

## ارزیابی آزمایشگاهی تأثیر سرباره فولاد بر خصوصیات خستگی مخلوط‌های

### آسفالتی گرم

#### مقاله پژوهشی

سید روح اله معافی مدنی\*، گروه مهندسی عمران، واحد ملارد، دانشگاه آزاد اسلامی، ملارد، تهران، ایران  
امین چوبدار، دانش آموخته کارشناسی ارشد، گروه مهندسی عمران، واحد ملارد، دانشگاه آزاد اسلامی، ملارد، تهران، ایران  
علیرضا عاملی، گروه مهندسی عمران، واحد ملارد، دانشگاه آزاد اسلامی، ملارد، تهران، ایران

\*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: R.MoafiMadani@gmail.com

دریافت: ۹۸/۰۴/۱۷ - پذیرش: ۹۸/۱۱/۱۲

صفحه ۲۶-۱۵

#### چکیده

ترک‌های خستگی یکی از رایج‌ترین خرابی‌ها در روسازی‌های آسفالتی هستند. از این رو عملکرد خستگی مخلوط‌های آسفالتی از مهم‌ترین پارامترهای طرح اختلاط و طرح سازه‌های روسازی‌های آسفالتی به شمار می‌آید. که توجه نکردن به آن منجر به وجود ترک، شیارشدگی و شکست رویه آسفالتی می‌شود. در این تحقیق از آزمایش تیر خستگی برای پیش‌بینی رفتار خستگی مخلوط آسفالتی حاوی سرباره فولادی یا استفاده از آزمایش تیر خستگی با بارگذاری ۴ نقطه‌ای در حالت کرنش ثابت در دو سطح کرنش ۶۰۰ و ۸۰۰ میکرو استرین با موج نیمه سینوسی و فرکانس ۱۰ هرتز، انجام گردید. در این پروژه سرباره جایگزین سنگدانه‌های درشت دانه، ریزدانه و تمامی سنگدانه‌ها شد. در مقایسه‌ای که انجام شد، مشاهده گردید که مخلوط‌های سرباره‌ای عموماً عمر خستگی بیشتری نسبت به مخلوط‌های شاهد هستند و مخلوط حاوی ریزدانه سرباره‌ای دارای بیشترین عمر خستگی می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: سرباره فولاد، خستگی، آزمایش خمشی ۴ نقطه‌ای، مدول برجهنگی، سختی، انرژی تلف شده

#### ۱-مقدمه

بار وسایل نقلیه به وجود می‌آیند (amara et al, 2001; khodadadi et al, 1993). این ترک‌ها به سه دسته تقسیم می‌شوند: ترک‌های طولی، ترک‌های عرضی، ترک‌های پوست سوسماری گسترش این ترک‌ها در سه مرحله انجام می‌شوند: مرحله اول، مرحله آغاز ترک است و ترک‌های ریز در اثر تمرکز تنش در رویه ایجاد می‌شوند. در مرحله دوم، ترک‌های ریزی که در مرحله اول ایجاد شده‌اند شروع به گسترش می‌کنند و ترک‌های بزرگتر تشکیل شوند. مرحله سوم مرحله شکست است (Brown, 1993) تحقیقات مختلف نشان داده‌اند که استفاده از سرباره‌های فولادی می‌تواند خصوصیات عملکردی مخلوط‌های آسفالتی را تا حد زیادی بهبود بخشد و بر کاهش ترک و نشست‌های موضعی و شیار شدگی کمک زیادی بنماید (Shen, 2009; Ahmadzade, 2009). در عملیات تولید فلزات

خرابی در روسازی‌های انعطاف پذیر در اثر دو عامل ترک خوردگی یا شیار افتادگی روی می‌دهد. عامل شیار افتادگی عموماً در اثر عبور بارهای بیش از توان روسازی است، اما ترک‌ها معمولاً در اثر عبور زیاد وسایل نقلیه با بارهای عادی و انقباض و انبساط روسازی در اثر تغییرات دمایی حاصل می‌شوند. از این میان دو مکانیزم، ترک‌های مربوط به پدیده خستگی به تعداد زیادی در روسازی‌های آسفالتی دیده می‌شود (chang et al, 1999). خستگی عبارتست از پدیده شکست بر اثر تکرار بار، تغییر و تناوب دینامیکی بار که ممکن است حتی کمتر از مقاومت نهایی آسفالت باشد. مقاومت در برابر خستگی یک مخلوط آسفالتی، توانمندی مخلوط در مقابل بارهای خمشی تکراری بدون شکست است. ترک‌های ناشی از خستگی در روسازی‌ها عموماً در اثر تغییرات شرایط محیطی خصوصاً تغییرات دمایی و تکرار

## ۲-روش تحقیق

در پروژه حاضر از چهار نوع دانه بندی به شرح زیر استفاده شد:

نمونه شماره (۱): این گروه شامل مصالح شاهد هستند در این نوع تمامی مصالح سنگدانه‌ای، از سنگدانه‌های آهکی تشکیل شده است.

نمونه شماره (۲): در این گروه مصالح سرباره‌ای جایگزین مصالح درشت دانه‌ی نمونه‌ها شده است.

نمونه شماره (۳): این گروه مصالح سرباره‌ای جایگزین مصالح ریزدانه شده است.

نمونه (۴): در این نمونه تنها از مصالح سرباره‌ای استفاده شده است.

برای رسیدن به نسبت قیر بهینه مخلوط‌های آسفالتی حاوی سرباره کنورتور، نمونه‌های آسفالتی در قالب مارشال مطابق ASTM D1559 در ۴ نوع دانه بندی، با درصد‌های مختلف سنگدانه‌ی سرباره کنورتور و سنگدانه آهکی از مصالح شکسته کوهی ساخته شد. پس از تعیین درصد قیر بهینه، نمونه‌های ژیراتوری جهت آزمایش مدول برجهنگی با دستگاه UTM<sup>3</sup> و نمونه‌های استاونه‌ای جهت انجام آزمایش کشش غیرمستقیم و نمونه‌های دالی شکل جهت تست عمر خستگی با دستگاه خمشی چهار نقطه ساخته شدند و مورد آزمایش قرار گرفتند.

## ۲-۱- مصالح سنگی و قیر

دانه‌بندی سنگدانه‌های بکار رفته در این تحقیق مطابق مندرجات جدول (۱) که براساس جدول (۲۰-۱) نشریه ۱۰۰ دانه بندی شماره ۴ روسازی ایران بوده، نشان داده شده است. مصالح سنگی آهکی از معدن اسب چران واقع در شهرستان رودهن تهیه شد و با انجام آزمایش‌های لازم روی مصالح سنگی مشخص شد که همه خصوصیات لازم در حد مجاز آیین‌نامه روسازی ایران را قرار دارد (جدول ۲). سرباره کنورتور حاضر از مجتمع فولاد مبارکه اصفهان که توسط شرکت ریوا تحقیق سپاهان، نماینده انحصاری فروش سرباره‌های این کارخانه می‌باشد، تهیه گردید و برای بررسی و تعیین خصوصیات این مصالح، آزمایشات سنگدانه بر روی آنها شکل گرفت که نتیجه آن در جدول (۲) آمده است. قیر مورد استفاده برای مخلوط از نوع ۶۰/۷۰ از پالایشگاه پاسارگاد تهران می‌باشد که بعضی از مشخصات این قیر مطابق با آزمایش‌های انجام شده به شرح جدول (۳) است.

محصولات فرعی به دست می‌آیند، که به این محصولات فرعی سرباره می‌گویند. در ساخت یک تن فولاد، یک تن ضایعات جامد تولید می‌شود. از این ضایعات جامد به علت کمبود مطالعات کافی، استانداردهای ساخت، روش‌های طراحی مناسب، و مشخصات عملکردی مناسب استفاده نمی‌شود. استفاده از این منابع دو مزیت عمده دارد که عبارتند از:

- کمک به پاکسازی و احیای زمین‌های محل انباشت این مواد  
- کمک به حفظ منابع طبیعی مصالح سنگدانه‌ای و در نتیجه حفاظت از محیط زیست

از این رو استفاده مجدد از سرباره‌ها از جایگاه خاصی برخوردار است. از سرباره‌ها به دلیل داشتن خصوصیات اصطکاکی مناسب، می‌توان در مخلوط‌های آسفالتی استفاده کرد. از طرفی به خاطر خاصیت بازی سرباره‌ها، مخلوط‌های آسفالتی حاوی سرباره‌ها، در مقابل عریان شدگی مقاوم هستند. سرباره فولاد در حقیقت نوعی سنگدانه مصنوعی است که از محصولات فرعی کارخانجات فولادسازی به حساب می‌آیند. از فرآیند ذوب فولاد بدست می‌آید.

سرباره‌های ذوب شده در کوره به درون یک محوطه باز ریخته می‌شوند تا به حالت جامد تبدیل شوند (Liz et al, 2004) ترکیبات سرباره شامل اکسیدکلسیم، سیلیکات آهن، آلومینیوم و منیزیم است. بعد از جامد شدن سرباره‌ها، اندازه این قطعات به حدود ۱ متر می‌رسد.

این سنگ‌های بزرگ را توسط گلوله‌های فولادی که از ارتفاع ۴٫۵ متری توسط جرثقیل‌های مغناطیسی رها می‌شوند، خرد کرده و روی سرنده‌های بزرگی ریخته و آنرا می‌لرزاند. دانه‌های ریزتر عبور کرده و مانده‌های روی الک را دوباره به همین روش خرد کرده تا دانه بندی موردنظر تامین شود (Liz et al, 2004). اساساً دو نوع سرباره فولادی تهیه می‌شود: الف) سرباره حاصل از کوره قوس الکتریک (EAF<sup>1</sup>) و ب) سرباره حاصل از کوره اکسیژنی (کنورتور) (BOF<sup>2</sup>) که در این تحقیق از سرباره نوع اول استفاده شد. محدودیت استفاده از مخلوط‌های آسفالتی سرباره فولاد ناشی از هزینه حمل و نقل این مصالح، به محل پروژه است. این به سبب محدود بودن منابع تولید سرباره فولاد است. معمولاً محدوده استفاده از سنگدانه‌های سرباره‌ای در شعاع ۱۰۰ کیلومتری منبع تولید است (Riva, 2011)

سرعت دوران ۳۰ دور در دقیقه نمونه را به حالت ورز دادن متراکم می کند. استفاده از دستگاه ژیراتوری به جهت شباهت آن با عملکرد غلتک های متراکم کننده در شرایط واقعی است. پس از ساخت نمونه ها با دستگاه ژیراتوری آنها را جهت محاسبه میزان مدول برجهندگی در زیر دستگاه UTM قرار می دهیم که این دستگاه به منظور انجام آزمایشات دقیق جهت شناسایی و تعیین پارامترهای مکانیکی مهم مخلوط های آسفالتی تحت شرایط مشابه بارگذاری. محیطی با روسازی سطح جاده بکار می رود.

پس از ساخت نمونه های مارشال قیر بهینه ی نمونه ها توسط پارامترهای استحکام مارشال، روانی، درصد فضای خالی مخلوط آسفالتی، درصد فضای خالی مصالح سنگی و وزن مخصوص نمونه ها مطابق جدول (۴) به دست آمد. با استفاده از قیر بهینه نمونه های استوانه ای شکل توسط دستگاه متراکم کننده چرخشی (ژیراتوری) جهت آزمایش مدول برجهندگی ساخته شد. وزن نمونه های مخلوط آسفالتی به دلیل بالاتر بودن وزن مخصوص سرباره، از ۱۲۰۰ گرم بیشتر بود و دارای وزن های متغیر بودند. نمونه ها تحت فشار ۶۰۰ کیلو پاسکال قرار گرفتند و چکش بارگذاری با زاویه ۱،۲۵ و

جدول ۱. دانه بندی نمونه های مورد تست

الک	درصد رد شده	حدود مجاز
۳/۴ اینچ	۱۰۰	۱۰۰
۱/۲ اینچ	۹۵	۱۰۰-۹۰
۳/۸ اینچ	-	-
شماره ۴	۶۰	۷۴-۴۴
شماره ۸	۴۳	۵۸-۲۸
شماره ۵۰	۱۳	۲۳-۷
شماره ۲۰۰	۴	۱۰-۲

جدول ۲. مشخصات سنگدانه های آهکی و کنورتور

آزمایش	سنگدانه آهکی	سنگدانه سرباره کنورتور	استاندارد مورد استفاده
سایش لس آنجلس	۲۵/۲۸	۲۲/۵۴	ASTM- C131
درصد جذب آب درشت دانه	۰/۷	۱/۷	ASTM- C127
وزن مخصوص ظاهری درشت دانه	۲/۶۴	۳/۶۸	ASTM- C127
وزن مخصوص ظاهری ریز دانه (گرم/ سانتی متر مکعب)	۲/۷۲	۳/۸۵	ASTM- C128
وزن مخصوص واقعی درشت دانه (گرم/ سانتی متر مکعب)	۲/۵۹	۳/۴۷	ASTM- C127
وزن مخصوص واقعی ریز دانه (گرم/ سانتی متر مکعب)	۲/۳۲	۲/۹۳	ASTM- C128
درصد جذب آب ریز دانه	۶	۸/۱	ASTM- C128

جدول ۳. مشخصات قیر مصرفی

خصوصیات	قیر ۶۰/۷۰	روش آزمایش
وزن مخصوص در ۲۵ درجه سانتی‌گراد	۱/۰۳	ASTM D-70
درجه نفوذ در ۲۵ درجه سانتی‌گراد	۶۴	ASTM D-5
نقطه نرمی (درجه سانتی‌گراد)	۵۴	ASTM D-36
انگمی در ۲۵ درجه سانتی‌گراد	۱۰۲	ASTM D-113
نقطه اشتعال	۳۰۵	ASTM D-92
نقطه احتراق	۳۱۷	ASTM D-70

جدول ۴. درصد قیر بهینه

درصد قیر بهینه	نوع مخلوط
۴٫۹	مخلوط شماره (۱): نمونه شاهد
۵٫۴	مخلوط شماره (۲): حاوی درشت دانه سرباره‌ای
۵٫۵۵	مخلوط شماره (۳): حاوی ریز دانه سرباره‌ای
۵٫۷	مخلوط شماره (۴): حاوی سنگدانه‌های سرباره‌ای

ساخته شد. پس از سرد شدن از قالب خارج می‌شوند. نمونه‌ها در ۶ وجه برش می‌خورند بطوریکه نمونه‌ها پس از برش به ابعاد ۳۸۰ میلی متر طول و ۶۳ میلی متر عرض و ضخامت ۵۰ میلی‌متر تبدیل و آماده تست خمشی چهار نقطه خستگی می‌گردند. بعد از مدت زمان برای خنک شدن نمونه‌ها، نمونه‌ها از داخل قالب‌ها جدا گردیده‌اند. نمایی از نحوه ساخت و تراکم دال توسط این دستگاه در شکل‌های ۱ و ۲ نشان داده شده است. در این تحقیق، برای ارزیابی رفتار خستگی مخلوط‌های آسفالتی، آزمایش تحت کرنش ثابت انجام شده است. تمامی نمونه‌ها با ۴ درصد فضای خالی در درصد قیر بهینه ساخته شده است. برای جلوگیری از ایجاد درصد فضای زیاد در سطح نمونه، ۱۰ میلی‌متر از تمامی وجوه نمونه بریده شده است. سپس نمونه‌ها برای رسیدن به ابعاد مورد نیاز برای آزمایش خستگی با استفاده از برش آب خنک مطابق ابعاد استاندارد AASHTO-T321 ۶۳/۵X۵۰X۳۸۰X (۳۸۰ میلی‌متر) برش داده می‌شوند.

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 گردیده است. این دستگاه بر اساس استاندارد تراکم مالشی خطی دیپارتمان کلورادو 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. 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 شده است. سپس مخلوط به داخل قالب ریخته و تراکم بر روی نمونه‌ها با دستگاه مورد نظر انجام گرفته است. متوسط زمان تراکم برای نمونه‌ها حدود ۱۵ دقیقه می‌باشد. همچنین نمونه‌های دالی شکل به ابعاد ۷۲X۱۵۰X۴۲۰ میلی‌متر



شکل ۱. نمایی از نحوه ساخت و تراکم دال



شکل ۲. نمایی از نحوه برش دال

قسمت سوم: مشخصه این قسمت کاهش ناگهانی در مدول سختی نمونه است که در این بخش نمونه به مرحله شکست نزدیک می‌شود که در این مرحله ترک‌های بزرگ گسترش پیدا می‌کند.

در حالت تنش کنترل شده به علت کاهش میزان تنش، نمونه می‌تواند مدت زیادی در مرحله سوم بدون کاهش چشم گیر در میزان سختی نمونه باقی بماند به این علت معیار شکست را عموماً به صورت کاهش سختی تا درصدی از سختی اولیه (۵۰ درصد) تعریف کرده‌اند. استاندارد AASHTO این میزان را ۵۰ درصد تعیین کرده است. اما به علت اختلاف موجود در محاسبه سختی اولیه و گاهی پراکندگی در نتایج، بهترین معیار برای تعیین مرز شکست نمونه، توجه به نمودار کاهش مدول سختی در مقابل تکرار بار می باشد که براساس یک تعریف دیگر، پایان مرحله دوم و شروع مرحله سوم، مرز شکست نمونه تعیین می‌شود (Amiri hosseini, 2005).

### ۳-روش کار آزمایش

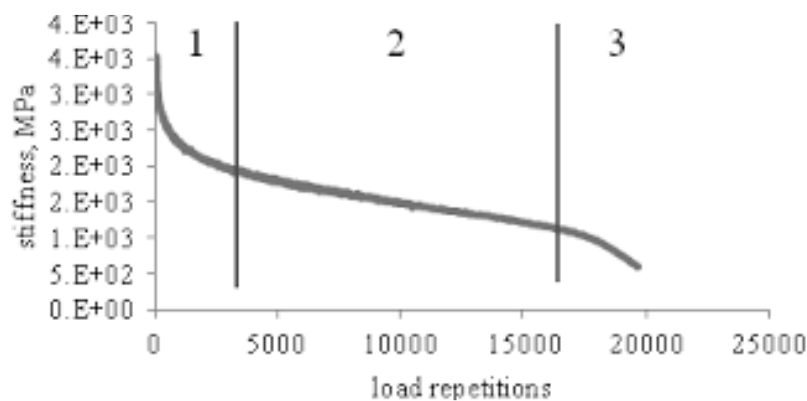
#### ۳-۱- آزمایش خستگی با تیر خمشی ۴ نقطه ای

آزمایش خمشی تیرچه در دو حالت تنش کنترل شده و کرنش کنترل شده قابل انجام است. در حالت تنش کنترل شده مقدار تنش تعیین شده تا مرحله شکست نمونه اعمال می شود ولی در حالت تنش کنترل شده سیستم بازگشتی تعبیه شده در دستگاه آزمایش خستگی تیر پس از هر تکرار بارگذاری، تنش را اصلاح می‌کند تا کرنش در حد مشخص باقی بماند. شکل (۳) یک نمونه از نمودار سختی در مقابل تکرار بار را که در آزمایش‌های خستگی با حالت کرنش ثابت به دست آمده را نشان می‌دهد.

نمودار را می توان به سه قسمت تقسیم کرد.

قسمت اول: مشخص این قسمت، کاهش سریع در مدول سختی نمونه است. این بخش در حدود ۱۰٪ عمر خستگی را شامل می‌شود.

قسمت دوم: مشخصه این قسمت کاهش خطی در مدول سختی نمونه است که این بخش در حدود ۹۰٪ عمر خستگی را شامل می‌شود و مرحله گسترش ترک‌های ریز است.



شکل ۳. نحوه کاهش سختی در آزمایش خستگی

نقطه‌ای (شکل ۴) استفاده شد. در این آزمایشات برای شبیه سازی بهتر رشد ترک، در مقایسه با وضعیت واقعی بارگذاری نیمه سینوسی با فرکانس ۱۰ هرتز و بدون استراحت در حالت کرنش کنترل شده استفاده گردید. تمامی آزمایش‌ها مطابق با استاندارد ASHTO TP-8-94 در ۲ سطح کرنش ۶۰۰ و ۸۰۰ میکرواسترین و در دمای  $20 \pm 0.8$  درجه سانتی‌گراد مورد آزمایش قرار گرفتند و آزمایش‌ها تا شروع مرحله سوم نمودار کاهش ضریب سختی در مقابل تکرار بار ادامه یافتند. برای آزمایش‌های انجام شده اتمام آزمایش به دلیل توقف دستگاه به صورت خودکار (به دلیل ایجاد ترک در نمونه‌ها) یا رسیدن به تعداد یک میلیون مرتبه بارگذاری بود که در تمامی آزمایش‌ها قبل از رسیدن به این تعداد بارگذاری، دستگاه متوقف شد.

در حالت کرنش کنترل شده تغییر شکل اندازه‌گیری شده در هر تکرار بار تصحیح می‌شود تا در تکرار بعدی محقق گردد و در حالت تنش کنترل شده نیروی وارده ثابت فرض می‌شود و تغییر شکل نیز ثبت می‌شود و اگر در نمونه خزش روی دهد سطح حداکثر و حداقل بار تصحیح می‌شود. تاثیر در حالت مستقیم نگه داشته شود. پارامترهای مختلفی از داده‌های بدست آمده محاسبه می‌شوند که عبارتند از: تعداد تکرار بار، حداکثر و حداقل بار وارده، حداکثر و حداقل تغییر شکل تیر، تنش و کرنش کششی و سختی خمشی. همچنین برای تست عمر خستگی و با توجه به تعداد تیرهای به دست آمده در عملیات برش دال‌های ساخته شده در آزمایشگاه علم و صنعت و توجه به حداقل نمونه‌های مورد آزمایش برای ارزیابی عمر خستگی و مقایسه آنها، برای هر حالت ۶ عدد تیر در دو سطح کرنش (جمعا ۲۴ تیر) مورد آزمایش قرار گرفتند. برای انجام آزمایش خستگی از دستگاه خمش چهار



شکل ۴. نمای از دستگاه Beam Fatigue

قطری بارگذاری می‌شود. آزمایش کشش غیر مستقیم برای تعیین مقاومت کششی مخلوط‌های آسفالتی و پیش‌بینی ظهور ترک‌ها در مخلوط آسفالتی استفاده می‌شود. همچنین می‌توان

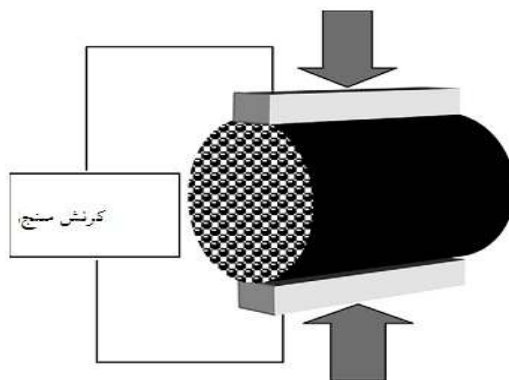
### ۳-۲- آزمایش کشش غیر مستقیم

در آزمایش مقاومت کششی غیر مستقیم، همانطور که در شکل ۵ مشاهده می‌شود، یک نمونه استوانه‌ای به صورت

که ITS: مقاومت کششی نمونه‌ها بر حسب Kpa، بار اعمالی در زمان شکست بر حسب kN، D قطر نمونه‌ها بر حسب میلی‌متر، t ارتفاع نمونه‌ها بر اساس میلی‌متر می‌باشد.

از این آزمایش برای ارزیابی عمر خستگی نیز استفاده کرد. آزمایش کششی غیر مستقیم بر اساس آیین نامه 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 شده است:

$$ITS = (2P_{max}) / (\pi Dt) \quad (1)$$



شکل ۵. شکل شماتیک دستگاه کشش غیر مستقیم [Xiaoming, et.al, 2008]

داده است که مخلوط‌های سخت‌تر در دماهای پایین‌تر بیشتر مستعد ترک‌خوردگی حرارتی می‌باشند. برای تعیین مدول برجهنگی 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 برجهنگی بر اساس معادله زیر محاسبه می‌گردد:

$$M_r = \frac{P(\mu+0.2734)}{\sigma \times t} \quad (3)$$

$M_r$  = مدول برجهنگی 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

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

$$FE = \frac{\int_0^{\delta_{max}} P(\delta) d\delta}{V} \quad (2)$$

که FE چگالی انرژی شکست (MPa)، P بار (N)، V حجم نمونه (۳ میلی‌متر)، تغییر شکل می‌باشد.

### ۳-۳-۳- مدول برجهنگی

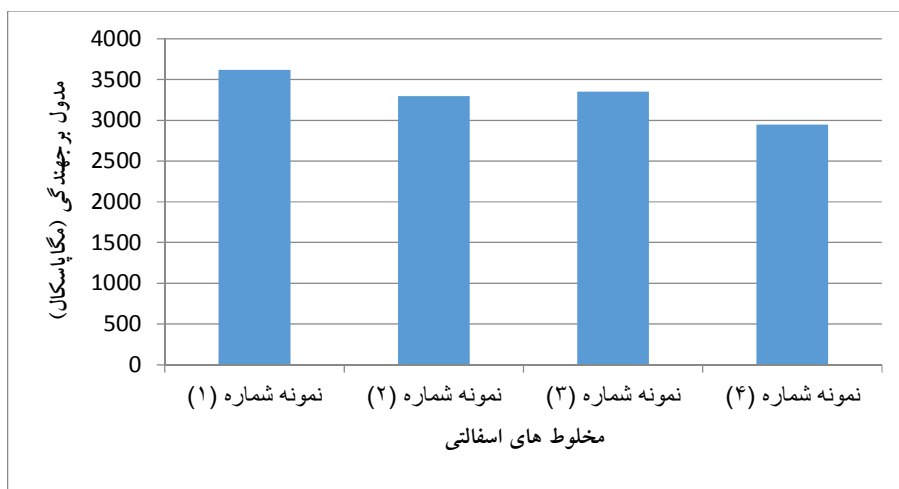
آزمایش مدول برجهنگی در دماهای پایین به نحوی مرتبط با ترک‌خوردگی حرارتی می‌باشد. تحقیقات متعددی نشان

## ۴-تحلیل نتایج آزمایشات

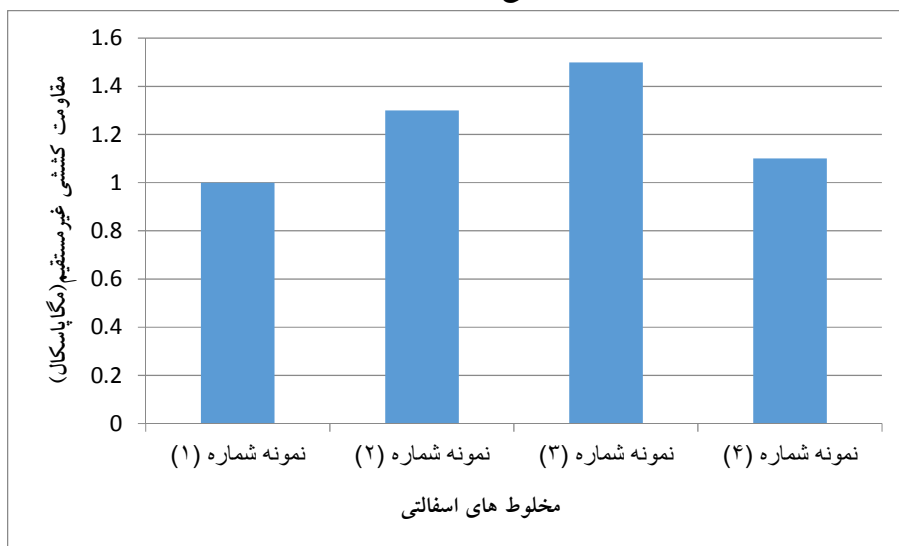
## ۴-۱-نتایج مدول برجهندگی

در گام اول پردازش نتایج حاصل، مدول برجهندگی نمونه‌های مختلف استخراج گردید که در شکل ۶ نشان داده شده است. همانطور که در شکل دیده می‌شود افزودن سرباره باعث کاهش مدول برجهندگی می‌شود که البته این کاهش چشمگیر نیست، طوری که مدول برجهندگی مخلوط شماره ۴ که حاوی ۱۰٪ سرباره است و دارای کمترین مقدار مدول برجهندگی است، در حدود ۱۸ درصد کمتر از مخلوط شاهد

است. همچنین شکل ۶ نشان می‌دهد که با جایگزینی مصالح آهکی و سرباره‌ای به جای مصالح ریزدانه و یا درشت دانه می‌توان به ترتیب مدول برجهندگی را به میزان حدود هشت درصد کاهش داد. در نهایت کمترین میزان مدول برجهندگی مربوط به نمونه‌های کاملاً حاوی سرباره است که نشان دهنده بالاتر بودن میزان انعطاف پذیری اینگونه نمونه‌ها نسبت به سایر نمونه‌ها است. دلیل این امر ممکن است به دلیل بالاتر بودن میزان قیر، نسبت به سایر نمونه‌ها، باشد.



شکل ۶. نتایج تست مدول برجهندگی



شکل ۷. نتایج مقاومت کششی غیرمستقیم نمونه‌ها

## ۴-۲- نتایج تست کشش غیرمستقیم

میانگین مقاومت کششی نمونه‌های خالص و حاوی افزودنی در شکل ۷ نشان داده شده است. لازم به ذکر است

که مقادیر حاصل از میانگین سه نمونه می‌باشد. با توجه به شکل‌های ۷ و ۸، اضافه نمودن سرباره سبب افزایش مقاومت کششی غیرمستقیم و چگالی انرژی شکست مخلوط‌ها



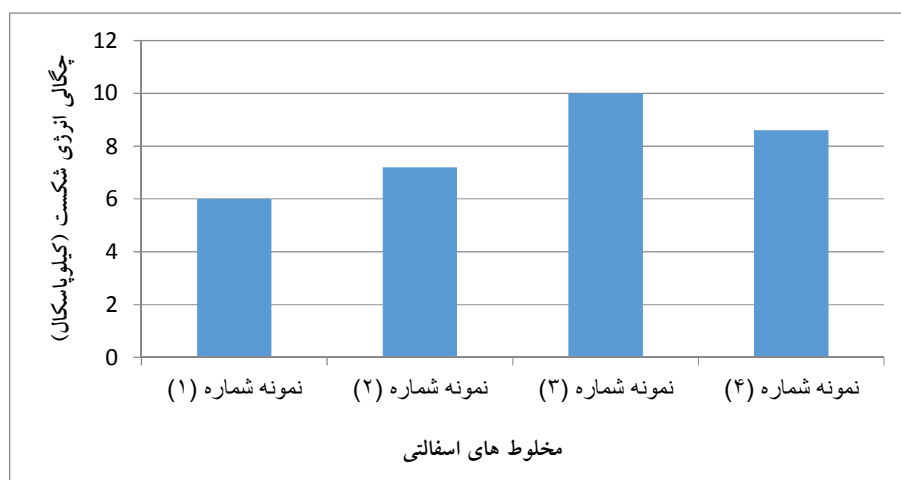
براساس نتایج آمده در شکل ۹ اینگونه استنباط می شود که با جایگزینی مصالح سرباره‌ای به جای مصالح سنگدانه‌ای می‌توان عمر خستگی را تا حدی افزایش داد بطوریکه محاسبات اولیه بر روی نتایج شکل ۹ نشان می‌دهند که اگر مبنای عمر خستگی کاهش ضریب سختی به اندازه‌ی ۵۰٪ سختی اولیه باشد، عمر خستگی نمونه‌هایی که دارای ریزدانه سرباره‌ای هستند حدود ۵۰٪ بیشتر از شاهد و نمونه‌های که شامل درشت دانه‌ی سرباره‌ای است به میزان ۱۹٪ و در نهایت نمونه‌های حاوی تماماً سرباره به میزان ۳۷٪ بیشتر از نمونه شاهد است. قابل بیان است که درصدهای فوق میانگین دو سطح کرنش می‌باشد.

یکی از دلایل این افزایش عمر خستگی بالاتر بودن درصد قیر نسبت به سایر نمونه‌ها است.

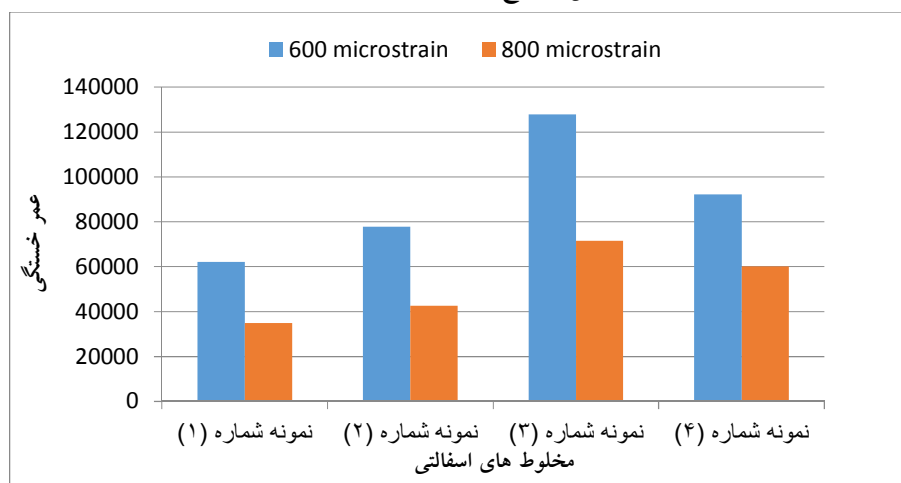
می‌گردد. از آنجاییکه انرژی شکست، مجموع انرژی الاستیک و انرژی کرنشی خزشی تلف شده می‌باشد، جایگزین نمودن سرباره با بخش ریزدانه مصالح آهکی منجر به افزایش انرژی الاستیک و انرژی کرنشی خزشی تلف شده می‌گردد. در حالی که اگر مصالح سرباره با بخش درشت دانه جایگزین گردد سبب افزایش کمتری در مقاومت کششی غیرمستقیم نمونه‌ها گردیده است. همچنین جایگزینی کل مصالح با مصالح سرباره‌ای سبب افزایش مقاومت کششی غیرمستقیم نمونه‌ها گردیده که نسبت به جایگزینی با بخش درشت دانه و ریزدانه به تنهایی تاثیر کمتری داشته است.

#### ۴-۳- نتایج تست تیر خمشی

هدف از این آزمایش به دست آوردن عمر خستگی، سختی اولیه و انرژی تلف شده نمونه‌های حاوی سرباره می‌باشد.



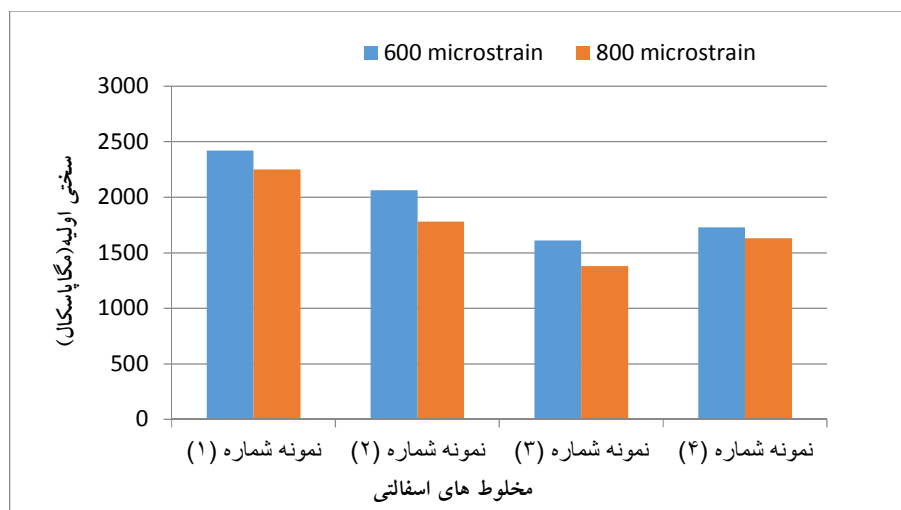
شکل ۸. نتایج انرژی شکست نمونه‌ها



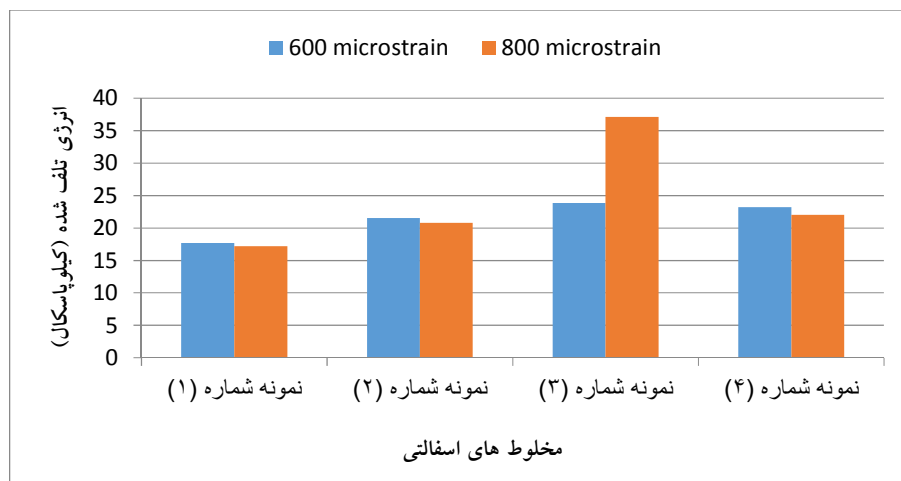
شکل ۹. عمر خستگی نمونه‌های آسفالتی

تنش- کرنش برای یک فرایند بارگذاری و باربرداری نشان‌دهنده برای یک سیکل بارگذاری است همانطور که مشاهده می‌شود که با افزایش عمر خستگی، میزان انرژی تلف شده نیز افزایش می‌یابد و این بدین معنی است که قابلیت میرا نمودن انرژی در نمونه‌های حاوی سرباره بیشتر از نمونه‌های شاهد است و یا به عبارت دیگر برای پایان عمر خستگی روسازی‌های نمونه‌های حاوی سرباره نیاز به کار بیشتری است. نمونه شماره (۳) که دارای عمر خستگی بیشتری است دارای بیشترین میزان انرژی تلف شده است و اختلاف آن در سطح کرنش ۸۰۰ میکرواسترین برابر با ۵۴٪ و در سطح کرنش ۶۰۰ میکرواسترین برابر با حدود ۲۳٪ می‌باشد. مقادیر بدست آمده برای انرژی تلف شده حاکی از این حقیقت است که هر چه عمر خستگی یک نمونه بالاتر می‌رود، انرژی تلف شده‌ی بیشتری حاصل می‌شود.

از دیگر خروجی‌های دستگاه تست خستگی، سختی اولیه می‌باشد که در شکل ۱۰ آمده است. همانطور که در این شکل مشاهده می‌شود نمونه‌های حاوی سرباره کنورتور دارای سختی اولیه کمتری نسبت به مخلوط شاهد هستند که این مطلب بیانگر انعطاف پذیرتر بودن و نرم‌تر بودن اینگونه مخلوط‌های آسفالتی نسبت به مخلوط‌های شاهد است. به طوری که مخلوط دارای ریزدانه سرباره‌ای دارای کمترین سختی اولیه در دو حالت سطح کرنش است یکی از دلایل پایین‌تر سختی اولیه نسبت به سایر نمونه‌ها، بالاتر بودن خلل فرج سنگدانه‌های سرباره‌ای و همچنین به دنبال آن بالاتر بودن درصد قیر نسبت به مخلوط شاهد است در نمونه‌های حاوی سرباره، نمونه شماره (۲) که دارای مصالح درشت دانه سرباره‌ای بوده دارای بیشترین سختی اولیه بوده است. در نهایت به بررسی انرژی تلف شده می‌پردازیم. منظور از انرژی تلف شده مساحت داخل حلقه هیستریزس



شکل ۱۰. سختی نمونه‌ها



شکل ۱۱. انرژی تلف شده نمونه‌های آسفالتی

-Brawn, S. F., (1999), "Geosynthetics in asphalt pavement", International Geo synthetics Society.

-Chang, T. T. Ho, N. H. Chang, H.Y and Yeh, H. S., (1999), "Laboratory and case study for Geogrid reinforced flexible pavement overlay", TRB A2K07 Committee 78" Annual meeting.

-Colorado Department of Transportation (CDOT), (2009), "Standard Method of Test for Linear Kneading Compaction of Bituminous Mixture", Colorado Procedure Laboratory 5116.

-H. R. Amiri Hosseini, (2005), "Effect of Geosynthetics on Fatigue Life Asphalt Pavement", Msc Thesis. Tarbiat Modarres University, Iran, Tehran.

-Khodary Moalla Hamed, F., (2010), "Evaluation of fatigue resistance for modified asphalt concrete mixtures based on dissipated energy concept (Doctoral dissertation, TU Darmstadt)".

-Khodadadi, A., (1993), "The effect of compaction method on the Fatigue life and elasto- plastic properties of asphalt pavement", Department of Civil and Environmental Engineering, Chaleston University, Ottawa, Canada.

-Liz Hunt, P. E. and Boyle, G. E., (2004), "Steel Slag in Hot Mix Asphalt Concrete", Oregon Department of Transportation, Final Report, www.ntl.bts.gov/sec/slag-final.

-Riva Tahghigh Sepahan, (2011), "Evaluation of Using Steel Slag in Asphalt Pavement", Report, Esfahan, Iran.

-Roque, R., Birgisson, B., Zhang, Z., Sangpetngam, B., & Grant, T., (2002), "Implementation of SHRP indirect tension tester to mitigate cracking in asphalt pavements and overlays, No. WPI 0510755, Final Report".

-Shen, D. C, M. Du, J, C., (2009), "Laboratory investigation of basic oxygen furnace slag for substitution of aggregate in pours asphalt mixture", Journal of Construction and Building Material 23 pp.453- 461.

-Xiaoming, Liu. Shaopeng, Wu. Qunshan, Ye. Jian, Qiu. Bo, Li., (2008), "Properties evaluation of asphalt-based composites with graphite and mine powders". Construction and Building Materials 22, pp.121-12.

## ۵- نتیجه گیری

نتایج آزمایش‌های تست مدول برجهندگی حاکی از آنست که با جایگزینی مصالح سرباره‌ای به جای سنگدانه آهکی، مخلوط آسفالتی مدول برجهندگی کاهش پیدا می‌کند یا به عبارت دیگر نمونه‌ها نرم‌تر و انعطاف‌پذیرتر می‌شوند.

- از مقادیر سختی خمشی به دست آمده از آزمایش خستگی مشخص گردید که نمونه‌های حاوی سرباره دارای سختی کمتری نسبت به مخلوط شاهد می‌شود و وجود ریزدانه سرباره‌ای این اختلاف را بیشتر می‌کند. به صورتی که در نمونه ۳ سختی به میزان ۴۴٪ (میانگین دو سطح کرنش) کاهش داده شد.

- نتایج به دست آمده برای انرژی تلف شده حاکی از این حقیقت است که هر چه عمر خستگی یک نمونه بالاتر می‌رود، انرژی تلف شده‌ی بیشتری حاصل می‌شود و در این میان نمونه شماره (۳) دارای بیشترین انرژی تلف شده می‌باشد.

- در ادامه آزمایش‌های مربوط به بررسی خستگی نمونه‌های روسازی‌های آسفالتی حاوی سرباره نشان می‌دهد که این نمونه‌ها به مراتب بهتر از نمونه‌های شاهد می‌توانند عمر خستگی را افزایش دهند و این افزایش خستگی در سطح کرنش‌های بالاتر بیشتر آشکار شد. مشاهدات عینی در حین آزمایش خستگی تیر نمونه‌های شماره ۲ و ۳ پس از پایان آزمایش، یکپارچگی و پایداری بهتری از نمونه‌ی ۳ دارد و ترکی در آنها مشاهده نمی‌شود. در صورتی که در برخی از نمونه‌های شماره ۴، پس از انجام تست، ترک‌هایی قابل مشاهده بود.

- نتایج آزمایش کشش غیرمستقیم نشان می‌دهد با جایگزینی سرباره با بخش ریزدانه مصالح سنگی، بیشترین مقاومت کششی حاصل می‌شود.

## ۶- مراجع

-Ahmadzade, P. Sengoz, B., (2009), "Evaluation of Steel Slag coarse aggregate in hot mix asphalt concrete", Journal of Hazardous Material, No. 165, pp. 300-305.

-Amara, L., Imad L., Al-Qadi, Salman Bhutta, and Gerado, W. Flintsch (2001), "Evaluation of geosynthetics when used as separation", Department of Civil and Environmental Engineering, Blacksburg, VA.

## **Laboratory Evaluation of the Effect of Steel Slag on Fatigue Performance of Hot Mix Asphalt Mixture**

*Seyed Rohalah Moafimadani, Department of Civil Engineering, Malard Branch, Islamic Azad University, Malard, Tehran, Iran.*

*Amin Choubdar, M.Sc., Grad., 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.*

*E-mail: R.MoafiMadani@gmail.com*

Received: June 2019-Accepted: February 2020

### **ABSTRACT**

Fatigue cracking is one of the most common damages in asphalt pavements. Hence, fatigue performance of asphalt mixtures is one of the most important parameters of the mixing design and structural design of pavements which ignoring it, leads to the existence of crack, rutting, and failure of the asphalt procedure. In this study, fatigue shot test was carried out to predict the fatigue behavior of mixtures containing steel slag or fatigue beam test using four - point loading in the constant strain mode at two levels of strain 600 and 800 micro strain, with a sinusoidal wave and frequency of 10 Hz. In this project, the addition of coarse and fine aggregates of coarse aggregate, fine - grained and all of aggregates was observed in the comparison that steel slag mixtures generally have more fatigue life than the observed mixtures, and the mixture containing fine steel slag aggregates have the highest fatigue life.

**Keywords:** Steel Slag, Fatigue, Four Point Beam Fatigue Test, Resilient Modulus, Stiffness, Dissipated Energy