

# بررسی و مقایسه اثر آمیخته SBR\PS و SBS بر خستگی مخلوط‌های آسفالتی

سید فرهاد چاوشیان نائینی (مسئول مکاتبات)، دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران

محمود عامری، استاد، دانشکده عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران

E-mail: farhadchavoshian.23@gmail.com

دریافت: ۱۳۹۶/۰۷/۱۵ پذیرش: ۱۳۹۶/۰۹/۲۲

## چکیده

افزایش کیفیت روسازی جاده‌ها و ارتقاء ایمنی و راحتی رانندگان، ارزیابی عملکرد آسفالت برای کنترل خرابی‌ها را امری اجتناب‌ناپذیر ساخته است. امروزه افزایش تردد مکرر بارهای سنگین منجر به خستگی زودرس روسازی‌های آسفالتی شده و در پی آن هزینه تعمیر و نگهداری جاده‌ها را افزایش می‌دهد. یکی از راهکارهای افزایش کیفیت و کاهش خرابی روسازی‌های آسفالتی، ارتقاء کیفی اجزاء تشکیل‌دهنده آن از جمله قیر و مصالح سنگی است. اگرچه قیر درصد کمی از مخلوط‌های آسفالتی را تشکیل می‌دهد، اما با اصلاح خواص همین ماده اندک می‌توان عملکرد مخلوط‌های آسفالتی را بهبود بخشید. استایرن بوتادین استایرن یکی از پرکاربردترین پلیمرهای بهبوددهنده خواص قیر است که به دلایلی همچون عدم پایداری مناسب در قیر و قیمت بالای آن، توجه محققین را به سمت استفاده از مواد جایگزین با همان خواص عملکردی سوق داده است. در این پژوهش به منظور یافتن جایگزین مناسب برای این پلیمر، آمیخته‌ای از ترکیب دو پلیمر ارزان‌قیمت استایرن بوتادین رابر و پلی استایرن به میزان ۳۵ تا ۶۵ درصد از هر کدام مورد استفاده قرار می‌گیرد. در این راستا آمیخته و استایرن بوتادین استایرن در درصدهای ۳ تا ۵ درصد به همراه ۲ درصد نانو رس جهت افزایش پایداری پلیمرها در قیر به نمونه‌های آسفالتی افزوده شده و عملکرد خستگی آن‌ها با آزمایش‌های تیر خمشی چهار نقطه و کشش غیرمستقیم مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج حاصل از پژوهش نشان داد که آمیخته‌ها علاوه بر ایجاد پایداری بهتر در قیر، موجب بهبود عملکرد خستگی آسفالت می‌شوند و این ترکیب‌ها می‌توانند جایگزین مناسبی برای پلیمر گران‌قیمت و ناپایدار SBS باشند، به طوری که حتی در برخی از نمونه‌های حاوی بیش از ۵۰ درصد SBR عملکرد بهتری نسبت به مخلوط‌های حاوی SBS مشاهده شد.

واژه‌های کلیدی: آمیخته پلیمری، پایداری ذخیره‌سازی، خستگی، کشش غیرمستقیم، مخلوط آسفالتی گرم.

## ۱. مقدمه

Thanoon, 2015]. استایرن بوتادین استایرن (SBS<sup>3</sup>) از معروف‌ترین پلیمرهای شناخته‌شده در صنعت روسازی است که مقدار ۵ درصد از آن می‌تواند عمر خستگی مخلوط‌های فاقد افزودنی را به بیشتر از پنج برابر افزایش دهد. این پلیمر سایر ویژگی‌های عملکردی همچون شیار شدگی و حساسیت رطوبتی مخلوط‌ها را نیز بهبود می‌بخشد [Kok and Colak, 2011]، لیکن از جمله معایب اصلی آن قیمت بالا به علت وارداتی بودن برای کشور ایران و عدم پایداری مناسب در قیر است [Galooyak et al. 2010]. طاهرخانی و شفیعی ماتک اثر پلیمر استایرن بوتادین استایرن و نانو رس بر قیرهای اصلاح‌شده با این دو ماده را مورد مقایسه قرار دادند. استایرن بوتادین استایرن با ایجاد سختی و خاصیت ارتجاعی بیشتر در قیر نسبت به نانو رس، موجب افزایش مقاومت شیار شدگی مخلوط‌های آسفالتی گشته است [Taherkhani and Shafiee Matak, 2016].

میزان ۱۰ درصد از خرده لاستیک می‌تواند عملکرد مشابهی در خستگی و شیار شدگی نمونه‌های حاوی ۵ درصد استایرن بوتادین استایرن داشته باشند. وجود استایرن بوتادین رابر به‌عنوان یکی از مؤثرترین اصلاح‌کننده‌های قیر، افزایش گرانروی، بهبود بازیابی کشسانی و خواص چسبندگی و سازگاری بهتر با قیر را به همراه دارد و همچنین موجب انعطاف‌پذیری در دمای پایین می‌شود [Khadivar and Kavussi, 2013; Zhang and Hu, 2013]. آزمایش‌های انجام‌شده بر روی خصوصیات قیرهای اصلاح‌شده با این ماده الاستیک نشان می‌دهد که افزایش این پلیمر باعث کاهش درجه نفوذ و افزایش نقطه نرمی و شکل‌پذیری قیر می‌شود [Mortazavi et al. 2010]. صالح فرد و همکاران با استفاده از استایرن بوتادین رابر دریافتند که میزان ۳ و ۷ درصد از این پلیمر می‌تواند عمر خستگی را ۴ و ۲/۵ برابر نمونه‌های فاقد افزودنی نماید. علاوه بر آن، این پلیمر توانست مقاومت شیار شدگی را نیز بهبود بخشد، لیکن یکی از بزرگ‌ترین مشکلات استفاده از این پلیمر به‌تنهایی، بحث پایداری در قیر است. پلی استایرن (PS<sup>4</sup>) نوعی پلاستیک گرمانرم<sup>۵</sup> است خاصیت انحلال‌پذیری زیادی در قیر دارد و تحقیقات اندکی بر روی آن انجام گرفته است [Salehfarid, Abdi and Amini, 2016].

خستگی نوعی خرابی سازه‌ای است که به‌صورت ترک‌های چندضلعی بر روی سطح روسازی نمایان می‌گردد. افزایش روزافزون ابعاد وسایل نقلیه و بارهای سنگین با محورهای ترکیبی مختلف، عمده دلایل خستگی زودرس روسازی‌های آسفالتی هستند. تکرار کرنش‌های کششی ناشی از بارهای سنگین و وقوع ترک‌های خستگی موجب شده تا محققین نسبت به ارتقاء خواص عملکردی آسفالت اقدام نمایند. معمولاً برای بررسی عملکرد بتن آسفالتی در برابر پدیده خستگی از آزمایش‌های خستگی و یا مدل‌های پیش‌بینی عمر خستگی استفاده می‌شود. بهادری به‌منظور سهولت در تعیین عمر خستگی، از نتایج آزمون کشش غیرمستقیم مبنی بر انرژی شکست توانست رابطه‌ای برای پیش‌بینی عمر خستگی ارائه نماید [Bahadori, 2012]. عملکرد مخلوط‌های آسفالتی تابعی از نوع قیر، مصالح سنگی و خصوصیات حجمی آسفالت است. قیر اگرچه جزء کوچکی از مخلوط آسفالتی را تشکیل می‌دهد، لیکن این ماده با داشتن نقش مهم ایجاد پیوستگی در آسفالت، می‌تواند تأثیر زیادی بر عملکرد مخلوط‌های آسفالتی داشته باشد [Ameri et al. 2016; Ameri et al. 2014]. قیر با خاصیت ویسکوالاستیک خود در عمر خدمت‌دهی آسفالت، در دمای پایین و زمان بارگذاری کم، همچون یک جامد الاستیک و در دمای بالا و زمان بارگذاری زیاد مشابه یک سیال ویسکوز عمل می‌نماید و در شرایطی مابین، رفتار پیچیده‌ای خواهد داشت. اصلاح قیر و نهایتاً مخلوط‌های آسفالتی یک روش مؤثر برای ممانعت از بروز خرابی‌های روسازی است [Nasr, 2011]. یکی از راه‌های اصلاح قیر، استفاده از افزودنی‌های نظیر پلیمرها، فیلر، فیبر، مواد ضدعریان‌شدگی و... است که در این میان، پلیمرها به‌عنوان یکی از بهترین افزودنی‌های اصلاح‌کننده آسفالت شناخته شده‌اند [Golchin, Hamzeh and Hasan, 2017; Nasr, 2011]. عملکرد اساسی پلیمرها تأثیر بر روی خواص فیزیکی، شیمیایی و رئولوژیکی قیر است [Nciri, Kim and Cho, 2017]. لاستیک‌هایی همچون استایرن بوتادین رابر (SBR<sup>2</sup>) و خرده لاستیک با بهبود خواص الیسیسته قیر، خستگی آسفالت را بهبود می‌بخشند [Liang et al. 2017; Ameri et al. 2017; Abdul-Mawjoud and

آمیخته می‌توانند علاوه بر داشتن پایداری مناسب، عملکردی شبیه به استایرن بوتادین استایرن در آزمون خستگی و شیار شدگی را ارائه دهند.

## ۲. مصالح مصرفی

### ۲-۱ مصالح سنگی

سنگ‌دانه‌ها جزء باربر آسفالت بوده و مشخصات آن تأثیر زیادی بر خصوصیات سازه‌ای آسفالت خواهد داشت. این خواص می‌تواند شامل مشخصات کانی‌شناسی مصالح سنگی، ترکیبات بیرونی، زبری و رطوبت سطح باشد. [Majidzadeh and Brovold, 1968]. مصالح سنگی مصرفی از نوع شکسته آهکی با مشخصات به شرح جدول ۱ و منطبق بر منحنی میانگین دانه‌بندی شماره ۴ نشریه ۲۳۴ برای آستر و رویه (شکل ۱) هستند.

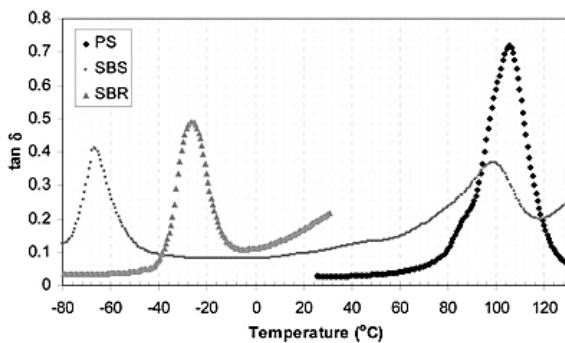
جدول ۱. مشخصات مصالح سنگی مورد استفاده

استاندارد	مقدار مجاز برای رویه	مقدار	مشخصات
AASHTO T96	۳۰	۲۲/۳	حداکثر درصد سایش به روش لوس آنجلس
BS 812	۲۵	۱۶	حداکثر درصد ضریب تورق
ASTM D5821	۹۰	۹۳	حداقل درصد شکستگی در دو وجه
AASHTO T85	۲/۵	۲/۲	حداکثر درصد جذب آب مصالح درشت‌دانه
AASHTO T84	۲/۵	۲/۴	حداکثر درصد جذب آب مصالح ریزدانه
			وزن مخصوص
ASTM C127	-	۲/۵۹	درشت‌دانه (گرم بر سانتی‌متر مکعب)
ASTM C128	-	۲/۳۲	وزن مخصوص ریزدانه (گرم بر سانتی‌متر مکعب)

اکثر پلیمرهای مورد استفاده در آسفالت سازگاری مناسب با قیر را نداشته و ته‌نشینی آن‌ها در قیر ممکن است اتفاق بیافتد. همچنین بعضی از پلیمرها تنها برخی خواص آسفالت را بهبود می‌بخشند و برای ارتقاء سایر خواص آسفالت می‌بایست از افزودنی‌های دیگری برای اصلاح آن استفاده نمود. تجارب موفقیت‌آمیزی از به‌کارگیری آمیخته‌های پلیمری در صنعت روسازی به دست آمده است. در پژوهشی به‌منظور ارتقاء خواص قیر حاوی خرده لاستیک از آمیخته این پلیمر و استایرن بوتادین استایرن استفاده نمودند. این آمیزه پلیمری علاوه بر افزایش پایداری پلیمر در قیر، موجب بهبود مقاومت شیار شدگی و خواص ارتجاعی آسفالت شد [Liang et al. 2015]. ترکیب پلی‌اتیلن ترفتالات و خرده لاستیک به‌عنوان دو پلیمر بازیافتی می‌تواند موجب بهبود پایداری پلیمر در قیر، مقاومت شیار شدگی و خاصیت الاستیک قیر شود [Karahrodi et al. 2017]. آمیخته دو پلاستومر اتیلن ونیل استات و پلی‌اتیلن، خاصیت الاستیک قیر در دمای بالا را افزایش داده و این نشان از بهبود مقاومت شیار شدگی است. همچنین ترکیب ۹ درصدی این آمیخته در قیر موجب افزایش دو برابری عمر خستگی نمونه فاقد افزودنی گشته است [Brovelli et al. 2015].

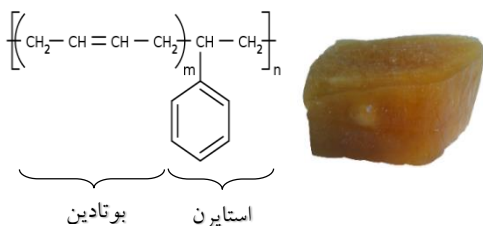
در این تحقیق به‌منظور دستیابی به خواص عملکردی استایرن بوتادین استایرن به‌عنوان یک پلیمر وارداتی، گران‌قیمت و ناپایدار، لیکن از یکی بهترین اصلاح‌کننده‌های آسفالت، از آمیخته دو پلیمر ارزان‌قیمت تولید کشور ایران با نام‌های استایرن بوتادین رابر و پلی استایرن در آسفالت استفاده شده است. پلی استایرن خالص رفتار شکننده‌ای دارد، لیکن در حضور استایرن بوتادین رابر، آمیخته‌ای شکل‌پذیر تولید و خواص مکانیکی آن بهبود پیدا می‌کند. مطالعات یوسفی بر روی ترکیبات مختلف از آمیخته پلیمری استایرن بوتادین رابر و پلی استایرن نشان داد، که رفتار ترمومکانیکی<sup>۶</sup> این آمیخته، بسیار نزدیک به کوپلیمر استایرن بوتادین استایرن است [Yousefi, 2013]. به‌منظور ارزیابی اثر آمیخته مورد مطالعه و مقایسه آن با پلیمر و قیر شاهد، نمونه‌های قیری اصلاح‌شده تحت آزمایش پایداری و نمونه‌های آسفالتی ساخته‌شده، تحت آزمایش‌های تیر خمشی چهار نقطه، خستگی کشش غیرمستقیم، کشش غیرمستقیم و خزش دینامیکی قرار می‌گیرند. نتایج نشان داد که ترکیباتی از این

نقش ماتریس را بازی می‌کند و برای مقادیر پایین به فاز پخش شده تبدیل می‌شود [Barzegari, Yousefi and Zeynali, 2002] و همان‌طور که منحنی ترمومکانیکی شکل ۲ نشان می‌دهد، به نظر می‌رسد رفتار ترمومکانیکی آمیخته SBR و PS بسیار شبیه به SBS بوده و انتظار می‌رود رفتار عملکردی این ترکیب در آسفالت بسیار نزدیک به کوپلیمر SBS باشد [Yousefi, 2013].

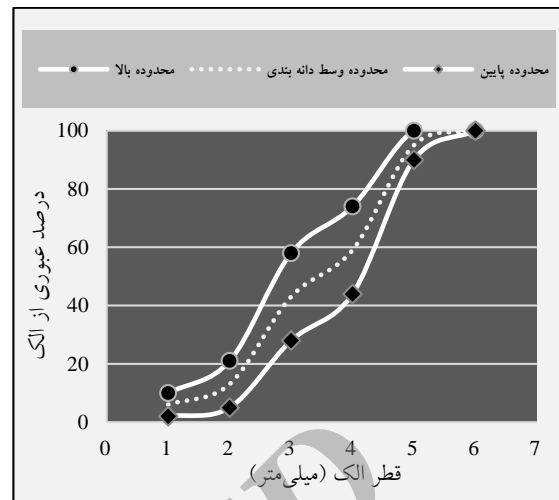


شکل ۲. منحنی ترمومکانیکی سه پلیمر PS، SBR و SBS [Yousefi, 2013]

پلیمر استایرن بوتادین رابر از کوپلیمریزاسیون استایرن و بوتادین تولید می‌شود. مونومر نرم بوتادین در الیسیته شرکت می‌کند و قیر را منعطف‌تر می‌سازد، درحالی‌که مونومر سخت استایرن، سختی و نقطه نرمی قیر را افزایش می‌دهد [Rossmann, 2007]. وجود مونومر استایرن در استایرن بوتادین رابر باعث بهبود سازگاری این پلیمر با پلی استایرن و افزایش برهمکنش بین دو فاز و قابلیت اختلاط آن‌ها، علی‌رغم اختلاف موجود در پارامتر حلالیت آن‌ها می‌شود [Yousefi, 2013]. استایرن بوتادین رابر مصرفی از نوع SBR1502 تولیدی پتروشیمی بندر امام خمینی<sup>(ه)</sup> بوده که قابلیت پخش‌شدگی بالایی در کنار انحلال خوب در قیر دارد. ساختار کلی و خصوصیات این پلیمر به ترتیب در شکل ۳ و جدول ۳ قابل مشاهده است.



شکل ۳. تصویر ظاهری و ساختار شیمیایی پلیمر SBR



شکل ۱. حدود بالا، پایین و وسط دانه‌بندی شماره ۴ نشریه ۳۳۴

## ۲-۲ قیر

چسباننده خالص و اصلاح‌شده مخلوط آسفالتی این پژوهش، از قیر خالص ۶۰-۷۰ تولیدی پالایشگاه نفت پاسارگاد تهران تهیه گشته‌اند. مشخصات این قیر در جدول ۲ قابل مشاهده است.

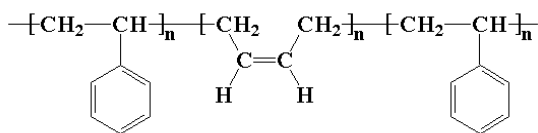
جدول ۲. خصوصیات فیزیکی قیر خالص مورد استفاده

مشخصات	مقدار	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

## ۳-۲ افزودنی‌ها

در این تحقیق از لاستیک استایرن بوتادین رابر، پلاستیک گرمانرم پلی استایرن و ترموپلاستیک الاستومر<sup>۷</sup> استایرن بوتادین استایرن استفاده شده است. پلی استایرن به دلیل آروماتیک بودن با آسفالتن سازگاری بهتری داشته و از ته‌نشین شدن آسفالتن به دلیل کاهش فاز مالتنی و جذب آن توسط استایرن بوتادین رابر جلوگیری می‌کند. بوتادین موجود در استایرن بوتادین رابر به دلیل پارافینی بودن، بیشتر با جز مالتن سازگار است. برای مقادیر بالای استایرن بوتادین رابر در آمیخته پلیمری، این پلیمر

[Goli, 2004]. در این کوپلیمر سه بلوکه، بلوک‌های استایرن به‌وسیله یک بلوک بوتادین از یکدیگر جدا شده‌اند و در قیر توانایی ایجاد یک شبکه الاستیک سه‌بعدی از فاز پلی استایرن را تشکل می‌دهد که به‌وسیله فاز پلی بوتادین به یکدیگر متصل شده‌اند (شکل ۵). در این پژوهش از SBS 501 با ساختار مولکولی خطی و با مشخصات جدول ۵ استفاده شده است.



شکل ۵. ساختار شیمیایی پلیمر استایرن بوتادین استایرن

جدول ۵. مشخصات SBS مصرفی (SBS 501)

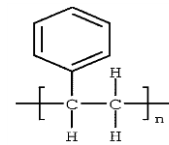
میزان	مشخصات
۳۱	مقدار استایرن (درصد وزنی)
۱۱۵	نقطه نرمی (درجه سانتی‌گراد)
۵۵	درجه نفوذ (۰/۱ میلی‌متر)
۱۶۰۰	ویسکوزیته در ۱۶۰ درجه سانتی‌گراد (سانتی‌پواز)
۰/۸۷	وزن مخصوص (گرم بر سانتی‌متر مکعب)
۱۰۰ و -۶۷	دمای انتقال شیشه‌ای (درجه سانتی‌گراد)

از آنجاکه در غالب تحقیقات انجام‌گرفته، پایداری پلیمرها در قیر جوابگو نبوده است [Ait-Kadi, Brahimi and Bousmina, 1996; Makarov et al. 2014]. در این بررسی علاوه بر کاربرد پلیمرها به‌صورت ذرات بسیار کوچک، از نانو ماده Nanofil-15 که نوعی نانو رس از نوع مونت موریلونیت است به‌عنوان افزودنی پایدارکننده در مخلوط قیر و پلیمر استفاده شده است. این نانو ماده با داشتن سطح ویژه بالا (۷۰۰ تا ۸۰۰ مترمربع بر گرم) قابلیت ارتباط بیشتر با سایر مواد محیط (قیر و پلیمر) را ایجاد می‌کند و با توزیع مناسب در تمام حجم قیر، موجب کاهش میزان ته‌نشینی مواد می‌گردد. خصوصیات این ماده در جدول ۶ قابل مشاهده است.

جدول ۳. مشخصات SBR مصرفی (SBR 1502)

میزان	مشخصات
۲۲/۵-۲۴/۵	مقدار استایرن (درصد وزنی)
۴/۷۵-۷	ارگانیک اسید (درصد وزنی)
۲۴/۵	استحکام کششی (مگا پاسکال)
۳۵۰	ازدیاد طول تا پارگی (درصد)
-۳۰	دمای انتقال شیشه‌ای (درجه سانتی‌گراد)
۰/۹۸۲	وزن مخصوص (گرم بر سانتی‌متر مکعب)

پلاستومر پلی استایرن مصرفی، تولیدی شرکت پتروشیمی تبریز بوده که شکل ظاهری و ساختار شیمیایی آن در شکل ۴ و مشخصات فیزیکی آن در جدول ۴ قابل مشاهده است.



شکل ۴. تصویر ظاهری و ساختار شیمیایی پلیمر PS

جدول ۴. مشخصات پلی استایرن مصرفی (PS 1540)

میزان	مشخصات
۵۰۰	حداکثر مقدار استایرن (واحد در میلیون)
۸۹/۵	نقطه نرمی (درجه سانتی‌گراد)
۴۵	استحکام کششی (مگا پاسکال)
۲	ازدیاد طول تا پارگی (درصد)
۳۰۰۰	مدول خمشی (مگا پاسکال)
+۱۰۰	دمای انتقال شیشه‌ای (درجه سانتی‌گراد)
۰/۱	حداکثر درصد جذب آب

استایرن بوتادین استایرن نوعی ترموپلاستیک الاستومر است که قابلیت بهبود خواص دمای پایین (۳۸ درجه سانتی‌گراد) و بالای (۱۳۰ درجه سانتی‌گراد) قیر را دارد

## بررسی و مقایسه اثر آمیخته SBR/PS و SBS بر خستگی مخلوط‌های آسفالتی

شبهه‌ساز بهتر تراکم غلظتی در کارگاه است، تهیه شدند [Imaninasab and Joodaki, 2016].

### ۲-۳ آزمایش پایداری ذخیره‌سازی

با افزودن پلیمر به قیر، تعادل فازها از بین رفته و به عبارت ساده‌تر می‌توان گفت که دو گروه پلیمر و آسفالتن<sup>۱۰</sup> برای حل نمودن فاز مالتن<sup>۱۱</sup> رقابت می‌کنند و در صورت ناسازگاری پلیمر با آسفالتن به صورت جذب کامل مالتن قیر، آسفالتن و پلیمر دو فاز جدا را تشکیل و مخلوطی غیریکنواخت ایجاد می‌نمایند [Barzegari, Yousefi and Zeynali, 2002].

در این آزمایش مطابق با ASTM D 5976، نمونه‌های قیر اصلاح‌شده درون یک استوانه‌ای با قطر ۳۲ میلی‌متر و ارتفاع ۱۶۰ میلی‌متر ریخته شده و سپس به طور عمودی به مدت ۴۸ ساعت در داخل یک گرم‌کن با دمای ۱۶۳ سانتی‌گراد قرار می‌گیرند. پس از آن به مدت ۴ ساعت در دمای ۵ سانتی‌گراد زیر صفر و در نهایت نمونه‌ها سرد شده و از طول به سه قسمت مساوی برش زده می‌شوند. قسمت بالایی و پایینی برای ارزیابی پایداری ذخیره‌سازی قیر اصلاح‌شده استفاده می‌گردد. اگر اختلاف بین نقطه نرمی این دو قسمت، کمتر از ۲/۵ سانتی‌گراد باشد، قیر اصلاح‌شده پایدار بوده و هر چه اختلاف نقطه نرمی از مقدار مذکور انحراف یابد منجر به ناپایداری بیشتر پلیمر در قیر می‌شود.

### ۳-۳ آزمایش خستگی کشش غیرمستقیم

این آزمایش به وسیله دستگاه<sup>12</sup> UTM و به صورت تنش ثابت انجام می‌گیرد. حداکثر بار وارد بر نمونه ۲۷۰ کیلو پاسکال با فرکانس ۱۰ هرتز و دوره استراحت ۱:۴ و در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد است. خروجی مورد استفاده از این آزمایش، نمودار تغییر شکل-سیکل بارگذاری بوده که با تقسیم آن به سه ناحیه می‌توان گفت که در ابتدا نمونه دچار تغییر شکل‌های تجمعی سریع به دلیل فشرده شدن هوای داخل آن در اثر اعمال بار شده و پس از عبور از ناحیه خطی در نهایت با شروع ترک‌های اولیه، نمونه به صورت تدریجی دچار شکست خواهد شد که تعداد سیکل بارگذاری تا رسیدن به این مرحله برابر عمر خستگی خواهد بود [Kok and Colak, 2011].

جدول ۶. مشخصات Nanofil مصرفی (Nanofil-15)

میزان	مشخصات
۷۵	غلظت اصلاح‌کننده (میلی اکری والان در ۱۰۰ گرم رس)
کمتر از ۳	میزان رطوبت (درصد)
۳۵	کاهش وزن در اثر احتراق (درصد)
آمونوم کلرید	نوع آنیون
۱۰ درصد کمتر از ۵	اندازه ذرات (میکرومتر)
۵۰ درصد کمتر از ۱۵	
۹۰ درصد کمتر از ۲۵	
۱/۸۸	چگالی (گرم بر سی‌سی)

### ۳. روش تحقیق

#### ۳-۱ طرح اختلاط

به منظور تهیه قیر حاوی پلیمر، ابتدا قیر و پلیمر تا دمای ۱۵۰ درجه سانتی‌گراد گرم شده و سپس دو پلیمر SBR و PS در مقادیر ۳۵، ۵۰ و ۶۵ درصد نسبت به آمیخته خویش و به میزان ۳ و ۵ درصد و SBS به میزان ۳، ۴ و ۵ درصد وزنی به قیر اضافه می‌شوند. عمل اختلاط قیر و افزودنی‌ها با دستگاه هایشیر<sup>۱۳</sup> با دور ۵۵۰۰ دور بر دقیقه صورت پذیرفت. به منظور تهیه ترکیبی همگن، این فرآیند به مدت یک ساعت پیوسته به طول انجامید، که در ۳۰ دقیقه اول تنها پلیمرها با قیر ترکیب شده و در ۳۰ دقیقه دوم و در حین اختلاط قیر و پلیمر، نانو رس به میزان ۲ درصد وزن قیر به آرامی به مخلوط اضافه شد.

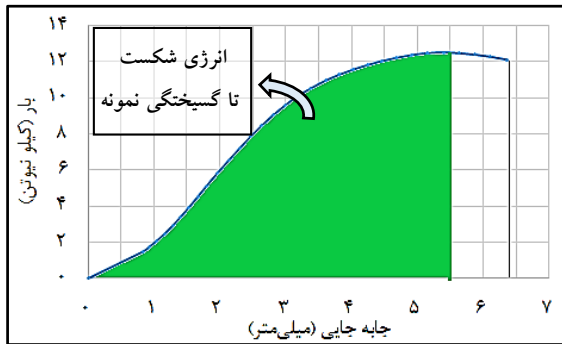
جهت تعیین قیر بهینه، مطابق با استاندارد ASTM D1599 سنگ‌دانه‌ها گرم شده در دمای ۱۷۰-۱۶۰ درجه سانتی‌گراد با مقادیر ۴، ۵، ۴/۵، ۵، ۵/۵ و ۶ درصد قیر نسبت به وزن مخلوط ترکیب شدند و مقادیر قیر بهینه برای نمونه‌های حاوی آمیخته پلیمری و نمونه حاوی استایرن بوتادین استایرن، ۵/۴ و برای نمونه فاقد افزودنی ۴/۹ حاصل گردید. پس از یافتن قیر بهینه، نمونه‌های مورد نیاز جهت آزمایش‌های کنترلی با استفاده از دستگاه متراکم‌کننده ژیراتوری روسازی ممتاز<sup>۱۴</sup> که

ITS: مقاومت کششی برحسب کیلو پاسکال

P: بیشینه بار برحسب کیلو نیوتن

D: قطر نمونه برحسب متر

t: ضخامت نمونه برحسب متر



شکل ۶. منحنی بار-تغییر مکان خروجی آزمایش کشش غیرمستقیم

برای محاسبه مساحت، خروجی نرم افزار آزمایش که به صورت داده های متناظر بار و تغییر مکان است در نرم افزار مهندسی متلب<sup>۳</sup> بارگذاری شده و مقدار سطح زیر منحنی تا نقطه حداکثر بار محاسبه می گردد. برای محاسبه حجم نیز با داشتن قطر ثابت نمونه، مقدار ارتفاع نمونه در سه ناحیه اندازه گیری شده و پس از محاسبه میانگین آن ها مقدار حجم نمونه از طریق رابطه هندسی یافت می شود.

### ۳-۶ آزمایش خزش دینامیکی

شیار شدگی نیز همچون ترک خستگی از جمله خرابی های سازه ای بوده که در این بررسی به منظور کنترل مقاومت نمونه در برابر تغییر شکل دائم، آزمون خزش دینامیکی نیز انجام گرفت. در این راستا با استفاده از دستگاه UTM و در دمای ۵۰ درجه سانتی گراد، نمونه ها تحت بارگذاری نیمه سینوسی با تنش ۴۵۰ کیلو پاسکال به صورت ۰/۵ ثانیه بارگذاری و ۱/۵ ثانیه استراحت قرار گرفتند.

### ۴. نتایج و تفسیر داده ها

#### ۴-۱ نتایج آزمون پایداری

### ۳-۴ آزمایش خستگی تیر خمشی

این آزمایش مطابق با استاندارد AASHTO T321 در دمای ۲۵ درجه سانتی گراد با بارگذاری شبه سینوسی در فرکانس ۱۰ هرتز و در سطح کرنش ۸۰۰ میکرو استرین انجام گرفته است که عمر خستگی برابر تعداد سیکل های بارگذاری تا رسیدن سختی نمونه به نیمی از سختی اولیه تعریف شده است.

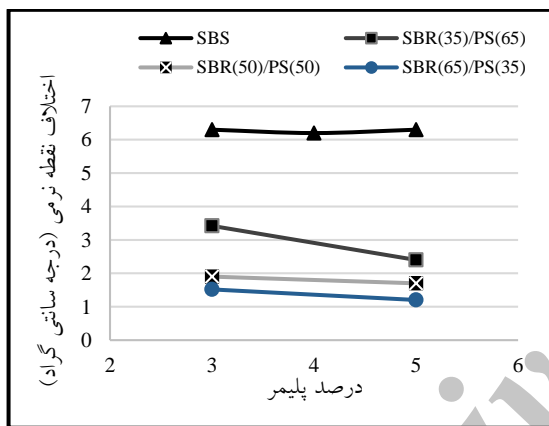
### ۳-۵ آزمایش کشش غیرمستقیم

قیر با ایفای نقش چسبندگی، قابلیت اعمال کشش در مخلوط های آسفالتی را فراهم می آورد. آزمایش کشش غیرمستقیم مطابق ASTM D 6931-12 انجام می گیرد و به طور متداول برای ارزیابی میزان حساسیت رطوبتی مخلوط های آسفالتی به کار برده می شوند. مقدار مقاومت کششی مطابق رابطه ۱ به دست می آید که هرچه این مقاومت بیشتر باشد، آسفالت می تواند کرنش های بالاتری را تا قبل از گسیختگی تحمل نماید. استحکام در برابر ترک خستگی به وسیله مقاومت ماده در برابر تغییر شکل و خرابی کنترل می گردد. برای مثال مقاومت خستگی ماده الاستیک به دلیل مقاومت زیاد در برابر تغییر شکل، بسیار بالا بوده و مقدار کار مورد نیاز برای ایجاد تغییر شکل آن زیاد است [Bahadori, 2012]. سطح زیر نمودار بار-تغییر مکان تا نقطه گسیختگی برابر با انرژی شکست بوده که بیانگر انرژی مورد نیاز برای آغاز شکست در مخلوط های آسفالتی است و در حقیقت این انرژی برابر مجموع دو انرژی کرنشی و تلف شده است [Kim and Wen, 2002]. مطالعات پیشین نشان داده است که این انرژی برای بررسی مقاومت ترک خوردگی روسازی آسفالتی است [Bahadori, 2012; Wen et al. 2010]. هدف اصلی انجام این آزمایش، یافتن چگالی انرژی شکست است. این پارامتر برابر نسبت مقدار سطح محصور منحنی بار-تغییر مکان تا حداکثر بار در لحظه گسیختگی (شکل ۶) به حجم نمونه آسفالتی است. انرژی شکست به نوعی بیان کننده میزان انرژی لازم به منظور ایجاد ترک در نمونه های آسفالتی است و هرچه قدر این انرژی افزایش یابد، مقاومت نمونه در برابر ایجاد خرابی افزایش می یابد [Bahadori, 2012].

$$ITS = \frac{2P}{\pi \cdot D \cdot t} \quad (1)$$

## بررسی و مقایسه اثر آمیخته SBR/PS و SBS بر خستگی مخلوط‌های آسفالتی

افزودنی، عمر خستگی نیز افزایش می‌یابد و بهترین نتایج در میزان ۵ درصد از هر نمونه قیری حاصل شده است. با مقایسه نمونه‌های حاوی آمیخته پلیمری می‌توان دریافت که با افزایش مقدار SBR در آمیخته، عمر خستگی نیز افزایش می‌یابد. دو نمونه SBR(65)/PS(35) و SBS در مقدار ۵ درصد با داشتن عملکرد مشابه، بالاترین مقادیر عمر خستگی را به خود اختصاص داده‌اند. در این ارزیابی سه نمونه SBS ۴ درصد و SBR(65)/PS(35) ۳ درصد، ۵ درصد SBR(35)/PS(65) نیز عملکرد مشابهی را از خود نشان داده‌اند.

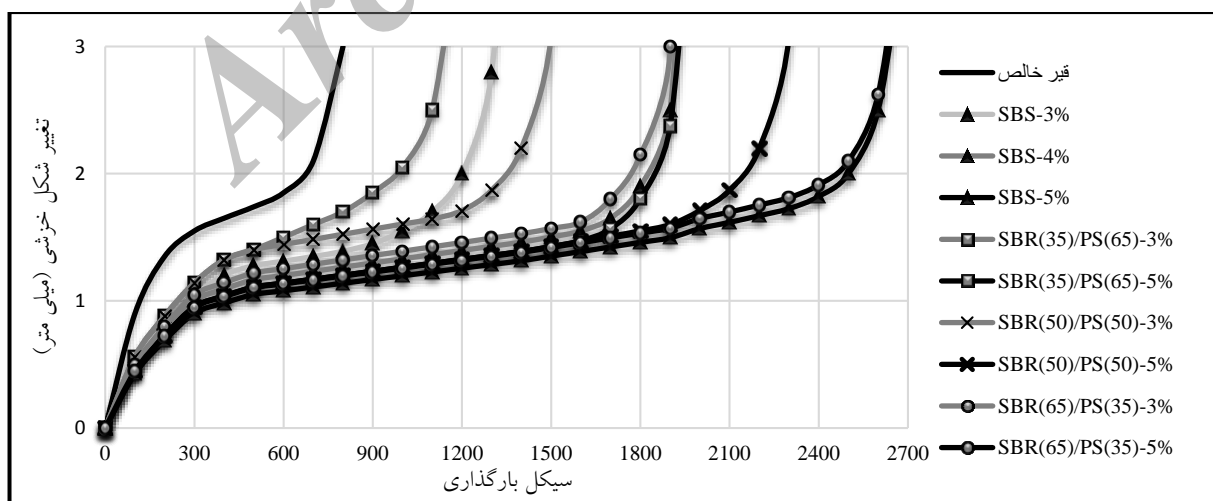


شکل ۷. نتایج آزمون پایداری ذخیره‌سازی

گراش، کشش بین ذرات و شناوری از نیروی‌هایی هستند که بر سیستم تعادل تأثیر می‌گذارند. در هنگام ذخیره‌سازی قیرهای اصلاح‌شده، به دلیل اختلاف در پارامتر حلالیت و چگالی بین قیر و پلیمر، جدایی فازها اتفاق می‌افتد [Galooyak et al. 2010]. نتایج حاصل از آزمون پایداری در نمودار شکل ۷ قابل مشاهده است. در نمونه حاوی استایرن بوتادین استایرن، اختلاف نقاط نرمی بالاتر از ۲/۵ درجه است، لیکن آمیخته‌ها پایداری مطلوبی را به همراه داشته‌اند. با افزایش مقدار SBR و یا میزان آمیخته در قیر، این پایداری افزایش می‌یابد به طوری که در میزان ۵ درصد آمیخته حاوی ۶۵ درصد از این پلیمر، بالاترین پتانسیل پایداری مشاهده می‌شود. پلی استایرن به دلیل آروماتیکی بودن با آسفالتن قیر سازگاری بهتری ایجاد می‌کند [Barzegari, Yousefi and Zeynali, 2002] و از ته‌نشین شدن آسفالتن به دلیل جذب مالتن توسط SBR جلوگیری می‌کند. این درحالی‌که است که بوتادین موجود در SBR نیز به دلیل پارافینی بودن با جز مالتن قیر سازگار است و تلفیقی از این دو پلیمر توانسته است پایداری مناسبی را در قیر ایجاد نماید.

### ۴-۲ نتایج آزمایش خستگی کشش غیرمستقیم

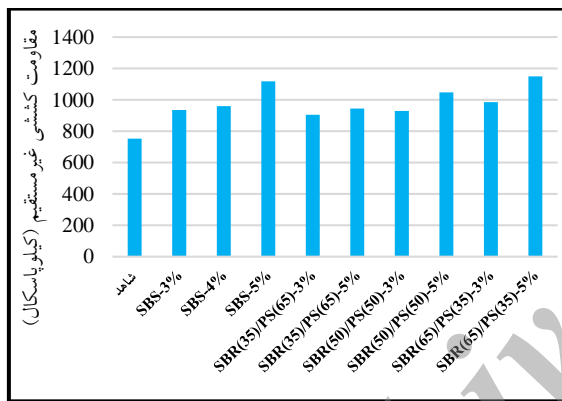
خروجی و نمودار عمر خستگی حاصل از این آزمایش به ترتیب در اشکال ۸ و ۹ قابل مشاهده هستند. با افزایش مقدار



شکل ۸. نتایج آزمایش خستگی کشش غیرمستقیم

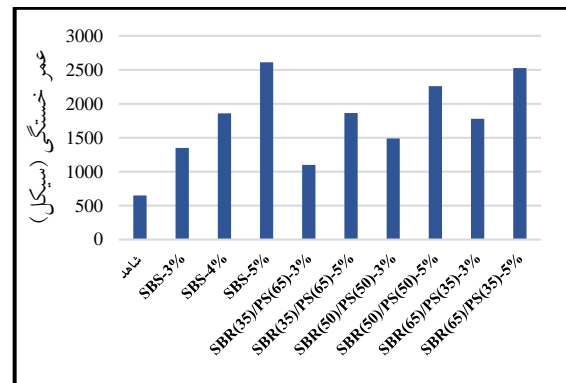


افزایش میزان افزودنی مقدار این مقاومت نیز افزایش یافته است، به طوری که بیشترین مقادیر مقاومت در نمونه‌های آسفالتی حاوی ۵ درصد افزودنی مشاهده می‌شود. ترکیب دو پلیمر الاستومر SBR و پلاستومر PS توانسته است ترکیبی ایجاد نماید که همچون پلیمر ترموپلاستیک الاستومر SBS موجب افزایش مقاومت کششی مخلوطها گردد. تحقق این امر در نمونه آسفالتی دارای آمیخته حاوی ۶۵ درصد SBR به وضوح قابل مشاهده است. بوتادین موجود در SBR و SBS با ایجاد انعطاف پذیری بیشتر در قیر و بهبود خاصیت کششی مخلوطها موجب ایجاد نتایج بهتری در نمونه‌های حاوی مقادیر بالاتری از این پلیمرها گشته است.



شکل ۱۱. مقاومت کششی غیرمستقیم

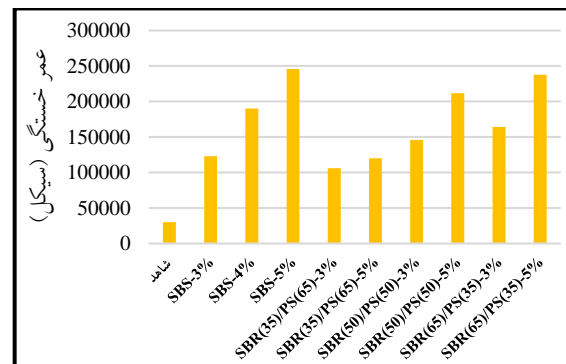
شکل ۱۲ مقادیر چگالی انرژی شکست (نسبت انرژی شکست به حجم نمونه آسفالتی) را نشان می‌دهد. نمونه‌های حاوی میزان بیشتری از دو پلیمر SBR و SBS، مقادیر انرژی شکست بیشتری را ارائه نموده‌اند. در صورتی که نمونه‌های حاوی مقادیر بیشتری از PS به دلیل ماهیت پلاستیکی پلیمر در برابر اعمال بار، ضعیف عمل نموده و زودتر به نقطه شکست می‌رسند. ایجاد خاصیت الاستیک در نمونه‌های آسفالتی منجر به مستهلک نمودن انرژی وارد بر نمونه گشته و این امر نهایتاً سطح زیر منحنی بار-تغییر مکان را افزایش داده است. مقایسه دو نمونه حاوی یک نوع آمیخته نشان می‌دهد که با افزایش میزان افزودنی در آسفالت، پلیمر SBR بر PS غلبه نموده و انرژی شکست بیشتری را برای نمونه فراهم می‌آورد. از این رو همان‌طور که انتظار می‌رفت در نمونه‌های حاوی SBR بیشتر، مقاومت در برابر ترک خستگی بهتر است.



شکل ۹. عمر خستگی آزمایش خستگی کشش غیرمستقیم

#### ۴-۳ نتایج آزمایش خستگی تیر خمشی

تعداد سیکل‌های کاهنده‌ی سختی نمونه به نصف مقدار اولیه در نمودار شکل ۱۰ نشان داده شده است. عمر خستگی نمونه‌های پلیمری حداقل ۲٫۵ برابر نمونه شاهد بوده و نمونه حاوی SBS ۵ درصد و آمیخته حاوی ۶۵ درصد SBR به‌طور مشابهی بالاترین مقادیر را ارائه داده‌اند. با مقایسه نمونه‌های حاوی ۵۰ و ۶۵ درصد از SBR می‌توان دریافت که تأثیر غالب SBR در آمیخته‌ها منجر شده تا با افزایش مقدار این پلیمر در مخلوط‌های آسفالتی، عملکرد در برابر ترک خستگی بهبود یابد. ترکیب دو پلیمر مورد مطالعه توانسته است عمر خستگی را همچون پلیمر گران‌قیمت SBS بهبود بخشد.



شکل ۱۰. عمر خستگی آزمایش تیر خمشی

#### ۴-۴ نتایج آزمایش کشش غیرمستقیم

میزان مقاومت کشش غیرمستقیم نمونه‌های آسفالتی در شکل ۱۱ قابل مشاهده است. افزایش خاصیت الاستیک در نمونه‌های حاوی پلیمر منجر شده تا مقاومت کششی آنها افزایش یابد. با

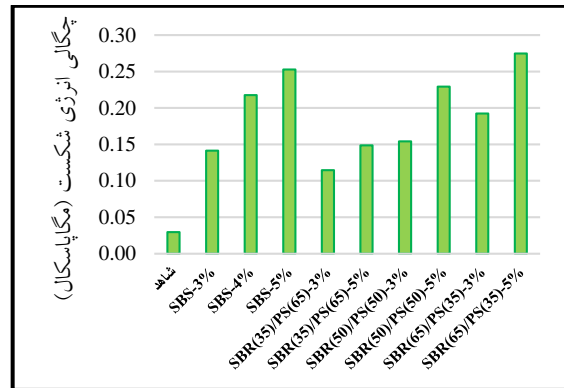
## ۵. تحلیل نتایج آزمون‌های خستگی

### ۱-۵ بررسی رابطه بین نتایج

در آزمون تیر خمشی کرنش ثابت، برای ثابت نگه‌داشتن کرنش ایجاد شده در نمونه، مقدار بار وارد بر آن تا رسیدن به نیمی از سختی اولیه دائماً در حال تغییر و رو به کاهش است، درحالی‌که در آزمون خستگی کشش غیرمستقیم که در حالت تنش ثابت انجام گرفت، مقدار بار وارد بر نمونه تا مرز گسیختگی آن تغییری نخواهد داشت. از این رو همان‌طور که انتظار می‌رفت مقادیر عمر خستگی حاصل از آزمون تیر خمشی به علت کاهش مقدار بار و عدم ایجاد شکست در نمونه، بیشتر از مقادیر عمر خستگی آزمون کشش غیرمستقیم یافت شد. این عدم گسیختگی در آزمون کرنش ثابت، نتایج حاصل را با واریانس بالا و غیرواقعی‌تر نشان می‌دهد و تنها با تعداد تکرارپذیری زیاد و حذف داده‌های خارج از بازه اطمینان می‌توان به مقایسه عملکرد خستگی مخلوط‌ها پرداخت که در این پژوهش عملیات پایش بر روی داده‌ها انجام گرفت.

انرژی شکست (مجموع انرژی‌های کرنشی و تلف‌شده) که در این تحقیق در قالب چگالی انرژی شکست مورد بررسی قرار گرفت، نشان داد که برای ایجاد شکست در نمونه‌های آسفالتی حاوی پلیمر، انرژی بیشتری نسبت به نمونه فاقد افزودنی نیاز است. به‌منظور صحت سنجی این مطلب که چگالی انرژی شکست می‌تواند پیش‌بینی مناسبی از عمر خستگی را ارائه دهد، رابطه بین نتایج عمر خستگی حاصل از دو آزمایش و چگالی انرژی شکست مورد ارزیابی قرار گرفت. همان‌طور که در اشکال ۱۴ و ۱۵ قابل مشاهده است، رابطه تقریباً خطی با ضریب همبستگی بالایی مابین خروجی آزمایش‌های خستگی و کشش غیرمستقیم برقرار است. این امر نشان می‌دهد که بررسی و قضاوت در مورد مقایسه عمر خستگی با پارامتر چگالی انرژی شکست قابل اطمینان خواهد بود.

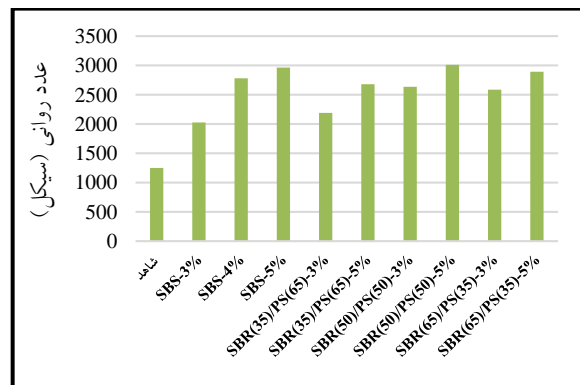
وجود ضریب همبستگی بالای ۰,۹۷۸۹ در نتایج آزمایش تیر خمشی نسبت به مقدار ۰,۹۱۶۴ در نتایج آزمایش خستگی کشش غیرمستقیم نشان می‌دهد که چگالی انرژی شکست با عمر خستگی حاصل از تیر خمشی تناسب بهتری دارد. لذا با توجه به سهولت در انجام آزمون کشش غیرمستقیم و



شکل ۱۲. چگالی انرژی شکست نمونه‌های آسفالتی

### ۴-۵ نتایج آزمایش خزش دینامیکی

عدد روانی حاصل از آزمون خزش دینامیکی در شکل ۱۳ قابل مشاهده است. افزایش SBS در مخلوط‌ها منجر به افزایش مقاومت شیار شدگی گشته است که این امر در پی وجود دو مونومر سخت‌کننده استایرن در این پلیمر است. در آمیخته‌های پلیمری با افزایش مقدار افزودنی، مقاومت شیار شدگی افزایش می‌یابد و بالاترین مقاومت در نمونه حاوی ۵۰ درصد PS مشاهده می‌شود. PS با بخشیدن ماهیت پلاستیکی به مخلوط موجب بهبود عملکرد در دماهای بالا می‌شود، لیکن بهترین عملکرد آن در مخلوط حاوی ۵ درصد آمیخته دارای ۵۰ درصد از این پلیمر است و پلیمر SBR که در دمای میانی عملکرد مناسبی را در آزمون‌های خستگی نشان می‌دهد، در بحث تغییر شکل دائم نتوانسته است همچون PS عمل نماید. از این رو ترکیبی ۵۰ درصدی از دو آمیخته، بهترین نتایج عملکردی در برابر تغییر شکل خزشی از خود نشان داده است.



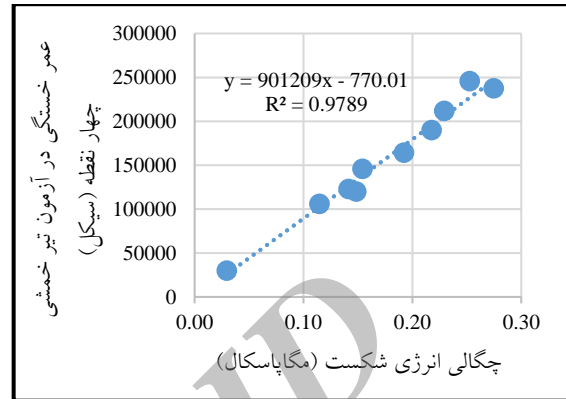
شکل ۱۳. نتایج آزمون خزش دینامیکی

استخراج پارامتر چگالی انرژی شکست، می‌توان با اطمینان بالایی نسبت به مقایسه عملکرد خستگی آسفالت اقدام نمود.

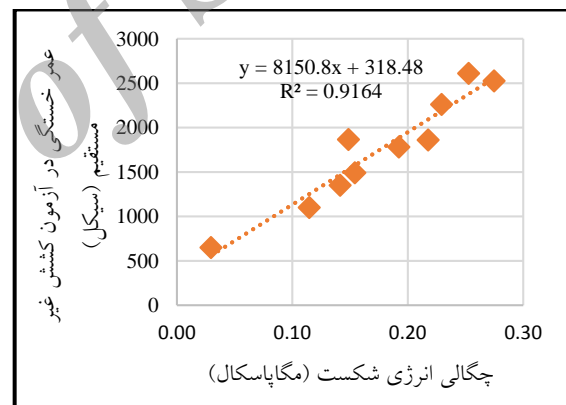
## ۲-۵ تحلیل آماری یک‌طرفه ANOVA

از آنجاکه موضوع اصلی این تحقیق ارزیابی خستگی مخلوط‌های آسفالتی است و در این راستا سه نوع آزمایش متفاوت جهت بررسی این پدیده بر روی نمونه‌های آسفالتی اصلاح شده انجام گرفت، به منظور اعتبارسنجی نتایج آزمایش‌های خستگی، از آنالیز واریانس یک‌طرفه بر روی نتایج حاصل از ده نوع مخلوط آسفالتی استفاده شده است. در این راستا پراکندگی‌های درون‌گروهی و برون‌گروهی که به ترتیب شاخصی از میزان تأثیر متغیرهای آزمایشی و میزان تأثیر نوع مخلوط‌ها بر نتایج است، مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. حال اگر واریانس درون‌گروهی بزرگ‌تر از واریانس برون‌گروهی باشد، می‌توان نتیجه گرفت که تفاوت میانگین‌ها ناشی از خطای آزمایشگاهی است و نتایج حاصل از آزمایش غیرقابل اطمینان است و بالعکس.

جدول ۷ نشان‌دهنده نتایج حاصل از این تحلیل است. تفاوت محسوس در اختلاف میانگین دو گروه که شاخص معنی‌داری (Sig.<sup>14</sup>) کمتر از ۰,۰۱ نیز آن را نشان می‌دهد، نشان از تأثیر بیشتر نوع مخلوط‌ها و به تبع تأثیر به‌مراتب کمتر خطای آزمایش بر نتایج آزمایشگاهی است. به عبارت دیگر افزودنی‌های پلیمری اثر قابل‌توجهی بر نتایج آزمایش‌های تیر خمشی خستگی، خستگی کشش غیرمستقیم و انرژی شکست کشش غیرمستقیم داشته‌اند. این امر نتایج حاصل از پژوهش را قابل استناد می‌نماید.



شکل ۱۴. رابطه بین چگالی انرژی شکست و عمر خستگی حاصل از آزمایش تیر خمشی



شکل ۱۵. رابطه بین چگالی انرژی شکست و عمر خستگی حاصل از آزمایش خستگی کشش غیرمستقیم

جدول ۷. نتایج آنالیز واریانس یک‌طرفه بر روی نتایج آزمایش‌های خستگی

نوع آزمایش		Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
خستگی تیر خمشی	Between Group	119706254395	9	13300694933	69.105	0.000
	Within Group	3849413348	20	192470667		
	Total	123555667744	29			
خستگی کشش غیرمستقیم	Between Group	10459920	9	1162213	119.712	0.000
	Within Group	194168	20	9708		
	Total	10654088	29			
چگالی انرژی شکست	Between Group	0.1443	9	0.016	1590.353	0.000
	Within Group	0.0002	20	0.000		
	Total	0.1445	29			

## ۶. جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

این بررسی نشان داد که آمیخته‌های پلیمری با عملکردی مشابه پلیمرهای پرکاربرد در صنعت روسازی، قابلیت بهبود خواص مخلوط‌های آسفالتی را دارند. آمیخته دو پلیمر ارزان‌قیمت تولید ایران با نام‌های استایرن بوتادین رابر و پلی استایرن با داشتن پایداری مناسب، خواص عملکردی مشابه استایرن بوتادین استایرن در آسفالت ارائه نموده است.

نمونه‌های ۵ درصدی از آمیخته حاوی ۶۵ درصد SBR و SBS با داشتن عملکردی مشابه، دارای بالاترین عمر خستگی هستند.

در تحلیل آماری نشان داده شد که چگالی انرژی شکست که به نوعی نشان‌دهنده میزان انرژی لازم جهت ایجاد گسیختگی در نمونه است، به خوبی بیانگر عمر خستگی مخلوط‌های آسفالتی خواهد بود و لذا می‌توان بدون انجام آزمون تیر خستگی و با انجام آزمایش کشش غیرمستقیم، عمر خستگی نمونه‌ها را مورد مقایسه قرار داد.

اگرچه با افزودن لاستیک SBR به مخلوط‌های آسفالتی مقاومت در برابر تغییر شکل‌های دائمی افزایش می‌یابد، لیکن PS با داشتن خاصیت پلاستیک خود منجر به افزایش بیشتری در این مقاومت شده و بهترین عملکرد در میان مخلوط‌های آسفالتی در نمونه ۵ درصدی از آمیخته حاوی ۵۰ درصد از این پلیمر مشاهده شده است.

از آنجاکه میزان ۵ درصد از SBS دارای بهترین عملکرد خستگی و شیار شدگی در مخلوط‌های آسفالتی است، می‌توان جهت جایگزینی با سایر مواد، از همین مقدار آمیخته حاوی ۶۵ درصد SBR و ۳۵ درصد PS استفاده نمود و به همان خواص عملکردی دست یافت.

## ۷. پی‌نوشت‌ها

1. Indirect Tensile Strength
2. Styrene Butadiene Rubber
3. Styrene Butadiene Styrene
4. Polystyrene
5. Thermoplastic
6. Thermomechanical
7. Thermoplastic Elastomer
8. High Shear Mixer
9. Superpave Gyrotory Compactor

10. Asphaltene
11. Maltene
12. Universal Testing Machine
13. MATLAB
14. Significance Difference

## ۸. مراجع

-بهداری، ا. م.، (۱۳۹۱) "بررسی ارتباط نتایج آزمایش کشش غیرمستقیم با عمر خستگی مخلوط‌های آسفالتی"، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، استاد راهنما: علی منصور خاکی، تهران: دانشکده فنی - مهندسی، گروه مهندسی عمران و راه و ترابری، دانشگاه علم و صنعت ایران.

-عامری، م.، وامق، م.، روح‌الامینی، ح. و بمانا، ک. (۱۳۹۳) "ارزیابی حساسیت رطوبتی در مخلوط‌های آسفالتی گرم (HMA) حاوی نانو رس"، فصلنامه مهندسی حمل و نقل، سال ۶، شماره ۴، ص. ۶۲۶-۶۱۳.

-گلی، ا.، (۱۳۸۶) "اثر پلیمر SBS در اصلاح مخلوط آسفالتی بر اساس پهنه بندی آب و هوایی استان اصفهان"، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، استاد راهنما: حسن زیاری، تهران: دانشکده فنی - مهندسی، گروه مهندسی عمران و راه و ترابری، دانشگاه علم و صنعت ایران.

-نصر، د.، (۱۳۹۰) "ارزیابی آزمایشگاهی رفتار خستگی در مخلوط‌های آسفالتی نیمه گرم (WMA) و مقایسه آن با مخلوط‌های آسفالتی گرم متداول (HMA)"، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، استاد راهنما: حسن زیاری، تهران: دانشکده فنی - مهندسی، گروه مهندسی عمران و راه و ترابری، دانشگاه علم و صنعت ایران.

-طاهرخانی، ح. و شفیعی ماتک، م. (۱۳۹۵) "مقایسه خصوصیات قیرهای اصلاح شده با نانورس و پلیمر SBS" پژوهشنامه حمل و نقل، دوره سیزدهم، شماره دوم، ص. ۵۷-۷۰.

-Abdul-Mawjoud, A. A. and Thanoon, L. S. (2015) "Evaluation of SBR and PS-modified asphalt binders and HMA mixtures containing

- Karahrodi, M. H., Jazani, O. M., Paran, S. M. R., Formela, K. and Saeb, M. R. (2017) "Modification of thermal and rheological characteristics of bitumen by waste PET/GTR blends", *Construction and Building Materials*, Vol. 134, pp.157-166.
- Khadivar, A. and Kavussi, A. (2013) "Rheological characteristics of SBR and NR polymer modified bitumen emulsions at average pavement temperatures", *Construction and Building Materials*, Vol.47, pp.1099-1105.
- Kim, Y. R. and Wen, H. (2002) "Fracture energy from indirect tension testing", *Association of Asphalt Paving Technologists*, Vol.71, pp.779-793.
- Kök, B. V. and Çolak, H. (2011), "Laboratory comparison of the crumb-rubber and SBS modified bitumen and hot mix asphalt", *Construction and Building Materials*, Vol.25, Issue 8, pp.3204-3212.
- Liang, M., Xin, X., Fan, W., Luo, H., Wang, X. and Xing, B. (2015), "Investigation of the rheological properties and storage stability of CR/SBS modified asphalt", *Construction and Building Materials*, Vol.74, pp.235-240.
- Liang, P., Liang, M., Fan, W., Zhang, Y., Qian, C. and Ren, S. (2017), "Improving thermo-rheological behavior and compatibility of SBR modified asphalt by addition of polyphosphoric acid (PPA)", *Construction and Building Materials*, Vol.139, pp.183-192.
- Majidzadeh, K. and Brovold, F. N. (1968) "Effect of Water on Bitumen-Aggregate Mixtures", *Highway Research Board*, Issue.98, p.77.
- Makarov, D., Ayupov, D., Murafa, A. and Khozin, V. (2014). "Compatibility studies of mixed thermoplastic rubber with road bitumen", *Open Civil Engineering Journal*, Vol.8, Issue 1, pp. 124-129.
- Mortazavi, S. B., Rasoulzadeh, Y., Yousefi, A. A. and Khavanin, A. (2010) "Properties of modified bitumen obtained from vacuum bottom by adding recycled waste polymers and such binders", *Applied Research Journal*, Vol. 1, Issue 9, pp.460-469.
- Ait-Kadi, A., Brahimi, B. and Bousmina, M. (1996). "Polymer blends for enhanced asphalt binders", *Polymer Engineering and Science*, Vol. 36, Issue 12, pp.1724-1733
- Ameri, M., Reza Seif, M., Abbasi, M. and Khavandi Khiavi, A. (2017) "Viscoelastic fatigue resistance of asphalt binders modified with crumb rubber and styrene butadiene polymer", *Petroleum Science and Technology*, Vol. 35, Issue 1, pp.30-36.
- Ameri, M., Vamegh, M., Imaninasab, R. and Rooholamini, H. (2016) "Effect of nanoclay on performance of neat and SBS-modified bitumen and HMA", *Petroleum Science and Technology*, Vol. 34, Issue 11-12, pp.1091-1097.
- Barzegari, M. R., Yousefi, A. A. and Zeynali, M. (2002) "Bitumen modification via PS/PB Blend", *Iranian Journal of Polymer Science and Technology*, Vol. 16, Issue 67, pp.303-311.
- Brovelli, C., Crispino, M., Pais, J. and Pereira, P. (2015) "Using polymers to improve the rutting resistance of asphalt concrete", *Construction and Building Materials*, Vol. 77, pp.117-123.
- Galooyak, S. S., Dabir, B., Nazarbeygi, A. E. and Moeini, A. (2010) "Rheological properties and storage stability of bitumen/SBS/montmorillonite composites", *Construction and Building Materials*, Vol. 24, Issue 3, pp.300-307.
- Golchin, B., Hamzah, M. O. and Hasan, M. R. M. (2017) "Optimization in producing warm mix asphalt with polymer modified binder and surfactant-wax additive", *Construction and Building Materials*, Vol. 141, pp.578-588.
- Imaninasab, R. and Joodaki, S. (2016) "Performance evaluation of polyamine anti-stripping additives", *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Construction Materials*, pp.1-9.

Civil Engineering, Vol. 29, Issue 5. p.04016282.

-Wen, H., Shen, S., Ma, Z. and Wang, J. (2010) "Modeling the effects of temperature and loading rate on fatigue property of asphalt binder", Journal of Testing and Evaluation, Vol. 19, Issue 6, pp.647-652.

-Yousefi, A. A. (2013) "Segmental mobility in the vicinity of T<sub>g</sub> in PS/SBR blends: Nanodomain size prediction of the dispersed phase", Journal of Applied Polymer Science, Vol. 127, Issue 1, pp.659-665.

-Zhang, F. and Hu, C. (2013) "The research for SBS and SBR compound modified asphalts with polyphosphoric acid and sulfur", Construction and Building Materials, Vol. 43, pp.461-468.

natural bitumen", Iranian Polymer Journal, Vol.19, Issue 3, pp.197-205.

-Nciri, N., Kim, N. and Cho, N. (2017) "New insights into the effects of styrene-butadiene-styrene polymer modifier on the structure, properties, and performance of asphalt binder: The case of AP-5 asphalt and solvent deasphalting pitch", Materials Chemistry and Physics, Vol.193, pp.477-495.

-Rossmann, S. (2007) "Technical guideline: the use of modified binders in road construction", Pretoria, Asphalt Academy, CSIR Built Environment.

-Salehfard, R., Abdi, A. and Amini, B. (2016) "Effect of SBR/NC on the Rheological Properties of Bitumen and Fatigue Resistance of Hot Mix Asphalt", Journal of Materials in

## سید فرهاد چاوشیان نائینی، محمود عامری

سید فرهاد چاوشیان نائینی، درجه کارشناسی در رشته مهندسی عمران را در سال ۱۳۹۴ از دانشگاه ولی عصر (عج) رفسنجان و درجه کارشناسی ارشد در رشته مهندسی عمران-راه و ترابری در سال ۱۳۹۶ را از دانشگاه علم و صنعت ایران اخذ نمود. زمینه های پژوهشی مورد علاقه ایشان روسازی آسفالتی و مصالح قیر است و در حال حاضر در شرکت مهندسی مشاور در زمینه مهندسی راهسازی و روسازی در حال فعالیت است.



محمود عامری، درجه کارشناسی را در سال ۱۳۶۰ از دانشگاه تگزاس و درجه کارشناسی ارشد در رشته مهندسی عمران - راه و ترابری را در سال ۱۳۶۴ از دانشگاه تگزاس اخذ نمود. در سال ۱۳۶۹ موفق به کسب درجه دکتری در رشته مهندسی عمران - راه و ترابری از دانشگاه تگزاس گردید. زمینه های پژوهشی مورد علاقه ایشان طراحی روسازی، مواد و مصالح روسازی و مدیریت روسازی بوده و در حال حاضر عضو هیئت علمی دانشگاه علم و صنعت ایران است.



Archive of SID