

# ارزیابی آزمایشگاهی تأثیر افزودنی‌های نیمه گرم ساسوبیت و رئوفالت بر خصوصیات خستگی مخلوط‌های آسفالتی حاوی مصالح خرده آسفالت

## مقاله پژوهشی

علی پایدار، گروه مهندسی عمران، واحد ملارد، دانشگاه آزاد اسلامی، ملارد، تهران، ایران  
علیرضا عاملی\*، گروه مهندسی عمران، واحد ملارد، دانشگاه آزاد اسلامی، ملارد، تهران، ایران  
فرزین پورحیدری معقانی، دانش آموخته کارشناسی ارشد، گروه مهندسی عمران، واحد ملارد، دانشگاه آزاد اسلامی، ملارد، تهران، ایران

\*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: Amelii@gmail.com

دریافت: ۹۹/۰۵/۲۷ - پذیرش: ۹۹/۱۰/۰۵

صفحه ۳۴-۱۹

## چکیده

در این تحقیق تأثیر استفاده از دو افزودنی نیمه گرم ساسوبیت و رئوفالت بر خصوصیات خستگی مخلوط‌های حاوی مصالح خرده آسفالت مورد ارزیابی قرار گرفت. بدین منظور نمونه‌های آزمایشگاهی حاوی ۱۰۰ درصد RAP و یک مخلوط تازه با استفاده از مصالح سنگی RAP که قیر آن جدا شده است، ساخته شد. مخلوط‌های بازیافتی شامل یک نمونه بازیافتی گرم و سه نمونه بازیافتی نیمه گرم (۱ نمونه بدون افزودنی، ۱ نمونه حاوی افزودنی ساسوبیت، ۱ نمونه حاوی افزودنی رئوفالت) می‌باشد. در این تحقیق آزمایش‌های مختلفی از جمله: مقاومت کششی غیر مستقیم، مدول برجهنگی و خستگی بر روی نمونه‌های آزمایشگاهی انجام شد. آزمایش خستگی براساس تست تیر خمشی چهار نقطه‌ای با سطح کرنش ثابت در سه سطح ۰.۶، ۱.۰ و ۱.۰۰ میکرو کرنش با بارگذاری سینوسی انجام شد. عمر خستگی نمونه‌ها براساس کاهش پنجاه درصدی در مدول سختی اولیه ارزیابی شد. نتایج نشان داد که افزودنی‌های ساسوبیت و رئوفالت تأثیر مثبتی در بهبود تراکم و خواص عملکردی مخلوط‌ها داشته است. در عملکرد خستگی و ترک‌های دمای پایین علی‌رغم اثر مثبت افزودنی‌ها، مخلوط گرم عملکرد بهتری داشته است.

واژه‌های کلیدی: خستگی، مخلوط نیمه گرم، مصالح خرده آسفالت، ساسوبیت، رئوفالت

## ۱- مقدمه

صرفه‌جویی کرده است. (Hansen & Copeland, 2015). استفاده از RAP نشان‌دهنده است که با فن‌آوری‌های مخلوط آسفالت گرم (WMA<sup>۲</sup>) سازگار است. WMA به مخلوط‌های آسفالت اشاره دارد که در دهه‌های پایین‌تر از آنچه که HMA<sup>۳</sup> استفاده می‌شود، تولید می‌شوند. از زمان اولین معرفی آن‌ها در اروپا در اواخر دهه ۱۹۹۰، تکنولوژی‌های WMA شاهد توسعه جهانی بوده‌اند. کاهش قابل توجه دمای تولید منجر به کاهش مصرف سوخت و کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای می‌شود. علاوه بر این، پیرشدگی آسفالت در طول تولید و ساخت WMA با دمای

در دهه‌های گذشته، مواد بازیافتی مانند آسفالت بازیافتی (RAP<sup>۱</sup>) به طور گسترده در روسازی‌های آسفالتی با روند افزایش درصد در مخلوط مصرف شده‌اند. معرفی RAP در مواد آسفالت، مزایای اقتصادی و زیست محیطی قابل توجهی را با کاهش مقدار آسفالت دست نخورده و مصالح مورد نیاز ارائه می‌دهد. براساس یک بررسی صنعتی اخیر که توسط انجمن ملی روسازی انجام شد، در طول فصل ساخت و ساز ۲۰۱۴، بیش از ۷۱٫۹ میلیون تن RAP (افزایش بیش از ۲۸٪ از سال ۲۰۰۹) جهت ساخت مخلوط‌های آسفالتی جدید مورد استفاده قرار گرفت که بیش از ۲٫۸ میلیارد دلار

تیر نشان داد که ترکیب RAP عملکرد خستگی HMA را کاهش می‌دهد، در حالی که برای افزایش WMA در محتوای RAP بهبودهایی را به همراه دارد. با این حال، نتایج آزمون خزش کششی غیر مستقیم، مشاهدات متفاوتی را بسته به پارامترهای ارزیابی شده ارائه داد. در حالی که استفاده از مفهوم نسبت انرژی نشان داد که افزودن مصالح خرد آسفالت تنها عمر خستگی مخلوط‌های HMA و WMA را کاهش داد. (Zhao et al, 2012)

به طور مشابه، با توجه به یک مطالعه تجربی توسط هوانگ، شو و ووکوسلاو جوویچ (۲۰۱۱)، استفاده از تست خستگی تیر و معیار شکست کاهش سختی اولیه ۵۰٪ نشان داد که افزایش در محتوای RAP منجر به افزایش مقاومت خستگی در HMA می‌شود. بررسی ادبیات غیر جامع بالا، منطق را تا حدی پشت استفاده ترکیبی WMA و آسفالت بازیافت شده تأیید می‌کند. همچنین پیچیدگی‌های مربوط به ویژگی خستگی را نشان می‌دهد که به عوامل متعددی از جمله روش‌های تست، پارامترهای ارزیابی و چگونگی تعریف شکست خستگی در هر روش تست بستگی دارد (Huang et al, 2011). در این پژوهش مخلوط‌های اصلاح شده با افزودنی‌های نیمه گرم ساسوبیت و رئوفالت همراه با ۱۰۰ درصد مصالح RAP ساخته شد. با توجه به مروری بر ادبیات، مطالعات اندکی در استفاده از رئوفالت جهت اصلاح مخلوط‌های بازیافتی استفاده شده است.

## ۲- روش تحقیق

هدف از این پژوهش ارزیابی آزمایشگاهی خصوصیات خستگی مخلوط‌های اسفالتی حاوی مصالح خرد آسفالتی اصلاح شده با افزودنی‌های نیمه گرم می‌باشد. همچنین امکان سنجی جایگزینی مصالح خرد آسفالتی با کل مصالح سنگی معمولی مورد بررسی قرار گرفت. در این تحقیق از دو نوع افزودنی نیمه گرم ساسوبیت و رئوفالت جهت اصلاح مخلوط اسفالتی مورد استفاده گردید. در این تحقیق از قیر ۱۰۰-۸۵ جهت ساخت مخلوط آسفالتی استفاده گردید. جهت ساخت مخلوط‌های آسفالتی گرم از مصالح سنگی جدا شده از قیر و از قیر ۷۰-۶۰ استفاده شد و سرانجام ۵ نوع مخلوط مختلف مورد ارزیابی قرار گرفت که مشخصات نمونه‌های ساخته شده در جدول ۱ آمده است.

پایین تر کاهش می‌یابد، که به تعادل اثرات نامطلوب قیر پیر شده در RAP با توجه به عملکرد خستگی مخلوط کمک می‌کند. لی و همکاران تحقیقاتی را در زمینه تاثیر افزودنی‌های WMA بر روی خصوصیات قیرهای بازیافتی انجام دادند (Lee et al, 2009). در تحقیقات آنها ساسوبیت و اسکوزیته را کاهش داده اما استفاده از قیر نرم‌تر تأثیر بیشتری در کاهش و اسکوزیته داشته است. اثر استفاده از قیر نرم‌تر در بهبود عملکرد خستگی بیشتر از افزودنی‌ها بوده است در واقع می‌توان با استفاده از افزودنی‌ها در هنگام ساخت، دمای ساخت را کاهش داد و با استفاده از یک قیر نرم‌تر خصوصیات مخلوط را بهبود بخشید. مالیک و همکاران نشان دادند، استفاده از قیر نرم‌تر مناسب با مقدار مناسب افزودنی WMA (می‌تواند باعث جوان کردن قیر RAP بشود تا حدی که با مخلوط‌های جدید قابل مقایسه شود. آنها موفق شدند مخلوط بازیافتی نیمه گرم با ۷۵٪ RAP با افزودنی ساسوبیت تولید کنند به طوری که مخلوط بازیافتی از نظر درصد فضای خالی، مقاومت کششی در دمای پایین و پتانسیل شیارشدگی با مخلوط‌های رایج قابل مقایسه باشد (Mallick et al, 2008, Mallick et al, 2009). مطالعات آزمایشگاهی نشان داده اند که در نتیجه پیر شدن قیر، ترکیب RAP از HMA و WMA با بهبود مقاومت مخلوط در برابر شیار و حساسیت رطوبت بهبود می‌بخشد. به این ترتیب، نگرانی‌ها و تحقیقات معمولاً بر مقاومت ترک مخلوط تمرکز دارند. ژو و همکاران (۲۰۱۳) از تست روکش تگزاس برای ارزیابی تاثیر RAP بر مقاومت خستگی HMA با درجه عملکرد (PG) ۶۴ - ۲۲ و ۷۰ PG - ۲۲ استفاده کردند. مشخص شد که برای هر دو مخلوط، افزودن RAP به طور قابل توجهی عملکرد خستگی مواد را بدتر می‌کند (Zhou et al, 2012). محمد و همکاران (۲۰۰۳) از طریق مجموعه‌ای از آزمایش‌های مکانیکی از جمله خستگی تیر، مقاومت کششی غیرمستقیم و آزمون‌های خزش کششی غیرمستقیم به این نتیجه رسیدند که با افزایش درصد چسب کهنه بازیافتی از روسازی‌های صحرائی، مقاومت خستگی مواد کاهش می‌یابد. (Mohammad et al, 2003). ژائو و همکاران (۲۰۱۲) از انواع تست‌های آزمایشگاهی برای بررسی تاثیر محتوای RAP بر عملکرد خستگی HMA و WMA استفاده کردند. در مطالعه آنها، نتایج تست خستگی

جدول ۱. مشخصات نمونه‌های ساخته‌شده

نام اختصاری	مصالح	قیر جدید	نوع افزودنی	درصد افزودنی	دمای اختلاط (سانتی‌گراد)	دمای تراکم (سانتی‌گراد)
HMA150	RAP	۸۵-۱۰۰ (٪۱)	-	-	۱۳۰	۱۳۰
W-S	RAP	۸۵-۱۰۰ (٪۱)	ساسوبیت	٪۲	۱۳۰	۱۱۵
W-R	RAP	۸۵-۱۰۰ (٪۱)	رئوفالت LT70	٪۳	۱۳۰	۱۱۵
HMA130	RAP	۸۵-۱۰۰ (٪۱)	-	-	۱۳۰	۱۱۵
H-V	RAP مصالح سنگی (جدا شده از قیر)	۷۰-۶۰ (٪۵)	-	-	۱۶۰	۱۳۵

#### ۱-۲- مصالح سنگی و قیر

مصالح خرده آسفالت مورد استفاده در این پژوهش از انبار دپوی مصالح خرده آسفالت شهرداری منطقه ۱۳ تهران تهیه شد. در کشور ایران عموماً از قیر ۶۰/۷۰ برای ساخت آسفالت‌های جدید استفاده می‌شود. اما بر طبق مطالعات گذشته برای ساخت نمونه‌های بازیافتی با درصد RAP بالای ۴۰ درصد باید از یک قیر نرم‌تر از قیر مورد نظر استفاده کرد (He et al, 2008) برای نمونه‌های ساخته شده با مصالح خرده آسفالت در این پژوهش از قیر ۸۵/۱۰۰ استفاده شد. این قیر از شرکت نفت پاسارگاد تهیه شد و خصوصیات آن در جدول ۲ آمده است. افزودنی‌های ساسوبیت و رئوفالت به عنوان افزودنی‌های نیمه گرم در ساخت نمونه‌ها استفاده شد. این افزودنی‌ها واکنش‌های مصنوعی هستند که ویسکوزیته قیر را کاهش می‌دهند. خصوصیات افزودنی‌ها در جدول ۳ آمده است.

نمونه‌های نیمه گرم ساخته شده با افزودنی‌های ساسوبیت و رئوفالت نمونه‌های مورد نظر برای بررسی استفاده از تکنولوژی WMA در بازیافت با درصد بالای RAP می‌باشد. برای بررسی امکان بازیافت با درصد بالای RAP با استفاده از WMA نمونه تازه با استفاده از مصالح جدا شده از قیر ساخته شد تا با مخلوط‌های مورد نظر مقایسه شود. برای بررسی رفتار مصالح خرده آسفالت همراه با افزودنی‌های نیمه گرم دو مخلوط بازیافتی نیمه گرم و گرم بدون افزودنی ساخته شد تا اثر کاهش حرارت و افزایش این افزودنی‌ها در دمای پایین‌تر به طور جداگانه بررسی شود. نمونه‌های مختلفی ساخته شد و تحت آزمایش‌های استقامت مارشال، کشش غیرمستقیم، مدول برجهنگی، تیر خمشی ۴ نقطه ای انجام پذیرفت.

جدول ۲. مشخصات فیزیکی قیر ۸۵/۱۰۰

نوع آزمایش	استاندارد	نتیجه آزمایش
نقطه نرمی	ASTM D36	۴۷ درجه سانتی‌گراد
درجه نفوذ در دمای ۲۵ درجه	ASTM D5	۹۳ دسی میلی‌متر
درجه اشتعال	ASTM D92	۳۰۴ درجه سانتی‌گراد
شکل پذیری در دمای ۲۵	ASTM D113	بیش از ۱۰۰ سانتی‌متر

جدول ۳. مشخصات افزودنی‌ها

خصوصیات	رئوفالت LT70	ساسوبیت
اجزای سازنده	واکنش‌های پارافینی و هیدروکربنی	هیدروکربن پلی اتیلن آلفاتیک
حالت فیزیکی	پاستیل	پاستیل و پرل
رنگ	سفید	سفید
بو	بی بو	بی بو
چگالی حجمی	۷۷۰ کیلوگرم بر مترمکعب	۶۲۲-۵۹۰ کیلوگرم بر مترمکعب
نقطه اشتعال	۲۱۰ درجه سانتیگراد	۲۹۰ درجه سانتیگراد
حلالیت در آب	غیر قابل حل	غیر قابل حل
دز	۲-۴٪	۱-۳٪

## ۲-۲- محاسبه درصد قیر RAP

قیر موجود در مصالح RAP از روش سوزاندن AASHTO TP53-95 استفاده گردید. در این روش حدود ۲ کیلوگرم مصالح RAP که به طور دقیق وزن شده در دستگاه سوزاندن بیش از ۹۰ دقیقه تحت حرارت ۵۰۰ تا ۶۰۰ درجه سانتیگراد قرار گرفت تا قیر آن به شکل گاز درآید و از مخلوط خارج گردد. سپس مصالح موجود دوباره وزن شد تا درصد قیر موجود محاسبه گردد و مقدار ۰/۵ به دست آمد. درصد قیر کلی نمونه‌های بازیافتی ساخته شده از رابطه زیر به دست می‌آید.

ابتدا درصد رطوبت مصالح RAP با استفاده از روش AASHTO T329 اندازه‌گیری گردید. در این روش حدود یک کیلوگرم از مصالح وزن می‌شود و در دمای ۱۰۵ درجه سانتیگراد در گرم‌خانه قرار داده می‌شود و پس از ۹۰ دقیقه از گرم‌خانه خارج و دوباره وزن می‌گردد. بدین طورت رطوبت از دست رفته محاسبه می‌گردد. این مصالح مجدداً به مدت ۳۰ دقیقه در گرم‌خانه قرار داده می‌شود و دوباره وزن می‌شود. اگر رطوبت از دست رفته در این مرحله نسبت به مرحله قبلی کمتر از ۰/۰۵ باشد، آزمایش متوقف می‌گردد و در غیراینصورت این روند ادامه می‌یابد. برای محاسبه درصد

$$\text{درصد قیر کل نمونه} = \frac{\text{aged } B + \text{virgin } B}{\text{RAP} + \text{virgin } B} = \frac{5.04 + 1}{100 + 1} = 5.98\% \cong 6\%$$

(۱)



شکل ۱. قرارگیری مصالح در دستگاه

جدول ۴. نتایج به دست آمده برای درصد قیر موجود در مصالح RAP

۰/۳۲	درصد رطوبت مصالح
۵/۳۶	درصد قیر به دست آمده از ACT
۵/۰۴	درصد قیر واقعی

پس از جداکردن قیر از سنگدانه‌ها (شکل برخی از مشخصات مصالح سنگی از جمله ضریب تطویل، ضریب تورق و درصد شکستگی) به دست آمد. مشخصات در جدول ۵ آمده است.

جدول ۵. مشخصات مصالح سنگی RAP استفاده شده

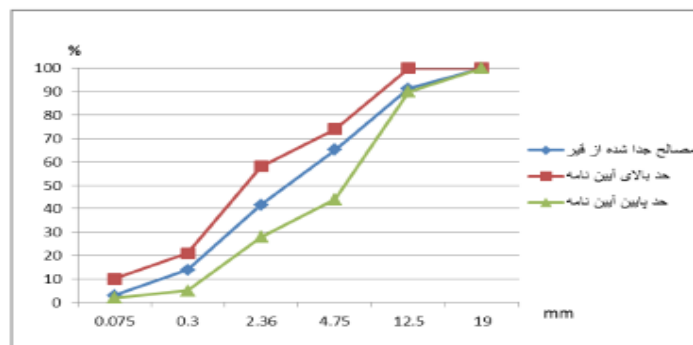
نتایج (%)	استاندارد	آزمایش
۲۲/۰۲	BS 812	ضریب تورق
۸۸/۲۷	ASTM-D5821	حداقل درصد شکستگی در دو وجه
۸/۴۹	BS 812	ضریب تطویل



شکل ۲. مصالح بدست آمده از RAP

از قیر در مخلوط نمونه‌های استوانه‌های و تیر خستگی به همین شکل باشد و از تغییرات دانه بندی در نمونه‌های مختلف جلوگیری شود، مقدار کافی از مصالح RAP عبوری از الک ۱۹ میلی متر بر روی شش الک دانه بندی شماره ۴ دانه بندی شد (شکل ۴) و برای ساخت هر نمونه، نسبت مانده روی هر الک رعایت شد.

دانه بندی مصالح جدا شده از قیر، در شکل ۳ نشان داده شده است. مشاهده میشود که دانه بندی این مصالح در میان دو حد بالا و پایین دانه بندی شماره ۴ نشریه ۲۳۴ برای دانه بندی پیوسته بتن آسفالتی می باشد. در این پژوهش برای کنترل راحت تر دانه بندی از مصالح RAP عبوری از الک ۱۹ میلی متر استفاده شد. برای اینکه دانه بندی مصالح جدا شده



شکل ۳. نمودار دانه بندی مصالح جدا شده از قیر



شکل ۴. مصالح RAP مانده روی هر الک

ابتدا هر کدام از این نمونه‌های ۱۲۰۰ گرمی با مقدار قیر بهینه و برای نمونه‌های آسفالت گرم با مقدار مشخص افزودنی به همراه قیر مخلوط گردیده‌اند. قالب تراکم نیز به همراه مخلوط در این دما داخل اون گرم شد. سپس مخلوط به داخل قالب ریخته و تراکم بر روی نمونه‌ها با دستگاه مورد نظر انجام گرفت. متوسط زمان تراکم برای نمونه‌ها حدود ۱۵ دقیقه می‌باشد. بعد از مدت زمان برای خنک شدن نمونه‌ها، نمونه‌ها از داخل قالب‌ها جدا گردید. نمایی از نحوه ساخت و تراکم دال توسط این دستگاه در شکل‌های ۵ و ۶ نشان داده شده است. در این تحقیق، برای ارزیابی رفتار خستگی مخلوط‌های آسفالتی، آزمایش تحت کرنش ثابت انجام شد. تمامی نمونه‌ها با ۴ درصد فضای خالی در درصد قیر بهینه ساخته شد. برای جلوگیری از ایجاد درصد فضای زیاد در سطح نمونه، ۱۰ میلیمتر از تمامی وجوه نمونه بریده شد. سپس نمونه‌ها برای رسیدن به ابعاد مورد نیاز برای آزمایش خستگی با استفاده از برش آب خنک مطابق ابعاد استاندارد AASHTO-T321 (۵۰×۶۳،۵×۳۸۰ میلیمتر) برش داده می‌شوند.

برای محاسبه درصد قیر تازه بهینه، مصالح RAP به مدت ۲ ساعت در دمای ۱۵۰ درجه سانتیگراد برای مخلوط گرم و در دمای ۱۳۰ درجه سانتیگراد برای مخلوط نیمه گرم قرار داده شدند. این زمان برای رسیدن این مصالح به دمای مورد نظر کافی می‌باشد. نمونه‌های بازیافتی با سه مقدار قیر مختلف ۵/۱، ۱ و ۵/۰ درصد با استفاده از چکش مارشال و ۷۵ ضربه به هر طرف متراکم شدند. در نهایت از بین مخلوط‌هایی که با درصد قیر مختلف ساخته شد مخلوط با قیر ۱ درصد انتخاب شد زیرا با وجود اینکه مقاومت و روانی نمونه‌ها به هم نزدیک بود. درصد فضای خالی مخلوط‌های ۱ درصد قیر جدید از سایر نمونه‌ها کمتر بود. برای تراکم نمونه‌های تیر خستگی در این تحقیق از دستگاه ساخته شده در مرکز تحقیقات قیر و مخلوط‌های آسفالتی دانشگاه علم و صنعت ایران استفاده گردید. این دستگاه بر اساس استاندارد تراکم مالشی خطی دپارتمان کلرادو ساخته شده است [Colorado Department of Transportation, 2009]

برای ساخت هر دال از ۹ عدد مصالح سنگی ۱۲۰۰ گرمی مورد نیاز برای ساخت نمونه مارشال، استفاده شده است.



شکل ۵. نمایی از نحوه ساخت و تراکم دال



شکل ۶. نمایی از نحوه برش دال

### ۳-روش کار آزمایش

#### ۳-۱-آزمایش کشش غیر مستقیم

در آزمایش مقاومت کششی غیرمستقیم، یک نمونه استوانه‌ای به صورت قطری بارگذاری می‌شود. آزمایش کشش غیرمستقیم برای تعیین مقاومت کششی مخلوط‌های آسفالتی و پیش‌بینی ظهور ترک‌ها در مخلوط آسفالتی استفاده می‌شود. همچنین می‌توان از این آزمایش برای ارزیابی عمر خستگی نیز استفاده کرد. آزمایش کششی غیرمستقیم بر اساس آیین‌نامه ASTM D6931-12 با نرخ ثابت ۵۰/۸ میلیمتر بر دقیقه و دمای ۲۰ درجه سانتی‌گراد انجام شد. مقاومت کششی غیرمستقیم نمونه‌ها با استفاده از معادله زیر تعیین شد:

$$ITS = \frac{2P_{max}}{\pi Dt} \quad (2)$$

ITS: مقاومت کششی نمونه‌ها بر حسب پاسکال

$P_{max}$ : بار اعمالی در زمان شکست بر حسب نیوتون

D: قطر نمونه‌ها بر حسب میلیمتر

t: ارتفاع نمونه‌ها بر اساس میلیمتر می‌باشد.

انرژی شکست و مقاومت کششی به عنوان دو پارامتر به طور همزمان برای ارزیابی رفتار خستگی مخلوط‌های آسفالتی مورد استفاده قرار می‌گیرد [Khodary Moalla, 2010]. Hamed, 2010 انرژی شکست به عنوان کار انجام شده جهت ایجاد یک ترک که برابر است با سطح زیر منحنی بار-تغییرشکل شکست نمونه تعریف می‌گردد. برای محاسبه چگالی انرژی شکست از آزمایش کشش غیر مستقیم، انرژی شکست بر حجم مخلوط تقسیم می‌شود. چگالی انرژی شکست براساس معادله زیر محاسبه می‌گردد [Roque et.al, 2002]

(۳)

$$FE = \frac{\int_0^{\delta_{max}} P(\delta) d\delta}{V}$$

FE چگالی انرژی شکست (MPa)، P بار، (N)، V حجم

نمونه ( $\text{mm}^3$ )،  $\delta$  تغییر شکل می‌باشد.

#### ۳-۲-مدول برجهندگی

آزمایش مدول برجهندگی در دماهای پایین به نحوی مرتبط با ترک‌خوردگی حرارتی می‌باشد. تحقیقات متعددی نشان داده است که مخلوط‌های سخت تر در دماهای پایین تر بیشتر مستعد ترک‌خوردگی حرارتی می‌باشند. برای تعیین مدول برجهندگی از استاندارد AS 2891-13-1-1995 استفاده شد. ابتدا نمونه‌ها به مدت ۲۴ ساعت در محفظه دستگاه در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد قرار داده شد. شکل بارگذاری نیمه سینوسی، مدت اعمال بار ۰/۱ ثانیه، زمان استراحت ۰/۹ ثانیه و ضریب پواسون ۰/۳۵ فرض گردید. در این آزمایش به ازای هر مخلوط، ۳ نمونه آسفالتی تهیه و روی هر نمونه ۵ پالس تکرار شد و میانگین نتایج به وسیله دستگاه نمایش داده شد. مدول برجهندگی بر اساس معادله زیر محاسبه می‌گردد:

$$M_r = \frac{P(\mu+0.2734)}{\sigma \times t} \quad (4)$$

$M_r$  = مدول برجهندگی بر حسب مگا پاسکال

P = بار تکراری بر حسب نیوتون

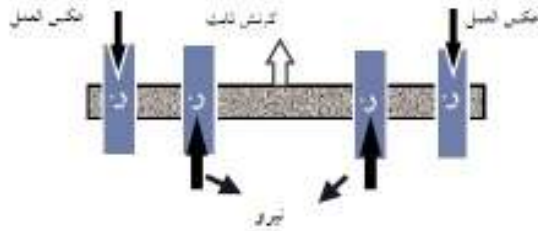
$\mu$  = نسبت پواسون

t = ضخامت نمونه بر حسب میلی‌متر

$\sigma$  = کل تغییر شکل بازگشت‌پذیر افقی بر حسب میلی‌متر

#### ۳-۳-آزمایش تیر خمشی چهار نقطه ای خستگی

مقاومت خستگی تیرها براساس آزمایش تیر خمشی چهار نقطه‌ای براساس آیین‌نامه AASHTO T321-07 ارزیابی شد. هدف از این آزمایش تعیین عمر خستگی تیرها در سطوح کرنش مختلف می‌باشد. تنظیمات و طرح آزمایش تیر خمشی چهارنقطه‌ای در شکل ۷ نشان داده شده است.



شکل ۷. تنظیمات و طرح آزمایش تیر خمشی چهار نقطه‌ای

که  $\varepsilon$  حداکثر کرنش اعمال شده بر تیر،  $\delta$  تغییر شکل ماکزیمم در وسط تیر (میلیمتر)،  $G_0$  طول خارجی گینج (۳۵۵/۵ میلیمتر)،  $G_1$  طول داخلی گینج (۱۱۸/۵ میلیمتر)،  $\sigma$  حداکثر تنش کششی (کیلوپاسکال)،  $P$  حداکثر نیرو (کیلو نیوتن)،  $B$  میانگین عرض تیر (میلیمتر)،  $S$  مدول سختی تیر (مگاپاسکال). آزمایش خستگی تا زمانی که مدول سختی به نصف مقدار اولیه خود برسد، ادامه می‌یابد. بعد از آزمایش عمر خستگی تیرها، عمر خستگی مخلوط با معادله زیر محاسبه گردید [Arabani and Mirabdolazimi, 2011]

$$N_f = a\varepsilon^{-b} \quad (8)$$

که  $N_f$  تعداد سیکل بارگذاری تا خستگی،  $\varepsilon$  دامنه کرنش مورد استفاده در آزمایش خستگی،  $a$  و  $b$  ضرایب ثابت می‌باشند. انرژی تلف شده در هر سیکل بارگذاری و انرژی تلف شده تجمعی به ترتیب با استفاده از معادله‌های (۸) و (۹) محاسبه می‌شوند:

$$D = \pi\sigma\varepsilon \sin(360f\varphi) \quad (9)$$

آزمایش خستگی می‌تواند هم در شرایط تنش ثابت و کرنش ثابت انجام شود. در حالت تنش ثابت، شکست نمونه بلافاصله بعد از شروع ترک تعریف می‌شود. در حالت کرنش ثابت، شکست نمونه زمانی که مدول سختی آن به نصف مدول اولیه آن می‌رسد، تعریف می‌گردد. این معیار بر اساس آیین نامه AASHTO-T321 استفاده شد. [AASHTO, 2004]. تمامی نمونه‌ها در سطح کرنش ثابت ۶۰۰، ۸۰۰ و ۱۰۰۰ میکرو استرین با بارگذاری سینوسی مورد آزمایش قرار گرفتند. آزمایش در دمای ثابت ۲۰ درجه سانتیگراد انجام شد. نمونه‌ها به مدت ۲ ساعت قبل از آزمایش در دمای ۲۰ درجه سانتیگراد قرار گرفتند تا به دمای مذکور برسند. فرکانس بارگذاری ۱۰ هرتز می‌باشد. [AASHTO, 2004].

مدول سختی براساس نیرو و جابه‌جایی اندازه‌گیری شده بعد از ۵۰ سیکل براساس معادلات زیر محاسبه شد [Moddares and Hamed, 2013], [Quanta Liu et al, 2012].

$$\varepsilon = \frac{12\delta h \times 10^6}{3(G_0^2 - 4G_1^2)} \quad (5)$$

$$\sigma = \frac{G_0 P}{Bh^2} \quad (6)$$

$$S = \frac{1000\sigma}{\varepsilon} \quad (7)$$



ان دارد. در شکل های ۸ و ۹ نمودارهای نتایج مربوط به وزن مخصوص و درصد فضای خالی را مشاهده می کنید. همانطور که انتظار می رود مخلوط باز یافتی گرم (HMA150) فضای خالی بیشتری نسبت به مخلوط تازه داشته و ملاحظه می شود هنگامی که دما از ۱۵۰ به ۱۳۰ درجه سانتیگراد کاهش می یابد فضای خالی مخلوط افزایش زیادی داشته و به ۸/۲۲ درصد می رسد (مخلوط HMA130) اما افزودن افزودنی های نیمه گرم ساسوبیت و رئوفالت (مخلوط های WS, WR) فضای خالی نمونه ها را تا حدی کاهش داده و به مخلوط باز یافتی گرم نزدیک کرده است. این امر نشان می دهد ساسوبیت و رئوفالت باعث بهبود تراکم در دمای ۱۳۰ درجه شده است اما اثر کاهش ۲۰ درجه های دما را به طور کامل جبران نکرده است.

فرکانس  $f$  (J/m<sup>3</sup>) انرژی تلف شده  $D$

تأخیر زمانی (ثانیه) می باشد.  $\phi$  بارگذاری (هرتز)،

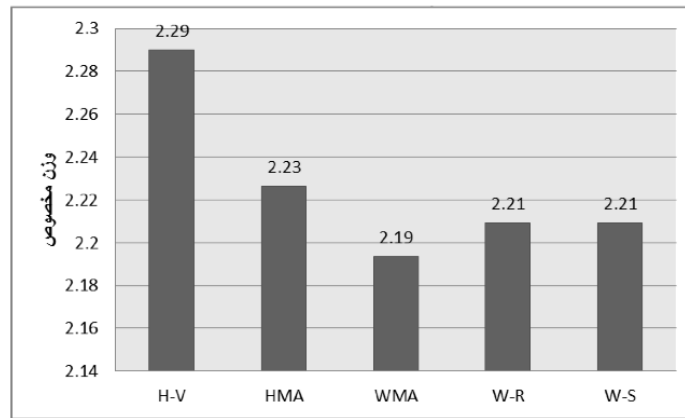
$$W = \sum_{i=1}^{i=n} D_i \quad (10)$$

که  $W$  انرژی شکست تجمعی (J/m<sup>3</sup>)،  $D_i$  انرژی شکست سیکل آم.

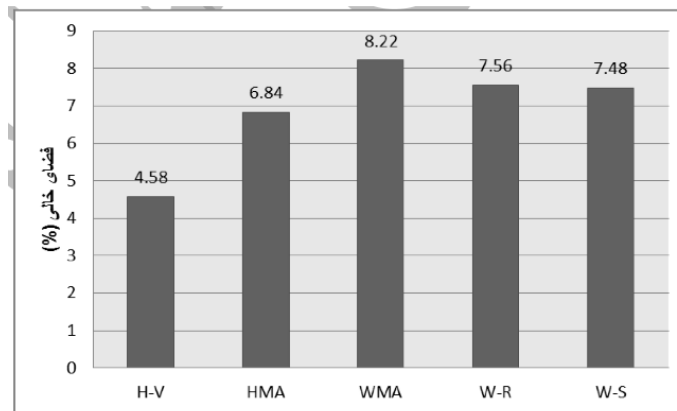
#### ۴-تحلیل نتایج آزمایشات

##### ۴-۱-مقاومت مارشال

مقدار فضای خالی و وزن مخصوص آسفالت اثر زیادی بر خصوصیات آسفالت از جمله سختی، مقاومت و نفوذپذیری



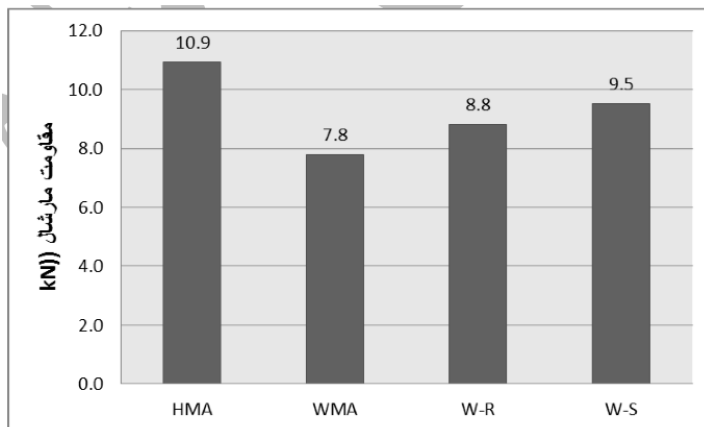
شکل ۸. نتایج مربوط به وزن مخصوص نمونه ها



شکل ۹. نتایج مربوط به درصد فضای خالی نمونه ها

بیشتری از خود نشان داده و افزودنی‌ها در افزایش مقاومت تاثیر داشته‌اند. نمونه ساسوبیتی مقاومت بیشتری از نمونه رئوفالتی داشته و بیشترین مقاومت مربوط به نمونه بازیافتی گرم می‌باشد.

نتایج آزمایش مقاومت مارشال در شکل ۱۰ نشان داده شده است. نمونه‌های بازیافتی به جز نمونه نیمه گرم بدون افزودنی که مقدار جزئی کمتر از حد مجاز است، بیشتر از مقدار محاز می‌باشند. نمونه‌ها با فضای خالی کمتر، مقاومت



شکل ۱۰. نتایج مقاومت مارشال نمونه‌ها

#### ۴-۲- آزمایش مدول برجهندگی

نیز بیشتر شده است. این امر به دو دلیل می‌تواند اتفاق بی‌افتد: (۱) افزودنی‌ها درصد قیر موثر را افزایش داده‌اند در نتیجه قیر بیشتری از RAP در اختلاط شرکت کرده و موجب سختتر شدن قیری شود که بار را تحمل می‌کند. (۲) واکنش‌های ارگانیک که از فرایند فیشر-تراپس به دست می‌آیند در دمای اختلاط ویسکوزیته قیر را کاهش می‌دهند اما هنگامی که دما پایین می‌آید یک ساختار شبکه‌های کریستالی به وجود می‌آورند که موجب سختی قیر می‌شوند. مخلوط بازیافتی نیمه گرم ساسوبیتی بیشترین مدول برجهندگی را داشته است و مدول مخلوط بازیافتی رئوفالتی نسبت به نمونه ساسوبیتی کمتر بوده و به مخلوط بازیافتی گرم نزدیک‌تر است.

همانطور که در نمودار شکل ۱۱ نشان داده شده است کلیه مخلوط‌های بازیافتی مدول بالاتری نسبت به مخلوط تازه دارند. این امر به دلیل استفاده از مصالح RAP و افزایش سختی مخلوط می‌باشد. مخلوط HMA130 نزدیک‌ترین مقدار به مخلوط تازه را دارد اما این امر دلیل بر عملکرد بهتر این مخلوط نبوده بلکه می‌تواند نتیجه دو عامل مختلف باشد: یکی فضای خالی بیشتر نسبت به سایر نمونه‌های بازیافتی و دیگری اینکه دمای پایین‌تر ۱۳۰ درجه سانتیگراد موجب شده اختلاط قیر جدید و قیر RAP به خوبی انجام نشود و نمونه مانند مخلوطی با قیر نرم‌تر عمل کند. نتایج نشان می‌دهد افزودنی‌ها به شدت موجب افزایش مدول برجهندگی شده است به طوری که مدول نمونه‌های بازیافتی نیمه گرم با افزودنی از مدول نمونه بازیافتی گرم

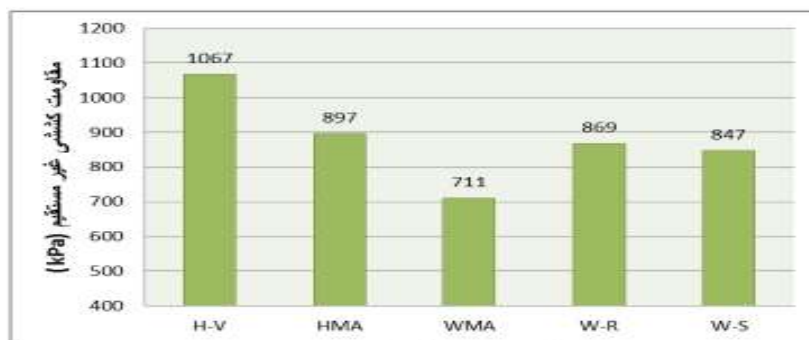


شکل ۱۱. تعیین MR برای نمونه‌های ساخته شده

#### ۴-۳- آزمایش کششی غیر مستقیم

محدوده قرار دارند. نتایج نشان می‌دهد کاهش دمای ساخت در بازیافت موجب کاهش مقاومت کششی مخلوط شده است این امر به دلیل عدم تراکم مطلوب در دمای پایین‌تر و همچنین عدم اختلاط مناسب دو قیر و کاهش قیر موثر در تحمل بار اتفاق می‌افتد. اما در اینجا افزودنیها توانسته‌اند اثر کاهش دما را تا حد قابل ملاحظه‌ای جبران کنند. افزودنیهای ساسوبیت و رئوفالت ضمن تسهیل تراکم و افزایش درصد قیر موثر به دلیل اینکه از ساختار ملکولی بلند زنجیره‌ای برخوردارند موجب افزایش پایداری قیر می‌شوند. عملکرد کششی غیر مستقیم نمونه رئوفالتی اندکی بیشتر از نمونه ساسوبیتی بوده است.

پس از اینکه نمونه‌های ساخته شده با قیر بهینه تحت آزمایش کششی غیر مستقیم قرار گرفت. نتایج نشان می‌دهد مقاومت کششی تمامی نمونه‌ها از نمونه شاهد کمتر می‌باشد که دلیل آن چسبندگی بیشتر قیر خالص و فضای خالی کمتر می‌باشد. زیرا فضای خالی کمتر موجب افزایش سطح مقاوم در برابر نیرو شده و تنش موثر را کاهش می‌دهد. در میان مخلوط‌های بازیافتی مخلوط بازیافتی نیمه گرم بدون افزودنی کمترین و مخلوط بازیافتی گرم بیشترین مقاومت کششی را از خود نشان داده است. هرچند تفاوت مقاومت کششی مخلوط بازیافتی گرم با مخلوط‌های بازیافتی نیمه گرم با افزودنی ساسوبیت و رئوفالت ناچیز می‌باشد و تقریباً در یک



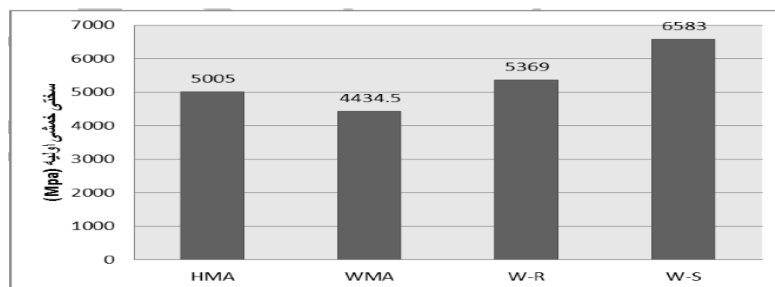
شکل ۱۲. نتایج آزمایش مقاومت کششی نمونه‌ها در دمای ۲۵ درجه سانتیگراد

#### ۴-۴- مقاومت در برابر ترکهای خستگی

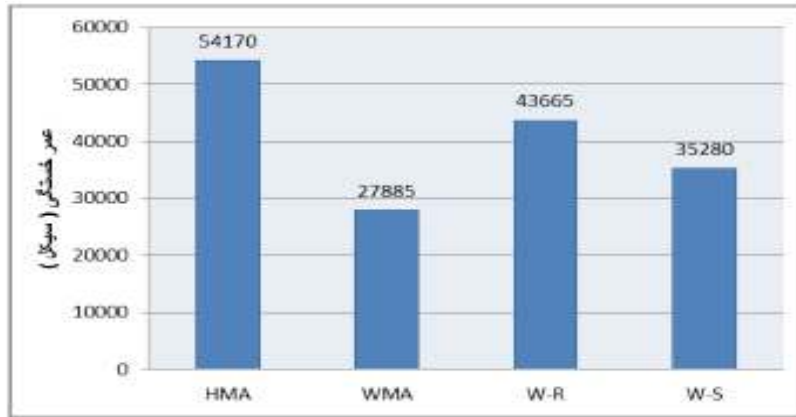
خستگی نمونه‌های بازیافتی را در شکل ۱۳ مشاهده می‌کنید. ملاحظه می‌شود که مخلوط‌های نیمه گرم بازیافتی با افزودنی سختی بیشتری نسبت به مخلوط بازیافتی گرم داشته‌اند.

در این میان سختی مخلوط رئوفالتی نزدیک نمونه بازیافتی گرم می‌باشد و مخلوط ساسوبیتی بیشترین سختی را از خود نشان داده است که دلیل آن همان ایجاد ساختار شبکه‌ای این افزودنی در دماهای زیر ۸۰-۹۰ می‌باشد. کمترین سختی مربوط به نمونه نیمه گرم بدون افزودنی می‌باشد.

نوع و میزان قیر، درصد فضای خالی مخلوط از عوامل اصلی موثر در عمر خستگی مخلوط‌های آسفالتی می‌باشند. افزایش درصد قیر و کاهش فضای خالی موجب افزایش عمر خستگی مخلوط‌های آسفالتی می‌شود. مقدار فضای خالی کمتر، ساختار همگنتری را در مخلوط ایجاد می‌کند که منتج به تمرکز تنش کمتر در فصل مشترک بحرانی جامد هوا می‌شود. ضمن اینکه افزایش درصد قیر و کاهش فضای خالی غشای ضخیم‌تری از قیر بین مصالح سنگی ایجاد می‌شود که می‌تواند تنش‌های کششی در سرتاسر جامد را انتقال دهد. نتایج مربوط به سختی خمشی اولیه و عمر



شکل ۱۳. نتایج سختی خمشی نمونه‌های بازیافتی تیرچه آسفالتی



شکل ۱۴. نتایج عمر خستگی نمونه های بازیافتی تیرچه آسفالتی

چسبیدن سنگدانه‌ها به هم و انتقال بار می‌شود کاهش می‌یابد و این امر موجب افزایش تنش در آن و کاهش عمر خستگی می‌شود. در نمونه‌های WR, WS با وجود دمای ساخت پایتتر افزودنی کمک می‌کند درصد بیشتری قیر در اختلاط شرکت کند و اختلاط دو قیر بهتر انجام شود. ضمن اینکه واکنش‌های ارگانیک استفاده شده دارای ساختار مولکولی بلند زنجیره می‌باشند که به پایداری بیشتر قیر کمک می‌کند. نتایج نشان می‌دهد افزودنی‌ها تاثیر مثبت بر عملکرد خستگی داشته اما اثر کامل کاهش دما را جبران نکرده است. از میان افزودنی‌ها مخلوط رئوفالتی نزدیکترین عملکرد را به مخلوط گرم داشته است و شاید بتوان با مقدار افزایش دما و تغییر درصد افزودنی، مخلوطی برابر با مخلوط گرم تولید کرد. محققان معتقدند مقدار انرژی که مخلوط آسفالتی با تغییر شکل‌های ویسکوالاستیک و ویسکوپلاستیک، قبل از رسیدن به مرز ترک خوردگی جذب می‌کند، می‌تواند معیار مناسبی برای عمر خستگی مخلوط‌های آسفالتی باشد. در نمودار زیر نتایج مربوط به انرژی تلف شده تجمعی نمونه‌ها را مشاهده می‌کنید. این نتایج با نتایج حاصله از عمر خستگی نمونه‌ها مطابقت دارد و مخلوط‌ها با عمر خستگی بیش تر انرژی تلف شده تجمعی بیشتری نیز داشته‌اند.

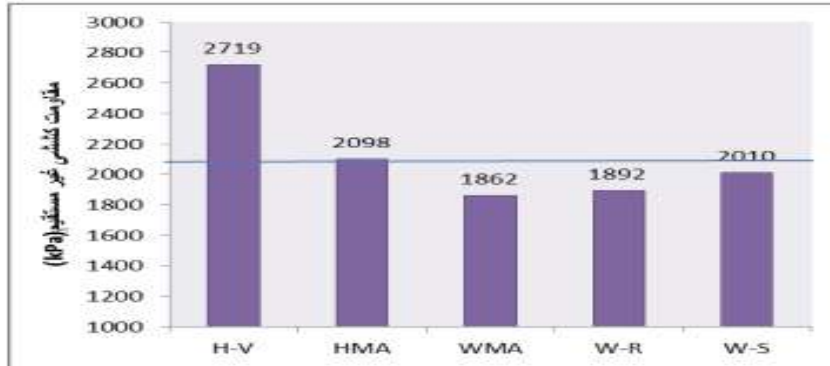
مطالعات گذشته نشان داده است در شرایط یکسان مخلوط‌های با انعطاف بیشتر و سختی کمتر، معمولاً عملکرد خستگی بهتر و عمر خستگی بیشتری دارند. این امر درباره سه نمونه گرم، نمونه ساسوبیتی و رئوفالتی صادق بوده و سختی بیشتر منجر به عمر خستگی کمتر شده است. اما درباره نمونه نیمه گرم بدون افزودنی اینگونه نیست. درواقع این مخلوط ضمن اینکه کمترین مقدار سختی خمشی را داشته، کمترین مقدار عمر خستگی را دارا می‌باشد. دلیل سختی کم در این مخلوط به دو سورت می‌تواند بیان شود. یک دلیل اینکه دمای پایین‌تر ساخت موجب می‌شود تا مقدار کمتری قیر از قیر RAP در اختلاط شرکت کند و نمونه مانند مخلوطی با قیر نرم‌تر عمل می‌کند. دلیل دیگر اینکه همین دمای کمتر موجب کمر پیرشدن قیر می‌شود و سختی را کاهش می‌دهد. در ارتباط با عمر خستگی کمتر مخلوط نیمه گرم بدون افزودنی باید گفت دلیل آن قیر کمتری است که در انتقال بار شرکت می‌کند. افزایش مقدار قیر موجب می‌گردد انتقال بار در سطح مقطع بیشتری انجام شود و موجب کاهش تنش می‌شود. دما یکی از عواملی است که اختلاط قیر RAP در مخلوط تاثیرگذار است. هنگامی که دما پایین می‌آید، مقدار قیر موثر کاهش پیدا کرده و قیری که موجب



شکل ۱۵. نمودار مربوط به انرژی تلف شده تجمعی در دمای ۲۵ درجه سانتیگراد

#### ۴-۵- مقاومت در برابر ترک‌های دمای پایین

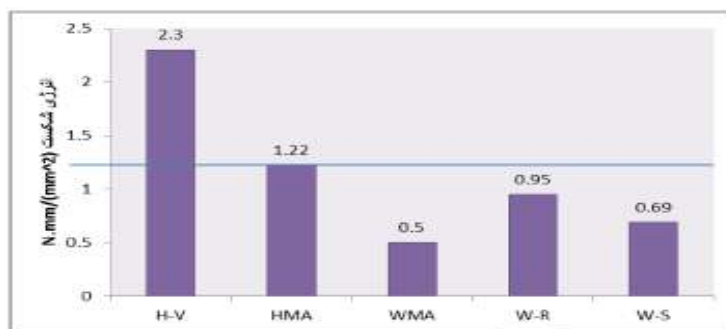
برای ارزیابی مقاومت در برابر ترک‌های دمای پایین از آزمایش مقاومت کششی غیرمستقیم در دمای ۱۰- درجه سانتیگراد استفاده شد. علاوه بر حداکثر بار وارده تا شکست نمونه، انرژی شکست نمونه‌ها نیز مورد توجه قرار گرفت. نتایج در اشکال زیر آورده شده است.



شکل ۱۶. نتایج مربوط به مقاومت کششی غیر مستقیم نمونه‌ها در دمای ۱۰- درجه سانتیگراد

دمای پایین لحاظ گردد. نتایج انرژی شکست نمونه‌ها در شکل زیر آورده شده است. نتایج نشان می‌دهد، نسبت اختلاف انرژی شکست نمونه‌ها نسبت به مقاومت آن‌ها بسیار مشهودتر می‌باشد و انرژی شکست مخلوط‌های شاهد گرم تقریباً دو برابر انرژی شکست مخلوط باز یافتی گرم می‌باشد. همچنین می‌توان دریافت برخلاف مقاومت نمونه‌ها که تاثیر افزودنی در آن کم بوده، افزودنی در افزایش انرژی شکست تاثیر بیشتری از خود نشان می‌دهد. ضمن اینکه در نتایج مقاومت مشاهده گردید که در میان مخلوط‌های باز یافتی، مخلوط ساسوبیتی نزدیکترین مقدار مقاومت را به مخلوط باز یافتی گرم داشته است. نتایج انرژی شکست نمونه‌ها نشان می‌دهد مخلوط رئوفالته انرژی شکست بیشتری نسبت به مخلوط ساسوبیتی داشته و نزدیکترین مخلوط به مخلوط باز یافتی گرم می‌باشد که به دلیل انعطاف و تغییر مکان بیشتر در این نمونه بوده است.

در مخلوط‌های حاوی RAP به علت پیر شدگی و سفتی قیر RAP ترک‌های دمای پایین بحرانی و یکی از معیارهای مهم به شمار می‌رود. نتایج مربوط مقاومت کششی غیر مستقیم در دمای ۱۰- درجه سانتیگراد نشان می‌دهد، مقاومت کششی همه نمونه‌های باز یافتی کمتر از نمونه شاهد می‌باشد و در بین نمونه‌های باز یافتی بیشترین مقاومت مربوط به مخلوط باز یافتی گرم می‌باشد و در بین دیگر مخلوط‌های باز یافتی مخلوط نیمه گرم ساسوبیتی نزدیکترین مقاومت را به مخلوط گرم داشته است. افزودنی رئوفالت تاثیر زیادی در افزایش مقاومت نداشته است و تاثیر آن به دلیل اختلاط و تراکم بهتر و فضای خالی کمتر بوده است. هرچه ماده‌ای مقاومت بیشتری داشته باشد، تنش بیشتری را می‌تواند تحمل کند. از طرفی هرچه ماده‌ای انعطاف‌پذیری بیشتری داشته باشد، در برابر انقباض و کرنش‌های حرارتی تنش کمتری به آن وارد می‌شود. بهتر است هر دو مورد مقاومت و انعطاف‌پذیری در ترک‌های



شکل ۱۷. نتایج مربوط به مقاومت کششی غیر مستقیم نمونه‌ها در دمای ۱۰- درجه سانتیگراد

## ۵- نتیجه گیری

در این تحقیق جهت ارزیابی عملکرد مخلوط‌های خرده آسفالتی حاوی افزودنی نیمه گرم آزمایش‌های مختلفی از قبیل: مقاومت مارشال، کشش غیرمستقیم، مدول برجهنگی، خستگی با تیر خمشی چهار نقطه ای انجام پذیرفت که نتایج به شرح زیر می‌باشد:

به کارگیری ساسوبیت و رئوفالت در کاهش فضای خالی مخلوط بازیافتی نیمه گرم تاثیرگذار بوده است، هرچند که کمترین فضای خالی مربوط به مخلوط گرم می‌باشد.

نتایج آزمایش استقامت مارشال کاملاً با درصد فضای خالی نسبت عکس دارد و با کاهش دما از ۱۵۰ به ۱۳۰ درجه سانتیگراد، مقاومت نمونه‌ها به شدت کاهش یافته است. اما افزودنی ساسوبیت و رئوفالت سبب افزایش مقاومت نمونه‌های نیمه گرم شده‌اند. ضمن اینکه ساسوبیت نسبت به رئوفالت تاثیر بیشتری در افزایش مقاومت داشته است.

کلیه مخلوط‌های بازیافتی مدول برجهنگی بیشتری نسبت به مخلوط گرم شاهد داشته‌اند و در این میان مخلوط ساسوبیتی و رئوفالتی بیشترین مدول را داشته‌اند.

مقاومت کششی غیرمستقیم مخلوط‌های بازیافتی مقدار کمتری از مقاومت مخلوط شاهد بوده است. این امر نشان می‌دهد هنگامی که از مصالح RAP استفاده می‌شود، احتمال وقوع ترک بیشتر است.

بیشترین مقاومت کششی غیرمستقیم مخلوط‌های بازیافتی در دمای ۲۵ درجه مربوط به مخلوط گرم می‌باشد. هنگامی که دمای ساخت نمونه‌ها کاهش یافته، مقاومت کششی نیز کاهش می‌یابد. اما افزودنی‌های نیمه گرم در افزایش مقاومت تاثیر داشته‌اند. ضمن اینکه مقاومت مخلوط حاوی رئوفالت به مقدار کمی بیشتر از مخلوط ساسوبیتی می‌باشد.

کاهش دمای ساخت موجب کاهش سختی خمشی مخلوط‌های بازیافتی شده است. اما هنگامی که کاهش دما با افزایش افزودنی انجام می‌شود، میزان سختی از مخلوط گرم نیز بیشتر است.

عمر خستگی نمونه‌ها با سختی خمشی آنها نسبت عکس داشته است. بجز مخلوط نیمه گرم بدون افزودنی که ضمن داشتن کمترین سختی کمترین عمرخستگی را نیز داشته است.

با کاهش دمای ساخت در مخلوط‌های بازیافتی از ۱۵۰ به ۱۳۰، عمر خستگی به شدت کاهش یافته و تقریباً به نصف مقدار خود رسیده است. اما افزودنی ساسوبیت و رئوفالت تا حدود زیادی این کاهش را جبران کرده‌اند. ضمن اینکه نمونه رئوفالتی عملکرد خستگی بهتری نسبت به نمونه ساسوبیتی داشته است.

نتایج حاصل از انرژی تلف شده تجمعی نمونه‌ها در آزمایش تیر خستگی چهارنقطه‌ای کاملاً با عمر خستگی آن‌ها مطابقت دارد.

نتایج حاصل از آزمایش عمر خستگی نشان می‌دهد افزودنی‌ها سختی مخلوط را افزایش داده‌اند که این افزایش سختی در مخلوط ساسوبیتی بیشتر از رئوفالتی بوده است و مخلوط رئوفالتی نتایج نزدیکتری به مخلوط گرم داشته است. افزایش سختی توسط افزودنی‌ها به دو شکل ممکن است رخ دهد:

به خاطر شاختر شبکه ای که افزودنی‌ها در دمای محیط ایجاد می‌کنند.

بهبود اختلاط قیر جدید با قیر RAP، به طوریکه مقدار بیشتری از قیر سخت شده RAP در اختلاط شرکت می‌کند.

مقاومت کششی غیر مستقیم نمونه‌های بازیافتی در دمای ۱۰- درجه سانتیگراد نسبت به نمونه تازه کم‌تر بوده است و این اختلاف نسبت به مقاومت نمونه‌ها در دمای ۲۵ درجه بیشتر است. مخلوط بازیافتی گرم عملکرد بهتری نسبت به بقیه نمونه‌های بازیافتی داشته است. ضمن اینکه افزودنی‌ها بی‌تاثیر نیستند، بخصوص ساسوبیت که بیشترین تأثیر را داشته است.

مقاومت کششی غیرمستقیم نمونه‌های بازیافتی در دمای ۱۰- دارای اختلاف زیادی نمی‌باشند. اما در نتایج حاصل از انرژی شکست تفاوت‌ها مشهودتر می‌باشد. زیرا در انرژی شکست هم مقاومت و هم تغییر مکان تاثیر دارد. انرژی شکست نمونه بازیافتی گرم تقریباً نصف مخلوط شاهد بوده است و انرژی شکست مخلوط رئوفالتی نزدیکترین نتیجه را مخلوط گرم داشته است.

## ۶- پی‌نوشت‌ها

- 1- Reclaimed Asphalt Mixture
- 2- Warm Mix Asphalt (WMA)
- 3- Hot mix Asphalt (HMA)

concrete through four point bending fatigue test”, *Constr Build Mater*, 29, pp.403–409.

-Mallick, R; Kandhal, P & Bradbury, R. (2008), “ Using Warm Mix Asphalt Technology to Incorporate High Percentage of Reclaimed Asphalt Pavement (RAP) Material in Asphalt Mixtures,” *Journal of the Transportation Research Board* , Vol. 2051, pp. 71-79.

-Mallick, R. B., Bergendahl, J., & Pakula, M., (2009), “A Laboratory Study on CO2 Emission Reductions Through the Use of Warm Mix Asphalt”, *Transportation Research Board Annual Meeting* pp.1091-1095.

-Mohammad, L. N., Negulescu, I. I., Wu, Z., Daranga, C., Daly, W. H., & Abadie, C., (2003), “Investigation of the use of recycled polymer modified asphalt binder in asphalt concrete pavements” *Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists*, 72, pp.551–594.

-Roque et al., (2002), “Implementation of SHRP indirect tension tester to mitigate cracking in asphalt pavements and overlays”, Tallahassee, FL: Florida Department of Transportation, Department of Transportation.

-Zhao, S., Huang, B., Shu, X., Jia, X., & Woods, M., (2012), “Laboratory performance evaluation of warm-mix asphalt containing high percentages of reclaimed asphalt pavement”, *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2294, pp.98–105.

-Zhou, F., Li, H., Hu, S., Lee, R., Scullion, T., Claros, G., Button, J., (2013), “Evaluation of use of recycled asphalt shingles in HMA”, *Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists*, 82, pp.367–402.

## ۷-مراجع

-Arabani M, Mirabdolazimi SM., (2011), “Experimental investigation of the fatigue behaviour of asphalt concrete mixtures containing waste iron powder”, *Mater Sci Eng, A* 2011;528:3866–70.

-Feipeng Xiao and Serji N Amirkhanian, (2007), “Laboratory Investigation of Moisture Damage in Rubberized Asphalt Mixtures Containing Reclaimed Asphalt Pavement,” *Int.J. Pavement Engineering* ,Vol.10, Issue 5.

-Hansen, K. R., & Copeland, A., (2015), “Information series 138: 5th annual asphalt pavement industry survey on recycled materials and warm-mix asphalt usage: 2014. Lanham, MD: National Asphalt Pavement Association.

-He Gui-Ping , Wong Wing-Gun, (2008), “Effects of moisture on strength and permanent deformation of foamed asphalt mix incorporating RAP materials,” *Construction and Building Materials*, Vol. 22, Issue 1, pp. 30–40.

-Hill, B., Behnia, B., Buttlar, W. G., & Reis, H., (2013), “Evaluation of warm mix asphalt mixtures containing reclaimed asphalt pavement through mechanical performance tests and an acoustic emission approach, *Journal of Materials in Civil Engineering*, 25(12), pp.1887–1897.

-Huang, B., Shu, X., & Vukosavljevic, D., (2011), “Laboratory investigation of cracking resistance of hot-mix asphalt field mixtures containing screened reclaimed asphalt pavement”, *Journal of Materials in Civil Engineering*, 23(11), pp.1535–1543.

-Liu Quantao et al., (2012), “Evaluation of the induction healing effect of porous asphalt

# **Experimental evaluation of the effect of Sasobit and Rheofalt Warm Mix Asphalt (WMA) additives on fatigue Performance of Reclaimed Asphalt pavement (RAP) mixtures**

*Ali Paydar, Department of Civil Engineering, Malard Branch, Islamic Azad University, Malard, Tehran, Iran.*

*Alireza Ameli, Department of Civil Engineering, Malard Branch, Islamic Azad University, Malard, Tehran, Iran.*

*Farzin Poorheydari Mamaghani, M.Sc., Grad., Department of Civil Engineering, Malard Branch, Islamic Azad University, Malard, Tehran, Iran.*

*Email: Amelii@gmail.com*

Received: September 2020-Accepted: February 2021

## **ABSTRACT**

In this study, the effect of the use of two WMA additive sasobit and rheofalt additives on the fatigue properties of the asphalt mixes was evaluated. For this purpose, laboratory samples containing 100 % RAP and a hot mixture were constructed using RAP material, which is separated from the bitumen. The recycled mixtures include a hot recycling sample and three warm (1 non - additive sample, 1 sample containing sasobit additive, 1 containing rheofalt additive). In this research, different experiments such as indirect tensile strength, resilient modulus and fatigue are investigated. Fatigue test was performed on four - point bending test with constant strain level at three levels 600, 800 and 1000 micro - strain with sinusoidal loading. The fatigue life of specimens was evaluated based on a 50 % reduction in the initial hardness modulus. The results showed that sasobit and rheofalt additives had a positive effect on the compression and functional properties of the blends. In the performance of fatigue and low - temperature cracks, the hot mixture was better in spite of the positive effects of additives.

**Keywords:** Fatigue, Warm Mix Asphalt, Recycled Material, Sasobit, Rheofalt