشگاهی بهبود حساسیت رطوبتی آسفالت‌های شیشه‌ای، دانشگاه گیلان.
- 43 عامری. (۱۳۹۹) بررسی عوامل تأثیرگذار بر حساسیت رطوبتی مخلوط آسفالتی نیمه گرم (wma).
- 44 Karimi, M.M., et al., (2018) Induced heating-healing characterization of activated carbon modified asphalt concrete under microwave radiation. *Construction and Building Materials*. 178: p. 254-271.
- 45 Norambuena-Contreras, J. and A. Garcia, (2016) Self-healing of asphalt mixture by microwave and induction heating. *Materials & Design*. 106: p. 404-414.

Abstract

Asphalt pavements need maintenance and repair over time, during service life. Pavement failures are caused by factors such as traffic load, temperature, humidity, etc. that ignoring the above can exacerbate these failures. In this research, we have tried to produce an environmentally friendly asphalt mixture that has the ability to repair the damages, by using the self-healing properties of the asphalt mixtures and waste materials. For this purpose, two types of additives (coal, waste, and edible oil waste), which are themselves industrial waste and have not been used in asphalt repair. They have been used to improve the self-healing process and also improve the environment.

To find the appropriate additive, in addition to environmental issues, it must be considered that the additive can be heated by microwaves. Coal waste and waste cooking oils are two additives that, while economical, due to their nature, can cause temperature rise by microwaves and cause a self-healing process in asphalt pavement.

The samples made by adding 20% coal waste as a substitute for fine aggregate materials and 5% of waste cooking oils (based on bitumen weight), asphalt mixture has healed 50 and 54% respectively and its rupture improved 16% by adding 20% coal waste compared with control samples. Also, the moisture sensitivity index was obtained for the sample containing 20% coal waste and the sample containing 5% waste cooking oil, which are optimal samples. Also, the moisture sensitivity index was obtained 76 and 77 respectively for the sample containing 20% coal waste and the sample containing 5% waste cooking oil (optimal samples in term of healing) that is acceptable in term of moisture resistance.

Keywords: self healing ,waste oil , coal waste , moisture sensitivity , 3point bending test , hot mix asphalt



Shahrood University of Technology

Faculty of *Civil Engineering*

M.Sc. Thesis in Roads and transport Engineering

**The evaluation of using coal in asphalt mixture to
investigate the moisture sensitivity and healing of asphalt**

By:

Mohammad Yousefi Moghaddam

Supervisor:

Dr. Seyed Ali Hossieni

August 2021