

مقایسه شاخص‌های استاتیکی و دینامیکی مقاومت در برابر تغییر شکل برای سنجش پتانسیل شیارشده‌گی مخلوط‌های آسفالتی گرم حاوی مصالح بازیافتی

امین احمدی، دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران

منصور فخری، دانشیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران

*علیرضا عاملی، مربی، گروه مهندسی عمران، واحد ملارد، دانشگاه آزاد اسلامی، ملارد، تهران، ایران

*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: amelii@gmail.com

دریافت: ۱۳۹۶/۰۳/۱۸ - پذیرش: ۱۳۹۶/۰۹/۱۵

صفحه ۱۲۹-۱۴۵

چکیده

در این تحقیق تاثیر بازیافت دو ماده سرباره فولاد و تراشه آسفالتی درون مخلوط‌های آسفالتی گرم بر مقاومت شیارشده‌گی آنها ارزیابی شد. مجموعاً نه تیپ مخلوط آسفالتی با درصد‌های مختلفی از سرباره فولاد و تراشه آسفالتی ساخته شد و مقاومت شیارشده‌گی آنها از طریق آزمایش‌های خزش استاتیکی، خزش دینامیکی و آزمایش جدید کیم مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد اگر چه افزودن سرباره فولاد منجر به افزایش شاخص‌های مقاومت در برابر تغییر شکل می‌شود اما این افزایش به لحاظ آماری قابل توجه نیست. در نقطه مقابل ثابت شد که افزودن تراشه آسفالتی تاثیر قابل توجهی بر مقاومت شیارشده‌گی مخلوط آسفالتی دارد. افزودن همزمان ۴۰٪ درشت‌دانه سرباره فولاد و ۴۰٪ ریزدانه تراشه آسفالتی به مخلوط آسفالتی گرم به ترتیب ۱۸/۳، ۳۶/۲، ۱۱/۶ و ۱۳/۸ درصد به ترتیب شاخص‌های آزمایش‌های خزش استاتیکی در سطح 100 kPa ، خزش استاتیکی در سطح 150 kPa ، خزش دینامیکی و آزمایش کیم را بهبود بخشید و این مخلوط بهترین عملکرد شیارشده‌گی را در بین مخلوط‌های مورد مطالعه از خود نشان داد. بررسی‌های آماری نشان داد که آزمایش‌های خزش دینامیکی و آزمایش کیم تکرارپذیری بهتری نسبت به سایر آزمون‌ها دارند. همچنین نتایج رتبه‌بندی مخلوط‌ها و مدلسازی رگرسیون خطی نیز نشان دادند که آزمون خزش استاتیکی در سطح 100 kPa برای ارزیابی مقاومت شیارشده‌گی مخلوط‌های مورد مطالعه مناسب نیست، ولی این رتبه‌بندی در سایر آزمون‌ها تا حد زیادی با یکدیگر مطابقت دارد و همبستگی مناسبی نیز بین نتایج آنها وجود دارد.

واژه‌های کلیدی: سرباره فولاد، تراشه آسفالتی، مخلوط آسفالت گرم، شیارشده‌گی، خزش استاتیکی، خزش دینامیکی، آزمایش شیارشده‌گی

کیم، تحلیل واریانس

۱- مقدمه

(Blankendaal et al., 2014; Hassan, 2009; Rubio et al., 2012). در این مخلوط‌ها با کمک تکنولوژی‌هایی از جمله افزودنی‌های آلی، شیمیایی و یا کف قیر ویسکوزیته قیر کاهش

مخلوط‌های آسفالت گرم در اواسط دهه ۹۰ میلادی در اروپا معرفی شدند و به دلیل جذابیت‌های اقتصادی و زیست محیطی به سرعت جای خود را در اروپا و آمریکا بازکردند

یافته (Sengoz and Oylumluoglu, 2013) و نتیجتاً دمای لازم برای تولید و تراکم آسفالت کاهش می‌یابد. به این ترتیب نه تنها مصرف انرژی کاهش می‌یابد، بلکه گازهای گلخانه‌ای (Rogers, 2011) و سمی (Fakhri and Hosseini, 2017) کمتری نیز تولید می‌شود. با این وجود، این مخلوط‌ها نسبت به مخلوط‌های آسفالت داغ تا حدودی پتانسیل شیارشدگی بالاتری دارند (Goh, 2012; Lu and Saleh, 2016; Rashwan, 2012). دلیل این موضوع پیرشدگی کمتر قیر در این مخلوط‌ها به دلیل پایین‌تر بودن دمای تولید و تراکم در آنهاست. برای رفع این نگرانی روش‌های مختلفی وجود دارد که از آن میان می‌توان به افزایش زاویه اصطکاک داخلی سنگدانه‌ها و افزایش سختی قیر اشاره کرد. اولین راهکار با استفاده از سنگدانه‌های تیز گوشه با مقاومت سایشی بالا بدست می‌آید. افزایش سختی قیر نیز از طریق استفاده از قیرهای سفت‌تر و یا افزودن تراشه آسفالتی حاصل می‌شود. سرباره فولاد یکی از محصولات فرعی و دور ریختنی کارخانه‌های تولید فولاد است که میزان تولید آن در اروپا در سال ۲۰۱۲ به ۲۱/۴ میلیون تن رسیده است (Rubio et al., 2012). برخی از کشورها موفق شده‌اند که تقریباً ۱۰۰٪ این محصول با ارزش را در مصارفی همچون تولید بتن و راهسازی بازیافت کنند (Huang et al., 2007). آمار دقیقی از میزان بازیافت این محصول در ایران وجود ندارد ولی مصرف آن که عمدتاً محدود به ساخت زیرسازی راه‌های اطراف کارخانه‌ها بوده است نتوانسته به شکل موثری از حجم بسیار زیاد دپوی سرباره کارخانه‌های تولید فولاد بکاهد. گوشه‌داری و مقاومت سایشی بالای سنگدانه سرباره فولاد باعث شده که این محصول جذابیت زیادی برای بازیافت در لایه‌های غیر چسبنده داشته باشد به گونه‌ای که بیشترین میزان بازیافت سرباره فولاد تاکنون در ساخت لایه‌های غیرچسبنده و خاکریز در روسازی راه و راه آهن و فرودگاه بوده است (Behiry, 2013; Stroup-Gardiner, 2013). همین ویژگی‌های همچنین باعث شده که از این محصول به عنوان گزینه‌ای به منظور بالا بردن توان باربری و اصطکاک سطح رویه‌های آسفالتی نیز استفاده شود. مطالعات گذشته نشان داده

است که سرباره فولاد کوره‌ی قوس الکتریک یک سنگدانه با کیفیت برای ساخت لایه‌های آسفالتی برای کاربرد در لایه‌ی توپکا است (Fakhri and Ahmadi, 2017; Kavussi and Qazizadeh, 2014; Masoudi et al., 2017; Ziaee et al., 2015). با این وجود، پتانسیل افزایش حجم این ماده مهم‌ترین مانع در برابر بازیافت این ماده در مخلوط آسفالتی است. معمولاً در ساختار شیمیایی سرباره فولاد مقادیر قابل توجه آهک و منیزیم آزاد وجود دارد. این ترکیبات در حضور رطوبت هیدراته شده و افزایش حجم پیدا می‌کنند. از این رو معمولاً از استفاده از سرباره‌های تازه تولید شده در تولید مخلوط آسفالتی اجتناب شده و اجازه داده می‌شود که سرباره در معرض رطوبت هوا به مرور و یا از طریق عمل آوری هیدراته شود (Chen et al., 2014). یکی دیگر از موانعی که کاربرد گسترده سرباره فولاد را محدود کرده است، افزایش مصرف قیر در مخلوط آسفالتی به دلیل بافت متخلخل این مصالح است (Kavussi and Qazizadeh, 2014). از همین رو بسیاری از محققان تنها به استفاده از درشت‌دانه سرباره در مخلوط آسفالتی بسنده کرده‌اند (Washington State DOT, 2015). با این وجود حتی در مخلوط‌های آسفالتی ساخته شده با درشت‌دانه سرباره فولاد نیز مصرف قیر به شکل قابل توجهی افزایش می‌یابد. از این رو در مطالعات اقتصادی پروژه‌ها چنانچه آثار این کاربرد بر دوام و هزینه نگهداری دراز مدت روسازی در نظر گرفته نشود، مخلوط‌های حاوی سرباره فولاد گزینه‌ای غیر اقتصادی ارزیابی می‌شود. تراشه آسفالتی از آسیاب کردن رویه آسفالتی پیرشده در حین عملیات بازسازی روسازی‌های آسفالتی تولید می‌شود. این ماده به عنوان نوعی ماده دورریختنی شناخته می‌شود که بالاترین نرخ بازیافت در آمریکا را دارد (Behnia et al., 2011). مهم‌ترین محل بازیافت این ماده نیز لایه‌های خاکریز و غیر چسبنده روسازی‌ها است. به سبب وجود قیر در ترکیب این ماده، بخصوص در بخش ریزدانه آن، تلاش بسیار زیادی برای بازیافت آن در لایه‌های آسفالتی انجام شده است. تحقیقات گذشته نشان داده که مخلوط‌های ساخته شده با این ماده مقاومت بالاتری در برابر شیارشدگی از خود نشان می‌دهند (Al-Qadi et al., 2012; Fakhri and

(Hosseini, 2017; Hill et al., 2012). با وجود تحقیقات فراوانی که بر روی بازیافت هر یک از سرباره فولاد و تراشه آسفالتی در مخلوط آسفالتی شده است. تحقیقات بسیار کمی به بررسی اثر بازیافت تومن این دو ماده بر مقاومت شیارشدگی مخلوط آسفالتی گرم پرداخته اند. از این رو در این تحقیق برای افزایش مقاومت مخلوط‌های آسفالتی گرم در برابر شیارشدگی و در عین حال کنترل مصرف قیر خالص مخلوط، ریزدانه تراشه آسفالتی و درشت‌دانه سرباره فولاد همزمان در مخلوط آسفالتی گرم بازیافت شده و مقاومت در برابر شیارشدگی مخلوط‌های ساخته شده با آنها ارزیابی می‌شود. در ادامه مفهوم شیارشدگی و آزمایش‌های مربوط به سنجش مقاومت مخلوط در برابر این پدیده به شکل اجمالی ارائه می‌شود.

۱-۲-۲- شیارشدگی

شیارشدگی به تغییر شکل پلاستیک محل عبور چرخ در لایه آسفالتی اطلاق می‌شود که مهمترین مود خرابی در جاده‌های پر ترافیک به خصوص در مناطق گرمسیری است. شیارشدگی مخلوط آسفالتی علاوه بر کاهش کیفیت سطح روسازی می‌تواند سر آغاز خرابی‌های دیگری از جمله آسیب‌های رطوبتی نیز باشد (Capitão et al., 2012). چرا که مسیر گود افتاده در سطح روسازی مقداری از آب‌های سطحی را پس از بارندگی در خود نگه می‌دارد و این حضور بلند مدت فرصت جانشینی آب با عناصری از قیر که مسئول چسبندگی به قیر را دارند فراهم می‌آورد (Feng et al., 2010). تا به امروز آزمون و معیارهای بسیاری برای ارزیابی پتانسیل شیارشدگی مخلوط آسفالتی توسعه داده شده است. معیار و آزمون‌های استاتیکی مانند نسبت مارشال و مقاومت کششی غیر مستقیم که گاهاً بدین منظور استفاده می‌شوند ساده هستند، اما از آنجا که در این آزمایش‌ها جهت

اعمال نیرو عمود بر جهت تراکم مخلوط است، استفاده از آن‌ها به معنای در نظر گرفتن رفتاری ایزوتروپیک برای مخلوط آسفالتی است که چنین موضوعی با واقعیت فاصله دارد. از سوی دیگر انجام آزمون‌های دینامیکی مانند چرخ محرک هامبورگ (Fakhri and Hosseini, 2017) و خزش دینامیکی (Nejad et al., 2014) زمان‌بر و گرانبه هستند. از این رو همواره محققان در حال تلاش برای معرفی آزمون‌هایی قابل اعتماد و در عین حال ساده و سریع برای ارزیابی شیارشدگی هستند. در ادامه دو آزمایش استاتیکی کیم و خزش استاتیکی و آزمون خزش دینامیکی به اختصار معرفی می‌شوند.

۱-۲-۱- آزمایش کیم

اخیراً روشی استاتیکی و ساده برای ارزیابی مقاومت مخلوط آسفالتی در برابر تغییر شکل توسط کیم و همکاران توسعه داده شده است (Kim et al., 2004) که در آن یک میله فولادی با گوشه‌هایی گرد و انتهایی تخت با سرعت ۵۰/۸ میلی‌متر بر دقیقه به درون مخلوط آسفالتی رانده شده به گونه‌ای که تغییر شکلی مقرر در آن ایجاد می‌کند که به عقیده توسعه دهندگان این روش با سطح مقطع شیارشدگی واقعی در سطح رویه‌های آسفالتی مطابقت دارد. شکل قالب بارگذاری و میله این آزمایش را نشان می‌دهد.

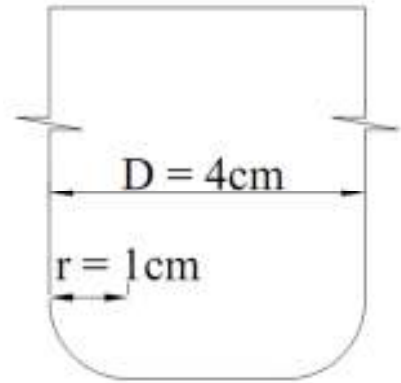
این آزمایش بر روی یک نمونه مارشال که به مدت ۳۰ دقیقه در دمای ۶۰ درجه سانتی‌گراد نگهداری شده انجام می‌شود و نیرو و تغییر شکل متناظر با بار حداکثر برای محاسبه پارامتری موسوم به SD به کار بسته می‌شود. SD در واقع مقاومت مخلوط در برابر تغییر شکل است و مطابق با رابطه ۱ محاسبه می‌شود. شکل نمونه‌ای از نتایج بدست آمده از این آزمایش را به همراه پارامترهای مورد نیاز برای محاسبه SD نشان داده شده است.



ج

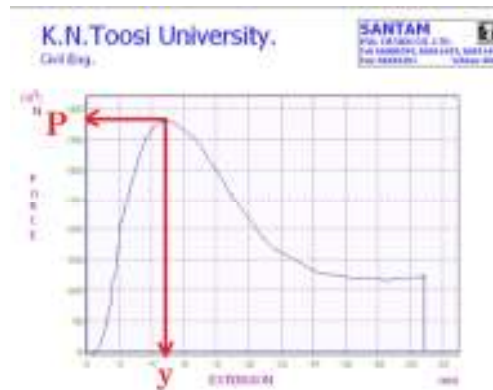


ب



الف

شکل ۱. نمونه و قالب آزمایش مقاومت در برابر تغییر شکل



شکل ۲. تغییرات نیرو و تغییر مکان در آزمایش کیم و مقادیر نیرو و تغییر مکان حداکثر متناظر

$$S_D = \frac{40 P}{\pi [D - 2(r - \sqrt{2ry - y^2})]^2}$$

رابطه ۱

۱-۲-۲- خزش استاتیکی

در این آزمایش نمونه‌های آسفالتی استوانه ای به قطر ۱۰۰ و ارتفاع ۱۴۷ میلیمتر در دمای ۴۵ درجه سانتی گراد تحت بار ثابت ۱۰۰ و ۱۵۰ کیلوپاسکل قرار گرفتند و به مدت ۶۰ دقیقه تغییر مکان نمونه نسبت به زمان به طور پیوسته ثبت شد. برای اطمینان از جایگیری صحیح صفحه بارگذاری با نمونه، یک فشار

که در آن S_D مقاومت در برابر تغییرشکل P (kPa)، بار حداکثر (N) ، قطر سرمیله فرو رونده (سانتی متر)، شعاع انحنا در گوشه تحتانی میله (سانتی متر) و y تغییرشکل عمودی در نمونه متناظر با بار حداکثر (سانتی متر)، می باشد. میله مورد استفاده در این تحقیق دارای قطر ۴ سانتی متر، و شعاع گوشه تحتانی ۱ سانتیمتر است.

ثابت ۱۰ کیلوپاسکالی پیش از شروع بارگذاری به مدت ۵ دقیقه به نمونه اعمال شد. در انتها تغییر مکان پایانی نمونه که توسط یک جفت سنسور سنجش تغییر مکان اندازه‌گیری شده بود گزارش شد.

۱-۲-۳- خزش دینامیکی

آزمایش خزش دینامیکی یک از آزمون‌های متداول و قابل اطمینان برای ارزیابی مقاومت مخلوط در برابر تغییر شکل است. در این آزمون مطابق با استاندارد EN 12697-25، نمونه‌های به ابعاد ۱۰۰×۶۲ میلی‌متر به مدت ۵ دقیقه تحت یک بار ۱۰ کیلوپاسکالی قرار گرفتند. سپس این پیش بار حذف شده و نمونه‌ها تحت یک بار دینامیک ۳۰۰ کیلوپاسکالی با شکل مستطیلی و فرکانس ۰/۵ و زمان استراحت ۱/۵ ثانیه قرار گرفتند. علاوه بر این بار یک بار ثابت تماسی ۵ کیلو پاسگال نیز به منظور اطمینان از عدم جدا شدن سطح بارگذاری از نمونه همزمان به نمونه در کل طول آزمایش اعمال شد. همه نمونه‌ها پیش از آزمایش به مدت ۴ ساعت درون محفظه دمایی در دمای ۴۵ درجه سانتی گراد نگهداری شدند. تغییر مکان از طریق یک جفت سنسور سنجش تغییر مکان به طور پیوسته در طی دو ساعت و یا ۳۶۰۰ سیکل اندازه‌گیری شد. در انتها کرنش عمودی دائمی که از تقسیم تغییر مکان به طول اولیه نمونه محاسبه می‌شود گزارش شد.

مواد و روش‌ها

در این تحقیق از قیر خالص، سنگدانه آهکی، سنگدانه سرباره فولاد کوره قوس الکتریکی و تراشه آسفالت به همراه ساسویت

برای ساخت نمونه‌های آسفالتی استفاده شد. قیر خالص مورد استفاده در این تحقیق دارای درجه نفوذ ۶/۴ میلی‌متر و کشسانی ۱۰۳ (سانتی‌متر)، در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد بود. میزان قیر موجود در ریزدانه تراشه آسفالتی برابر با ۶/۱٪ بود و درجه نفوذ و کشسانی قیر موجود در آن در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد به ترتیب برابر با ۳/۵ میلی‌متر و ۲/۲ (سانتی‌متر)، بود. سنگدانه سرباره فولاد از فولاد مبارکه و سنگدانه طبیعی از معدن اسب چران تهیه شدند که مشخصات فنی آن‌ها به همراه سنگدانه مستخرج از تراشه آسفالتی در جدول یک ملاحظه می‌شود.

۲-۲- طرح اختلاط و آماده سازی نمونه‌ها

دانه‌بندی سنگدانه‌ها در این تحقیق منطبق بر حدود منحنی شماره ۴ نشریه ۲۳۴ انتخاب شد به گونه‌ای که با در نظر گرفتن الگ شماره ۴ به عنوان مرز، نسبت درشت‌دانه به ریزدانه در مخلوط ۶:۴ باشد. سپس در مخلوط‌های مختلف ۲۰ و ۴۰ درصد از بخش درشت‌دانه با سرباره فولاد و ۲۰ و ۴۰ درصد از بخش ریزدانه با تراشه آسفالتی جایگزین شدند. در مجموع ۹ مخلوط با ترکیبات مختلفی از سنگدانه ولی با دانه‌بندی یکسان تهیه شد که ترکیبات آنها به همراه نام اختصاری‌شان در جدول ۲ ملاحظه می‌شود. جدول ۳ دانه‌بندی به کار برده شده در این تحقیق به همراه حدود نشریه ۲۳۴ را نشان می‌دهد که به منظور کاهش متغیرهای و سهولت در تفسیر نتایج در همه مخلوط‌ها ثابت نگاه داشته شد.



شکل ۳. نمونه، صفحات بارگذاری و سنسورهای سنجش تغییر مکان در آزمایش خزش استاتیکی

جدول ۱. مشخصات فنی سنگدانه‌های مورد استفاده در تحقیق

تراشه آسفالتی	سرباره فولاد	سنگدانه آهکی		وزن مخصوص حقیقی (kg/m ³)
		درشت‌دانه	ریزدانه	
ریزدانه	درشت‌دانه	درشت‌دانه	ریزدانه	
۲۴۹۱	۳۰۸۲	۲۶۸۷	۲۵۵۳	
۲/۱	۱/۶	۰/۵	۰/۸	جذب آب (%)
-	۱۷	۲۵		سایش لوس آنجلس (%)
-	۱۰۰	۸۶		وجوه شکسته (دو و یا بیشتر) (%)

جدول ۲. ترکیب سنگدانه‌های مختلف به همراه قیر بهینه مخلوط‌های مورد مطالعه (%)

S4R4	S4R2	S2R4	S2R2	R4	R2	S4	S2	C	
۰	۰	۲۰	۲۰	۴۰	۴۰	۰	۲۰	۴۰	درشت‌دانه آهکی
۲۰	۴۰	۲۰	۴۰	۲۰	۴۰	۶۰	۶۰	۶۰	ریزدانه آهکی
۴۰	۴۰	۲۰	۲۰	۰	۰	۴۰	۲۰	۰	درشت‌دانه سرباره‌ای
۴۰	۲۰	۴۰	۲۰	۴۰	۲۰	۰	۰	۰	ریزدانه تراشه آسفالتی
۳/۳۵	۴/۵۸	۳/۱۴	۴/۳۷	۲/۶۳	۳/۸۷	۵/۸	۵/۶	۵/۱	قیر خالص مصرفی (%)

جدول ۳. دانه‌بندی شماره ۴ نشریه ۲۳۴ به همراه دانه‌بندی منتخب در این تحقیق

اندازه الک (mm)						منحنی شماره ۴ نشریه ۲۳۴
۰/۰۷۵	۰/۳	۲/۳۶	۴/۷۵	۱۲/۵	۱۹	
۲-۱۰	۵-۲۱	۲۸-۵۸	۴۴-۷۴	۹۰-۱۰۰	۹۰-۱۰۰	دانه بندی منتخب
۴	۱۱	۴۰	۶۰	۹۵	۱۰۰	

مخلوط به روش رایس محاسبه شده بود فضای خالی نمونه محاسبه شد و قیر متناظر با فضای خالی ۴٪ به عنوان قیر بهینه بدست آمد. قیر بهینه مخلوط‌های حاوی تراشه آسفالتی با در نظر گرفتن میزانی از قیر تراشه آسفالتی که با قیر خالص ترکیب می‌شود با استفاده از رابطه ۲ (Nejad et al., 2014) بدست آمد. میزان قیر خالص مصرفی در هر یک از مخلوط‌ها در جدول ۲ ملاحظه می‌شود.

قیر بهینه در مخلوط‌های کنترل (C)، و مخلوط‌های حاوی ۲۰ و ۴۰ درصد سرباره (S4, S2) به روش استاندارد مارشال (ASTM D-6927-07) محاسبه شد. در این روش نمونه‌های استوانه‌ای با درصدهای مختلف قیر با ۷۵ ضربه چکش مارشال به هر دو سمت نمونه متراکم شدند، سپس با مقایسه وزن مخصوص نمونه‌ها با وزن مخصوص حداکثری نظری که برای هر تیپ

رابطه ۲

$$P_{nb} = \frac{(100^2 - rP_{sb})P_b}{100(100 - P_{sb})} - \frac{(100 - r)P_{sb}}{100 - P_{sb}}$$

۳- نتایج

۳-۱- تحلیل نتایج آزمایش کیم

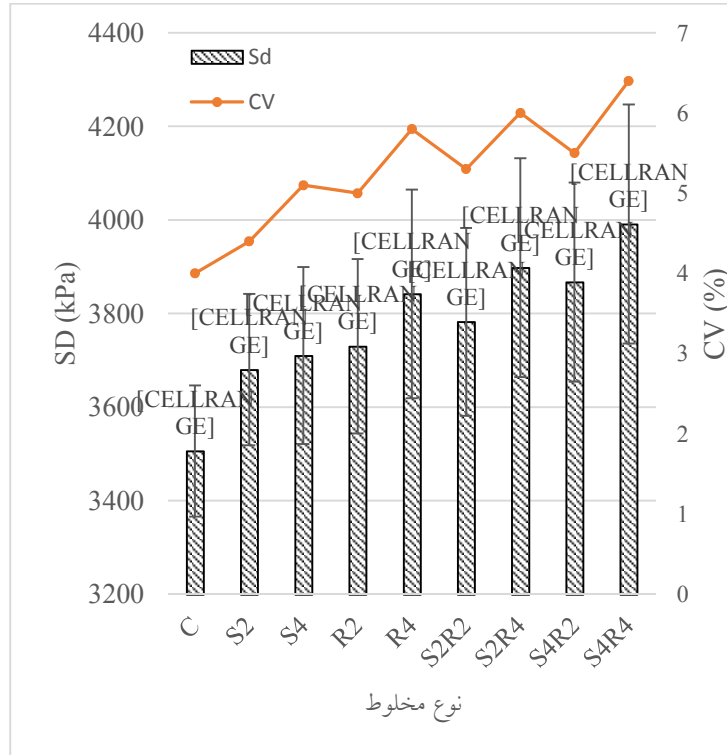
شکل مقادیر میانگین و انحراف معیار استاندارد پارامتر SD را برای مخلوط‌های مختلف نشان می‌دهد. از آنجایی که انحراف معیار مقداری مطلق است به منظور سهولت در مقایسه بزرگای تغییرات در نتایج از پارامتر ضریب تغییرات نیز استفاده شده است که مقدار آن از تقسیم مقدار انحراف معیار استاندارد به میانگین داده‌ها ضربدر صد بدست می‌آید. ضریب تغییرات در این آزمایش با افزوده شدن مصالح تراشه آسفالتی و سرباره فولاد افزایش پیدا کرده است. این افزایش ناشی از یک دست نبودن خواص این مصالح بازیافتی است. با این وجود این پارامتر در این آزمایش کمتر از ۶/۵٪ است که این موضوع حکایت از تکرار پذیری مناسب این آزمایش دارد. نتایج نشان می‌دهد که افزودن سرباره فولاد و تراشه آسفالتی منجر به افزایش پارامتر SD

که در این رابطه P_{nb} درصد قیر خالصی است که باید به مخلوط اضافه شود، r درصد سنگدانه‌های طبیعی و سرباره‌ای مخلوط و P_{sb} درصد قیر موجود در تراشه آسفالتی و P_b میزان قیر بهینه قیر مخلوط پایه است.

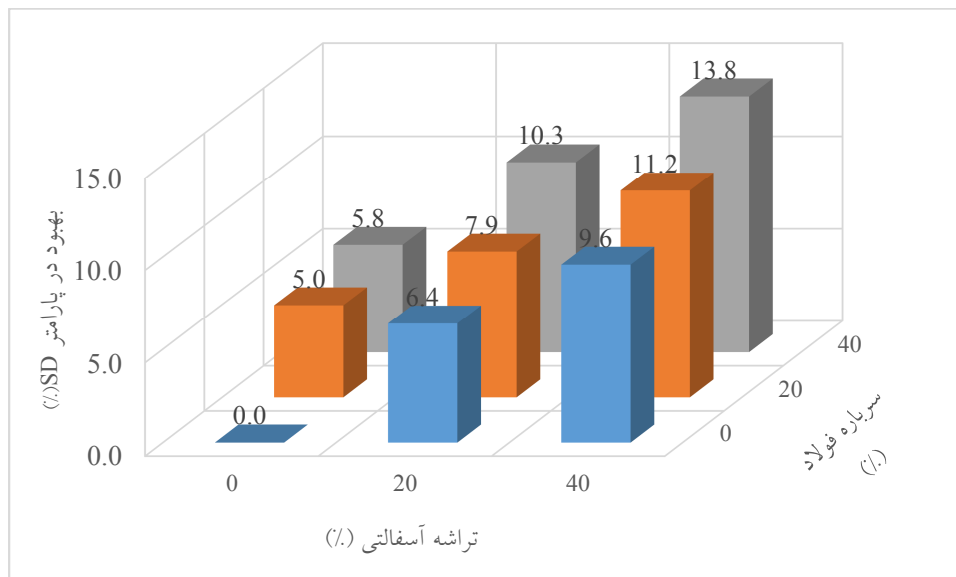
برای آزمایش‌های شیارشدگی مجموعاً ۶۷ نمونه ژیراتوری به ابعاد 155×100 میلیمتر به همراه ۲۷ نمونه مارشال به ابعاد 63×100 میلیمتر ساخته شد. ارتفاع نمونه‌ها در آزمایش خزش استاتیکی و دینامیکی به ترتیب ۱۴۷ و ۶۲ میلیمتر بود که از نمونه‌های ژیراتوری استخراج شدند. نمونه‌های مارشال نیز برای انجام آزمایش کیم استفاده شدند. به این ترتیب برای هر تیپ مخلوط در هر یک از آزمایش‌ها ۳ نمونه آسفالتی تهیه شد و مجموعاً ۱۰۸ نمونه آسفالتی مورد آزمایش قرار گرفت.

متعلق به مخلوطی است که همزمان ۴۰٪ درشت‌دانه سرباره فولاد و ۴۰٪ ریزدانه تراشه آسفالتی در آن بازیافت شده است که مقدار بهبود پارامتر SD در آن ۱۳/۸٪ می‌باشد.

می‌شود. همانگونه که در شکل ملاحظه می‌شود با افزوده شدن ۲۰ و ۴۰ درصد سرباره فولاد مقدار این پارامتر ۵ و ۸/۷ درصد و به ازای افزوده شدن همین مقادیر از تراشه آسفالتی به ترتیب ۶/۴ و ۹/۶ درصد بهبود پیدا می‌کند. بهترین عملکرد از این حیث



شکل ۴. میانگین، انحراف معیار، ضریب تغییرات پارامتر SD به همراه رتبه‌بندی مخلوط‌های آسفالتی مورد مطالعه

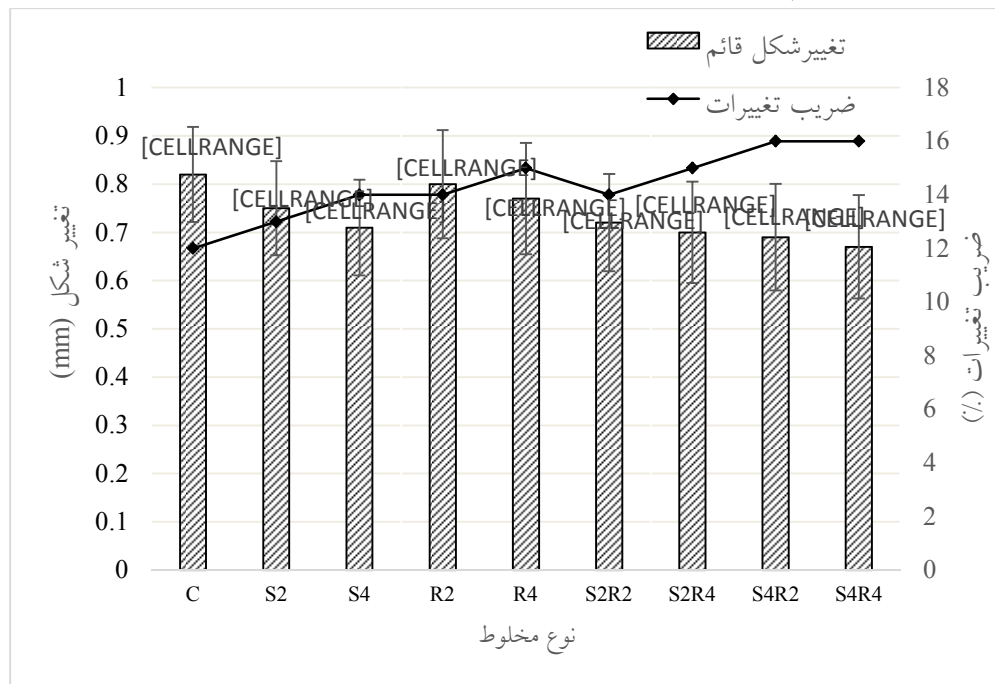


شکل ۵. تغییرات پارامتر SD به ازای افزودن مقادیر مختلف سرباره فولاد و یا تراشه آسفالتی

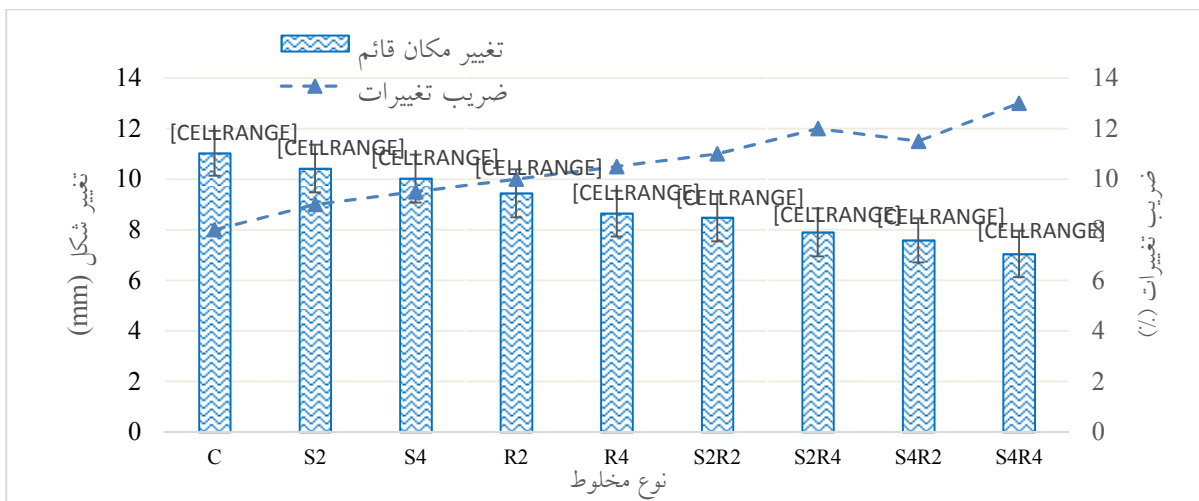
۲-۳- تحلیل نتایج آزمایش خزش استاتیکی

پارامترهای مختلفی برای تفسیر نتایج آزمایش خزش استاتیکی به کار بسته می‌شوند. از آن جمله می‌توان به نرمی خزشی، کرنش و یا تغییر مکان انتهای آزمایش اشاره کرد. در این تحقیق، با توجه به یکسان بودن ارتفاع نمونه‌ها، تغییر مکان نمونه در انتهای آزمایش برای مقایسه رفتار مخلوط‌های مورد مطالعه به کار گرفته شد. شکل‌های ۶ و ۷ میزان تغییر شکل در نمونه‌های آسفالتی به همراه رتبه‌بندی مخلوط‌ها به ترتیب در سطوح تنش ۱۰۰ و ۱۵۰ کیلوپاسکال را نشان می‌دهند. همانگونه که ملاحظه می‌شود در هر دو سطح تنش افزودن سرباره فولاد و تراشه آسفالتی منجر به کاهش تغییر شکل نمونه در انتهای آزمایش می‌شود. با این وجود، در این آزمایش رتبه‌بندی مقاومت نمونه‌های آسفالتی در برابر شیارشدگی در در سطوح مختلف تنش با یکدیگر متفاوت است. علت این تفاوت را می‌توان در شکل‌های ۸ و ۹ جستجو کرد. در این اشکال میانگین تغییرات تغییر مکان عمودی نمونه‌ها (سه نمونه) در طول آزمایش نشان داده شده است. به طور کلی این تغییرات را می‌توان به سه ناحیه تقسیم کرد. در ناحیه اول نمونه

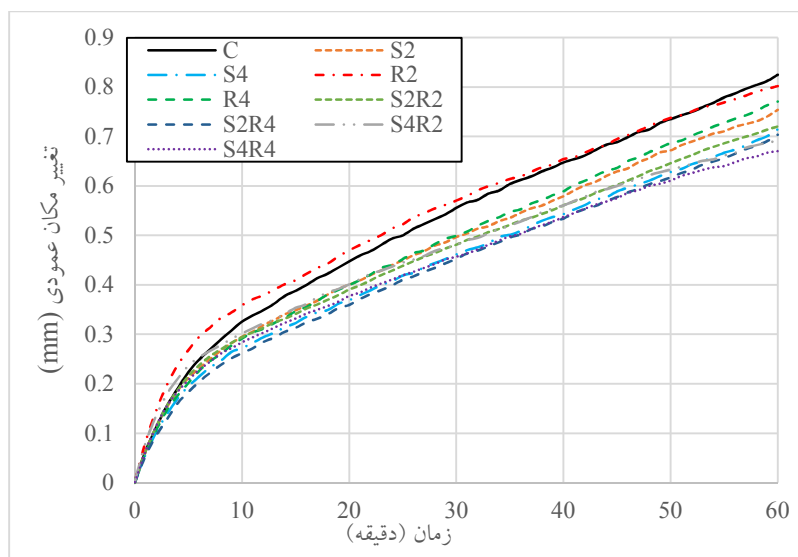
به سرعت تغییر شکل می‌دهد در این ناحیه سنگدانه‌ها تغییر وضعیت می‌دهند، در ناحیه دوم تغییرات تغییر مکان تقریباً پایدار شده و با شیبی ثابت افزایش می‌یابد، این وضعیت احتمالاً ناشی از جاگیری مجدد سنگدانه‌ها و درگیری بین آنها و تکیه کردن آنها به یکدیگر است، و نهایتاً در ناحیه سوم دوباره تغییر مکان با سرعت زیادی افزایش می‌یابد که منجر به اضمحلال کامل نمونه آسفالتی می‌شود. همانگونه که در شکل ملاحظه می‌شود، در سطح تنش ۱۰۰ kPa به دلیل ناکافی بودن سطح تنش و یا زمان بارگذاری تغییر مکان‌ها وارد ناحیه سوم نمی‌شوند. که شاید همین امر منجر به ایجاد اختلاف بین رتبه‌بندی نمونه‌ها در سطوح مختلف تنش باشد. نکته جالب توجه دیگر این است که ضریب تغییرات در آزمایش با سطح تنش ۱۰۰ kPa بیشتر از مقادیر متناظر آن در سطح تنش ۱۵۰ kPa است که این موضوع نشان می‌دهد که نتایج این آزمایش زمانی که نمونه وارد ناحیه سوم می‌شود قابل اعتمادتر است.



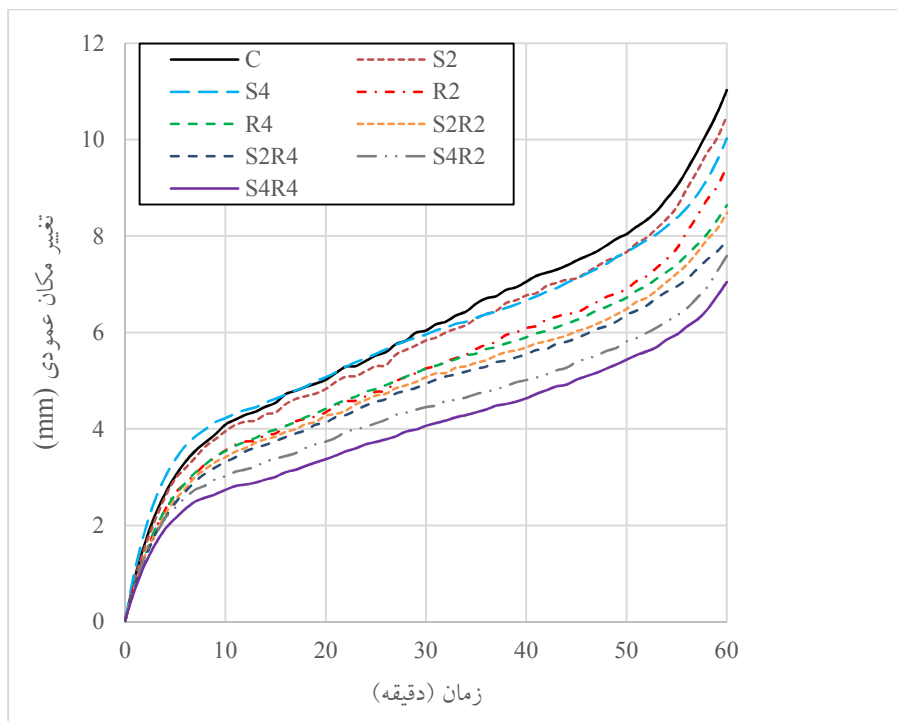
شکل ۶. تغییر مکان قائم به همراه انحراف معیار و ضریب تغییرات در پایان آزمایش خزش استاتیکی در سطح تنش ۱۰۰ kPa



شکل ۷. تغییر مکان قائم به همراه انحراف معیار و ضریب تغییرات در پایان آزمایش خزش استاتیکی در سطح تنش 150 kPa



شکل ۸. تغییرات تغییر مکان قائم در طول زمان آزمایش خزش استاتیکی در سطح تنش 100 kPa



شکل ۹. تغییرات تغییر مکان قائم در طول زمان آزمایش خزش استاتیکی در سطح تنش 150 kPa

این آزمایش دارد. که در مطالعات آزمایشگاهی مخلوط‌های آسفالتی به طور متداولی ضریب تغییرات زیر 20% قابل قبول ارزیابی می‌شود (Carvajal Munoz et al., 2015).

۳-۴- ارزیابی آماری

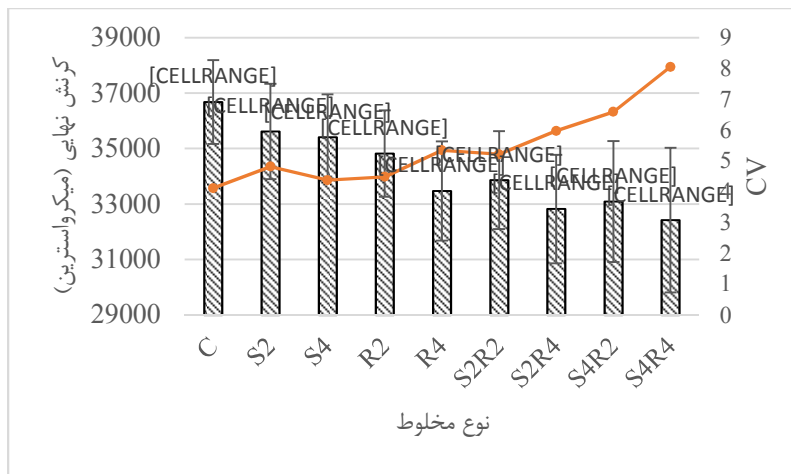
آزمون تحلیل واریانس و یا آنوا یکی از ابزارهای مهم در بررسی نتایج آزمایشگاهی است. در این آزمون میانگین گروه‌های مختلف با توجه به تغییرات واریانس در آنها و با در نظر گرفتن یک سطح اطمینان با یکدیگر مقایسه می‌شوند. به این ترتیب کاملاً محتمل است که با وجودیکه میانگین یک گروه از گروه دیگر بزرگتر باشد ولی به دلیل تغییرات زیاد در واریانس گروه اول، این تفاوت در یک سطح اطمینان مشخص به لحاظ آماری مهم قلمداد نشود. در این تحقیق برای اجرای آزمون آنوا از نرم افزار IBM SPSS بهره جسته شده است. در این آزمون چنانچه سطح معناداری کمتر از 0.05 و یا 0.1 باشد آن فاکتور به ترتیب در سطح معناداری 5 و 10 درصد تاثیری مهم بر پارامتر وابسته

۳-۳ تحلیل نتایج آزمایش خزش دینامیکی

شکل میانگین انحراف معیار و ضریب تغییرات کرنش نهایی در آزمایش خزش دینامیکی را به همراه رتبه‌بندی مخلوط‌ها نشان می‌دهد. همانگونه که انتظار می‌رفت در این آزمایش نیز افزودن تراشه آسفالتی و سرباره فولاد منجر به افزایش ظرفیت باربری مخلوط و نتیجتاً کاهش کرنش نهایی نمونه شده است. همانند آزمایش‌های خزش استاتیکی و آزمایش کیم در این آزمایش نیز بهترین عملکرد متعلق به مخلوط S4R4 می‌باشد که حاوی 40% درشت‌دانه سرباره فولاد و 40% ریزدانه تراشه آسفالتی است که کرنش نهایی در آن $11/6\%$ نسبت به مخلوط کنترل کمتر است. این نتایج با نتایج بدست آمده از آزمایش‌های مقاومت در برابر تغییر شکل و خزش استاتیکی مطابقت دارد. همچنین افزودن این دو ماده دور ریختنی منجر به افزایش ضریب تغییرات و یا افزایش پراکندگی نتایج شده است. با این وجود این پارامتر برای کلیه مخلوط‌های آسفالتی مورد مطالعه کمتر از 8% است که از این حیث مقدار نسبتاً مطلوبی است و دلالت بر تکرارپذیری بالای

دارد. لازم به ذکر است همسانی واریانس‌ها و توزیع تقریباً نرمال داده‌های متغیر وابسته از فروض مهم این آزمون است. فرض همسانی واریانس بدین معناست که می‌بایست واریانس داده‌های متغیر وابسته تقریباً یکسان باشند که سنجش این موضوع از طریق آزمون لونز انجام می‌شود، همانگونه که در **جدول ۴** ملاحظه می‌شود سطح معناداری در این آزمون برای هر چهار متغیر وابسته بزرگتر از ۰/۰۵ است بدین ترتیب می‌توان نتیجه گرفت که اختلاف قابل ملاحظه‌ای بین واریانس آنها وجود ندارد و این فرض برقرار است. برای بازرسی نرمال بودن توزیع داده‌های متغیر وابسته در این تحقیق میزان چولگی و کشیدگی داده‌ها مورد توجه قرار گرفت. چولگی یک توزیع ملاکی از متقارن بودن

توزیع و کشیدگی ملاکی از قله‌مندی و یا تیزی اوج توزیع است. به طور کلی چنانچه مقادیر این دو شاخص در بازه ۲- تا ۲ باشد می‌توان آن توزیع را نزدیک به نرمال قلمداد کرد. اما در پایان برای اطمینان از نرمال بودن داده‌ها باید از آزمون شاپیرو-ویلک کمک گرفت، چنانچه سطح معناداری در این آزمون نیز بیشتر از ۰/۰۵ باشد با اطمینان بالایی می‌توان ادعا کرد که توزیع داده‌ها نرمال است. مقادیر دو پارامتر چولگی و کشیدگی و سطح معناداری آزمون شاپیرو-ویلک در جدول ۴ نشان داده شده که با توجه به توضیحات ارائه شده حکایت از نرمال بودن توزیع هر ۴ متغیر وابسته دارند. بنابراین دو فرض مهم برای انجام آزمون تحلیل واریانس برقرار است.



شکل ۱۰. میانگین و ضریب تغییرات کرنش نهایی در آزمایش خزش دینامیکی پس از ۳۶۰۰ سیکل

جدول ۴. نتایج آزمون آماری برقراری فروض آزمون تحلیل واریانس

مقاومت در برابر شیارشدگی	تغییر شکل استاتیکی ۱۰۰ kPa	تغییر شکل استاتیکی ۱۵۰ kPa	کرنش در آزمون خزش دینامیکی
معناداری (لونز)	۰/۹۶۷	۱/۰۰۰	۰/۹۸۷
چولگی	۰/۴۳۳	۰/۴۱۵	-۰/۲۲
کشیدگی	-۰/۱۹۴	-۰/۸۱۸	-۰/۶۱
معناداری (شاپیرو-ویلک)	۰/۷۳۳	۰/۱۹۵	۰/۷۳۸

جدول ۵ نتایج آزمون دو طرفه تحلیل واریانس را که برای بررسی اهمیت فاکتورهای سرباره فولاد و تراشه آسفالتی بر پارامترهای شیارشدگی انجام شده است را نشان می‌دهد. همانگونه که ملاحظه می‌شود پارمتر تغییرشکل در آزمون خزش استاتیکی در سطح ۱۰۰ kPa از هیچ یک از دو فاکتور سرباره فولاد و تراشه آسفالتی تاثیر مهمی نپذیرفته است. دلیل این موضوع ناکافی بودن سطح تنش در این آزمون است چرا که در این سطح از تنش هیچ یک از نمونه‌ها وارد مرحله سوم تغییر شکل نشدند و لذا این آزمون نمی‌تواند نقش افزودن این مصالح دورریختنی را بر مقاومت شیارشدگی بر ملا سازد. با کنار گذاشتن این پارمتر از تحلیل، برخلاف آنچه تصور می‌شد نتایج نشان می‌دهد که افزودن سرباره فولاد تاثیر مهمی بر پارامترهای مقاومت در برابر شیارشدگی (SD)، و کرنش در آزمون خزش دینامیکی ندارد (مقادیر معناداری بزرگتر از ۰/۰۵ هستند). شاید دلیل این

موضوع پراکندگی زیاد نتایج بدست آمده از مخلوط‌های حاوی این مصالح باشد. مقادیر ضریب تغییرات در اشکال ۴ و ۱۰ نیز موید این موضوع است. با این وجود افزودن تراشه آسفالتی نقشی تعیین کننده بر همه شاخص‌های مقاومت شیارشدگی (بجز تغییر شکل در خزش استاتیکی در سطح ۱۰۰ kPa) دارد. همچنین نتایج نشان می‌دهد که دو فاکتور سرباره فولاد و تراشه آسفالتی در هیچ یک از شاخص‌های مقاومت شیارشدگی برهم‌کنشی ندارند. دلیل این موضوع را این‌گونه می‌توان توضیح داد که مکانیزم افزایش مقاومت تغییر شکل مخلوط در اثر افزودن شدن این ماده متفاوت است. سرباره فولاد از طریق بالابردن ضریب اصطکاک داخلی سنگدانه‌ها و تراشه آسفالتی از طریق بالابردن سختی قیر مخلوط منجر به افزایش توان مخلوط در برابر شیارشدگی می‌شوند.

جدول ۵. نتایج آزمون تحلیل واریانس برای بررسی معناداری اثر افزودن تراشه آسفالت و سرباره فولاد بر شاخص‌های مقاومت در برابر شیارشدگی

فاکتور	آزمون کیم (SD)		
	تغییر شکل استاتیکی ۱۰۰ kPa	تغییر شکل استاتیکی ۱۵۰ kPa	کرنش در خزش دینامیکی
سرباره فولاد	۰/۳۳۵ (م)	۰/۲۳ (غ.م)	۰/۳۶۴ (غ.م)
تراشه آسفالتی	۰/۰۰۰ (م)	۰/۷۵ (غ.م)	۰/۰۹۳ (م*)
تراشه × فولاد	۰/۹۶۷ (غ.م)	۰/۱۰۰ (غ.م)	۰/۹۹۱ (غ.م)

*م: مهم در سطح معناداری ۰/۱

م: مهم در سطح معناداری ۰/۰۵

غ.م: غیر مهم

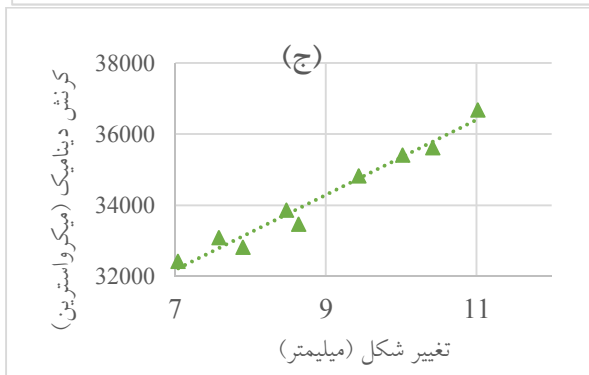
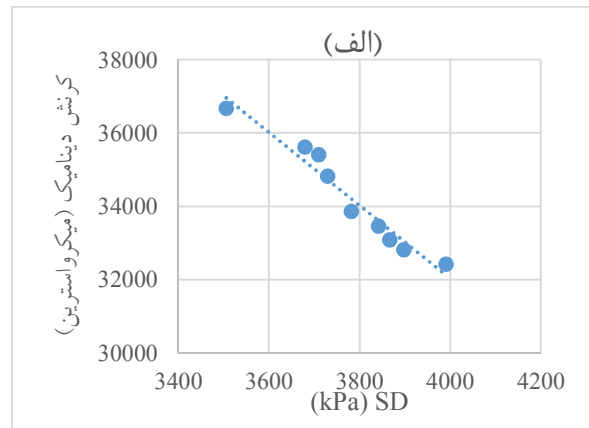
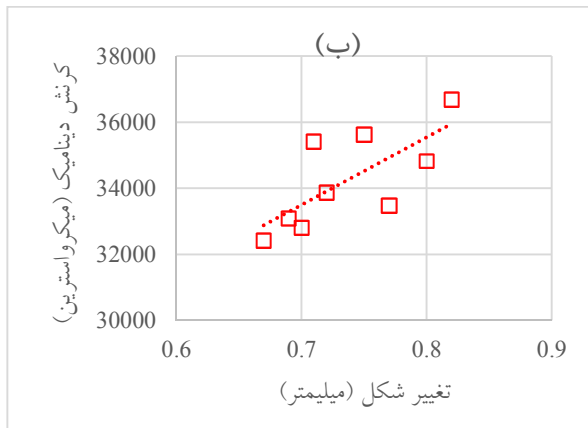
جدول ۶. روابط رگرسیون خطی بین کرنش نهایی خزش دینامیکی با شاخص‌های استاتیکی

خزش دینامیک و تغییر شکل استاتیکی در ۱۵۰ kPa	خزش دینامیک و تغییر شکل استاتیکی در ۱۰۰ kPa	خزش دینامیک و SD	رابطه
$St = 1052.8 df_{150} + 24820$	$St = 20499 df_{100} + 19140$	$St = -9.955 SD + 71856$	ضریب هم بستگی (R^2)
۹۶/۸	۵۲/۷	۹۵/۱	d
۱/۹۸	۲/۲۵	۱/۶۳	

St: کرنش در آزمون خزش دینامیکی

df: تغییر شکل در آزمون خزش استاتیکی

SD: مقاومت در برابر تغییر شکل در آزمون کیم



شکل ۱۱. رابطه بین کرنش در آزمون خزش دینامیکی و الف) SD در آزمون کیم ب) تغییر شکل در خزش استاتیکی (100 kPa) ج) تغییر شکل در خزش استاتیکی (150 kPa)

۴- نتیجه گیری

در این تحقیق نه تیپ مخلوط آسفالتی حاوی درصدهای مختلفی از سرباره فولاد و تراشه آسفالتی آماده شد و مقاومت آنها در برابر شیارشدگی مورد ارزیابی قرار گرفت. به این منظور نمونه‌ها تحت آزمایش جدید کیم، خزش استاتیکی و خزش دینامیکی قرار گرفتند و نتایج آنها به شکل آماری با یکدیگر مقایسه شد. نتایج نشان داد که مخلوط‌های حاوی سرباره فولاد و تراشه آسفالتی و بخصوص مخلوط‌هایی که حاوی هر دوی این مواد هستند بهبود چشمگیری در مقاومت در برابر شیارشدگی نسبت به مخلوط‌های کنترل از خود نشان می‌دهند که می‌توان ضعف احتمالی مخلوط‌های آسفالتی گرم در برابر شیارشدگی را جبران کند. با این وجود تحقیقات بیشتر برای مشخص کردن سایر ویژگی‌های این مخلوط‌ها به خصوص خواص خستگی و ترک خوردگی آنها باید در آینده انجام شود. به شکل خلاصه نتایج زیر در این تحقیق به دست آمد:

۱- افزودن سرباره فولاد به مخلوط‌های آسفالتی گرم منجر به افزایش مقاومت در برابر شیارشدگی شد، اما این افزایش به لحاظ آماری فقط در آزمون خزش استاتیکی در سطح ۱۵۰ kPa کیلوپاسکال مهم ارزیابی شد. در نقطه مقابل افزودن تراشه آسفالتی منجر به افزایش چشمگیر در مقاومت مخلوط در برابر شیارشدگی شد که به لحاظ آماری در همه شاخص‌ها مهم ارزیابی شد.

۲- بازیافت همزمان ۴۰٪ سرباره فولاد و ۴۰٪ تراشه آسفالتی در مخلوط آسفالتی گرم منجر به بیشترین بهبود در مقاومت شیارشدگی مخلوط شد به گونه‌ای که شاخص‌های SD، تغییرشکل در خزش استاتیکی ۱۰۰ kPa، تغییرشکل در خزش استاتیکی ۱۵۰ kPa و کرنش در آزمون خزش دینامیکی به ترتیب ۱۳/۸، ۱۸/۳، ۳۶/۲ و ۱۱/۶ درصد بهبود پیدا کردند.

۳- با افزایش مقادیر سرباره فولاد و تراشه آسفالتی در مخلوط‌های آسفالتی پراکنده‌گی نتایج در همه آزمایش‌ها

بیشتر شد. این افزایش به دلیل یکدست نبودن خواص این مصالح است. کمترین پراکنده‌گی نتایج به ترتیب متعلق به آزمون‌های کیم، خزش دینامیکی، خزش استاتیکی ۱۵۰ kPa بود و آزمایش خزش استاتیکی در سطح تنش ۱۰۰ kPa بیشترین پراکنده‌گی در نتایج را از خود نشان داد.

۴- آزمایش‌های کیم و خزش استاتیکی در سطح ۱۵۰ کیلو پاسکال نزدیک‌ترین رتبه‌بندی مخلوط‌های آسفالتی و بهترین همبستگی در مدلسازی خطی به رتبه بندی آزمون خزش دینامیکی را داشتند. در نقطه مقابل آزمون خزش استاتیکی رتبه‌بندی کاملاً متفاوتی از این آزمون ارائه کرد.

۵- مراجع

-Al-Qadi I. L, Aurangzeb Q, Carpenter S H, Pine W J, Trepanier J, (2012), "Impact of high RAP contents on structural and performance properties of asphalt mixtures", Springfield, IL: Illinois Center for Transportation.

-ASTM D-6927-07 "Standard test method for Marshall Stability and flow of bituminous mixtures".

-Behiry, A. E A E-M. (2013), "Evaluation of steel slag and crushed limestone mixtures as subbase material in flexible pavement". Ain Shams Engineering Journal 4(1): pp.43-53.

-Behnia B., Dave E., Ahmed S, Buttlar W. ,Reis H. (2011), "Effects of recycled asphalt pavement amounts on low-temperature cracking performance of asphalt mixtures using acoustic emissions". Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board(2208): pp.64-71.

-Blankendaal T., Schuur P., Voordijk H. (2014), "Reducing the environmental impact of concrete and asphalt: a scenario approach". Journal of cleaner production pp.6627-36.

economic perspective". Louisiana University, Civil Engineering Class.

-Hill B., Behnia, B., Buttlar W. G., Reis, H. (2012), "Evaluation of warm mix asphalt mixtures containing reclaimed asphalt pavement through mechanical performance tests and an acoustic emission approach. J. Mater. Civ. Eng. 25(12): pp.1887-1897.

-Huang, Y., Bird, R. N., Heidrich, O., (2007), "A review of the use of recycled solid waste materials in asphalt pavements". Resources, Conservation and Recycling 52(1): pp.58-73.

-Kavussi A., Qazizadeh M. J. (2014), "Fatigue characterization of asphalt mixes containing electric arc furnace (EAF) steel slag subjected to long term aging". Construction and Building Materials pp.72158-166, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.08.052>.

-Kim K. W., Doh. Y. S., Amrikhanian S. N., (2004), "Feasibility of deformation strength for estimation of rut resistance of asphalt concrete". Road materials and pavement design, pp.302-322.

-Lu D X, Saleh, M. (2016), "Laboratory evaluation of warm mix asphalt incorporating high RAP proportion by using evotherm and sylvaroad additives". Construction and Building Materials pp.114580-587. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.03.200>.

-Masoudi S., Abtahi, S. M., Goli A., (2017), "Evaluation of electric arc furnace steel slag coarse aggregate in warm mix asphalt subjected to long-term aging. Construction and Building Materials 135260-266, <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.12.177>.

-Nejad F. M., Azarhoosh A., Hamed G. H., Roshani, H. (2014), "Rutting performance prediction of warm mix asphalt containing reclaimed asphalt pavements". Road Materials and Pavement Design 15(1): pp.207-219,

-Capitão S., Picado-Santos L., Martinho F., (2012), "Pavement engineering materials: Review on the use of warm-mix asphalt". Construction and Building Materials 361016-1024.

-Carvajal Munoz J. S., Kaseer F., Arambula E., Epps Martin A. (2015), "Use of the Resilient Modulus Test to Characterize Asphalt Mixtures with Recycled Materials and Recycling Agents". Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board(2506): pp.45-53, <http://dx.doi.org/10.3141/2506-05>.

-Chen Z, Xie J, Xiao Y, Chen J, Wu, S. (2014), Characteristics of bonding behavior between basic oxygen furnace slag and asphalt binder. Construction and Building Materials pp.6460-6466.

-Fakhri M, Ahmadi A (2017), "Recycling of RAP and steel slag aggregates into the warm mix asphalt: A performance evaluation". Construction and Building Materials 147630-638. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.04.117>.

-Fakhri M, Hosseini S A (2017), "Laboratory evaluation of rutting and moisture damage resistance of glass fiber modified warm mix asphalt incorporating high RAP proportion". Construction and Building Materials pp.134626-134640.

-Feng D., Yi J., Wang D., Chen L., (2010), "Impact of salt and freeze-thaw cycles on performance of asphalt mixtures in coastal frozen region of China". Cold Regions Science and Technology 62(1): pp.34-41, <http://dx.doi.org/10.1016/j.coldregions.2010.02.002>.

-Goh S. W., (2012), "Development and improvement of warm-mix asphalt technology". Michigan Technological University.

-Hassan M. (2009), "Life-cycle assessment of warm-mix asphalt: an environmental and

mix asphalt additives prepared with different penetration grades bitumen". *Construction and Building Materials*, pp.45173-45183.

-Stroup-Gardiner M., (2013), "Recycled materials and byproducts in highway applications". Transportation Research Board.

-Washington State DOT, (2015), "Use of steel slag aggregate in pavements". Construction Division Pavements Office, Washington.

-Ziaee S A., Kavussi A., Jalili Qazizadeh M., Mohammadzadeh Moghadam A., (2015), "Evaluation of Long Term Ageing of Asphalt Mixtures Containing EAF and BOF Steel Slags". *International Journal of Transportation Engineering* 2(3): pp.245-265.

<http://dx.doi.org/10.1080/14680629.2013.868820>.

Rashwan, M. H. ,(2012), "Characterization of Warm Mix Asphalt (WMA), "performance in different asphalt applications". Iowa State University.

-Rogers W, (2011), "Influence of warm mix additives upon high RAP asphalt mixes". Clemson University.

-Rubio M. C., Martínez G, Baena L., Moreno, F. (2012), "Warm mix asphalt: an overview. *Journal of Cleaner Production*. pp.2476-84.

-Sengoz B., Oylumluoglu J., (2013), "Utilization of recycled asphalt concrete with different warm

