

## بررسی مکانیکی اثر کاربرد ذرات لاستیک در قیر

امین طائرین (نویسنده مسئول)، دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران

سید مهدی ابطی، دانشیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران

بهروز کوشا، استادیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران

سید مهدی حجازی، استادیار، دانشکده مهندسی نساجی، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران

E-mail: a.taerian@cv.iut.ac.ir

دریافت: ۱۳۹۲/۰۵/۰۴ پذیرش: ۱۳۹۳/۰۷/۰۱

### چکیده:

این مقاله به بررسی نمونه‌های قیری اصلاح‌شده توسط پودر لاستیک بازیافتی و پودر لاستیک اصلاح‌شده، می‌پردازد. در این راستا، آزمون ابداعی نیروی خروج جهت اندازه‌گیری و مقایسه نیروی برشی لایه‌ای بین قیر (خالص و اصلاح‌شده) و سنگدانه، طراحی و مورد استفاده قرار گرفت. این آزمایش از طریق ایجاد تغییراتی در دستگاه کشش اینسترون صورت پذیرفت. مطابق طرح آزمایشها، تأثیر مقدار ذرات لاستیک، اندازه ذرات، دمای اختلاط، زمان اختلاط و نوع سنگدانه‌های مصرفی (آهکی و سرباره‌ای)، با استفاده از نیروی خروج مورد بررسی قرار گرفت. سپس شرایط بهینه جهت عمل‌آوری قیر اصلاح‌شده با پودر لاستیک به دست می‌آید. در ادامه برای برآورد عملکرد مخلوط آسفالت لاستیکی با استفاده از قیر، آزمایش رثومتر برش دینامیکی انجام و دمای بالای عملکردی آسفالت برآورد گردید. نتایج مطالعات و آزمایشها حاکی از آن است که استفاده از پودر لاستیک به عنوان اصلاح‌کننده در قیر علاوه بر اینکه از نقطه نظر زیست محیطی مطلوب است، از نقطه نظر فنی و عملکردی بسیار مناسب و مطلوب خواهد بود.

واژه‌های کلیدی: قیر، قیر لاستیکی، خرده لاستیک، پودر لاستیک اصلاح‌شده، نیروی خروج، آزمون رثومتر برش دینامیکی

## ۱. مقدمه

به بیان دیگر هر لاستیکی که دور انداخته می‌شود، یک تهدید برای سلامتی جامعه و محیط زیست به شمار می‌آید [Shalaby and Khan, 2005]. از آن‌جا که این مواد برای از بین رفتن در طبیعت به زمانی در حدود ۶۰۰۰ سال احتیاج دارند، بازیافت آنها بسیار مورد توجه جوامع قرار گرفته است [Francisco et al. 2012]. لاستیک فرسوده تولید شده در آمریکا و کانادا در حدود یک حلقه به ازاء هر نفر در سال تخمین زده می‌شود [Shalaby and Khan, 2005]. تقریباً ۲۸۵ میلیون حلقه لاستیک در سال در آمریکا اسقاط می‌گردد [Francisco et al. 2012].

از طرف دیگر از آن‌جا که روسازی تأثیر اساسی بر روی اقتصاد یک جامعه دارد، باید دارای طول عمر طولانی باشد. علت خرابی راه را می‌توان در سه عامل ترافیک و یا بار اضافی، مصالح بکار رفته ضعیف و شرایط نامناسب آب‌وهوایی جست‌وجو نمود [Peralta et al. 2012]. بنابراین نیاز به عملکرد بهتر روسازی، مهندسين راهسازی را به سمت اصلاح خواص قیر و آسفالت سوق داده است [Abtahi et al. 2010]. قیرهای اصلاح شده عمدتاً عواملی نظیر شیارشدگی، خستگی، ترک انقباضی، مقاومت اصطکاکی و چسبندگی مصالح را بهبود می‌بخشد [Fu et al., 2007].

محققان نشان داده‌اند که خرده لاستیک می‌تواند به عنوان یک اصلاح‌کننده به قیر افزوده شود. این ماده علاوه بر اینکه عملکرد و طول عمر آسفالت را بهبود می‌بخشد، نیاز به استفاده از مواد خام جدید را در قیر بر طرف می‌سازد و از نظر زیست محیطی گزینه‌ای مناسب است [Estevez, 2009 and Shatanawi et al. 2012]. اساسی‌ترین مزیت کاربرد لاستیک در قیر، انتقال الاستیسیته لاستیک به قیر است. این افزایش در الاستیسیته همچنین باعث افزایش انعطاف‌پذیری روسازی و در نتیجه کاهش ترک‌های انقباضی می‌گردد [Pasquini et al. 2011; Wang et al. 2007; Gallego et al. 2012]. همچنین افزایش مقاومت در برابر پیری، مقاومت کششی، نرمی [Yousefi, 2002]، چغرمگی، برجهندگی، سختی [Pasquini et al. 2012] و به طور کلی افزایش دوام مخلوط‌های آسفالتی برای کاربرد لاستیک در قیر

قیرهای به دست آمده از نفت خام و یا قیر طبیعی که سالیان دراز عمدتاً به عنوان ماده چسباننده در ساخت راه‌ها و یا دیگر مصارف عایق‌کاری و پوششی بکار می‌رود، هیچ‌گاه از یک سری خواص فیزیکی و مکانیکی کاملاً رضایت‌بخش برخوردار نبوده و با توجه به خواص فیزیکی و مکانیکی معین، از قابلیت کاربردی محدود و زمان سرویس‌دهی مشخص برخوردار است. از این رو محققان همواره تلاش داشته‌اند که به نحوی خواص آن را در جهت مطلوب تغییر دهند. اصلاح خواص قیر باعث بالا رفتن کیفیت آن و افزایش عمر سرویس‌دهی پوشش گردیده و در نتیجه هزینه‌های نگهداری و تکرار پوشش، به نحو چشمگیری کاسته خواهد شد.

در این مقاله به بررسی خواص قیر اصلاح شده توسط ذرات لاستیک و مقایسه آن‌ها با استفاده از آزمایش‌های نیروی خروج<sup>۱</sup> و رئومتر برش دینامیکی<sup>۲</sup> پرداخته شده است. آزمایش ابداعی نیروی خروج به بررسی تنش برشی بین سنگدانه و قیر (خالص و یا اصلاح شده)، می‌پردازد. در طرح این آزمایش بررسی شرایط عمل‌آوری نظیر ابعاد ذرات، میزان ذرات لاستیک، دمای اختلاط، مدت زمان اختلاط و نوع سنگدانه‌ها مد نظر قرار داده شده است. سپس از پارامترهای بهینه به دست آمده از این آزمایش، در ساخت نمونه برای آزمایش رئومتر برش دینامیکی، استفاده شده است. در ادامه برای برآورد عملکرد مخلوط آسفالت لاستیکی با استفاده از قیر، آزمایش رئومتر برش دینامیکی انجام گردیده است. سپس دمای بالای عملکردی آسفالت در ادامه آزمایشها برآورد شده است.

نتایج مطالعات و آزمایشها حاکی از آن است که استفاده از پودر لاستیک به عنوان اصلاح‌کننده در قیر، علاوه بر اینکه از نقطه نظر زیست محیطی مطلوب است، از نقطه نظر فنی و عملکردی بسیار مناسب و مطلوب است.

## ۲. مروری بر پیشینه تحقیقات انجام شده

امروزه لاستیک‌های ضایعاتی یک مشکل جدی محسوب می‌شوند.

گزارش شده است [Wang et al. 2012; Partl et al. 2010; Yousefi, 2004].

خروج، مورد استفاده قرار گرفت. خصوصیات این مصالح مطابق جدول (۲) است.

### ۳. مصالح مصرفی

#### ۱-۳ قیر

قیر مورد استفاده در این مطالعه، از نوع قیر ۶۰-۷۰ است. جدول (۱) خصوصیات قیر مصرفی در این مطالعه را نشان می‌دهد.

جدول ۱. نتایج آزمایشها بر روی قیر خالص مورد استفاده در مطالعه

۱/۰۱۱	وزن مخصوص ( $\text{gr/cm}^3$ )
۷۰	درجه نفوذ ( $0/1 \text{ mm}$ )
۵۰	نقطه نرمی ( $^{\circ}\text{C}$ )

#### ۲-۳ پودر لاستیک

پودر لاستیک مصرفی در این پژوهش، حاصل از بازیافت لاستیک‌های ضایعاتی است. برای بررسی اثر اندازه ذرات لاستیک، این مواد در سه اندازه مختلف ۰/۲، ۰/۴ و ۰/۶ میلی‌متر سفارش داده شده است. پودر لاستیک چهارم از نوع لاستیک اصلاح شده یا همان پودر لاستیک اصلاح شده با اندازه ذرات ۰/۸ میلی‌متر است. لاستیک اصلاح شده شامل شکستن پیوندهای کووالانسی کربن-گوگرد در لاستیک است. این فرآیند تحت عنوان دی‌ولکانیزاسیون (شکستن پیوندهای عرضی سولفور) نیز شناخته می‌شود.

#### ۳-۳ مصالح سنگی

در این پژوهش، دو نوع مصالح سنگی آهکی و سرباره‌ای به منظور بررسی چسبندگی بین سنگدانه و قیر در آزمایش نیروی

### ۴. آزمایشهای انجام شده

در این پژوهش، آزمایشهای صورت گرفته در زمینه قیر و پودر لاستیک، به دو گروه تقسیم می‌شوند:

۱- آزمایش ابتکاری نیروی خروج به منظور بررسی چسبندگی قیر معمولی و قیر اصلاح شده با پودر لاستیک به سنگدانه‌های آهکی و سرباره‌ای. همچنین بررسی تأثیر اندازه ذرات پودر لاستیک، درصد پودر لاستیک، دمای اختلاط و مدت زمان اختلاط پودر لاستیک با قیر در این آزمایش، مورد نظر است.

۲- بررسی مدول الاستیسیته و تغییرات زاویه فاز مخلوط قیر و لاستیک در حالت بهینه آزمایشها نیروی خروج و مقایسه با قیر معمولی با استفاده از آزمایش رئومتر برش دینامیکی. سپس برآورد رده بالای عملکردی قیر لاستیکی و قیر معمولی مد نظر است.

#### ۴-۱ آزمایش نیروی خروج

##### ۴-۱-۱ شرح آزمایش

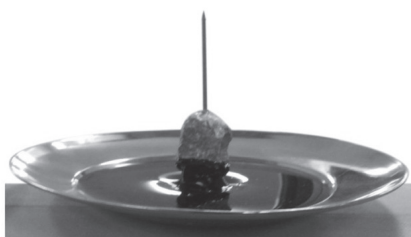
از دست رفتن سنگدانه‌های سطح روسازی علاوه بر اینکه باعث تسریع در تخریب و کاهش عمر روسازی می‌شود، منجر به کاهش اصطکاک بین لاستیک و جاده شده و همچنین باعث ایجاد احساس ناراحتی در بین کاربران جاده می‌گردد؛ بنابراین، توجه به سازگاری قیر و سنگدانه‌ها از پارامترهای مهمی است که در طرح مخلوطهای آسفالتی باید به آن توجه شود [Pas-Quini et al. 2012]. از همین رو، در این پژوهش، آزمون نیروی خروج (روش ابداعی در این پژوهش)، با هدف بررسی و مقایسه چسبندگی انواع مختلف قیر معمولی و یا اصلاح شده (در این

جدول ۲. خصوصیات مصالح سنگی مورد استفاده

آزمایش	مصالح آهکی	مصالح سرباره‌ای
سایش لس‌آنجلس (%)	۲۳	۱۹
مقاومت فشاری ( $\text{kg/cm}^2$ )	۴۰۰	۱۷۱۶
وزن مخصوص ( $\text{gr/cm}^3$ )	۲/۶۱	۳/۴

## امین طائریان، سید مهدی ابطحی، بهروز کوشا، سید مهدی حجازی

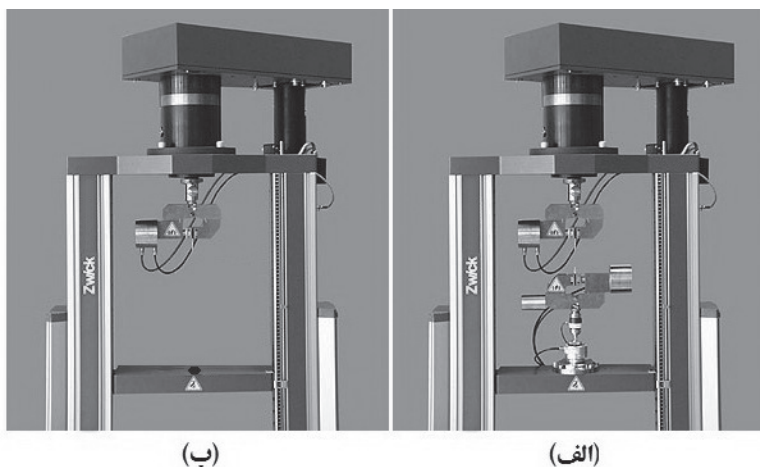
برای آماده‌سازی نمونه‌ها، قیر تا دمای مورد نظر گرم شده تا مایع گردد سپس بر اساس طرح آزمایشها، پودر لاستیک به آن افزوده شده و به مدت زمان اختلاط و دمای اختلاط مورد نظر گرم می‌شود. سپس قیر اصلاح شده با ذرات لاستیک به درون سینی فلزی ریخته شده و سنگدانه متصل به میخ فلزی درون آن قرار می‌گیرد و نمونه‌ها برای ۲۴ ساعت در دمای محیط نگه داشته شده و سپس با استفاده از دستگاه زوئیک تحت کشش قرار گرفته (شکل ۲) تا سنگدانه از قیر خارج شود (شکل ۳).



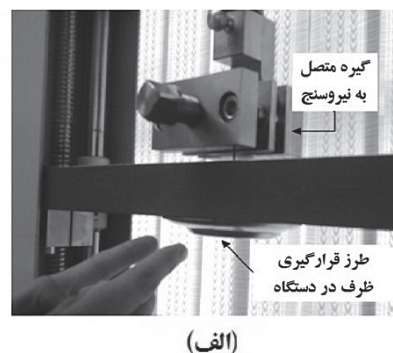
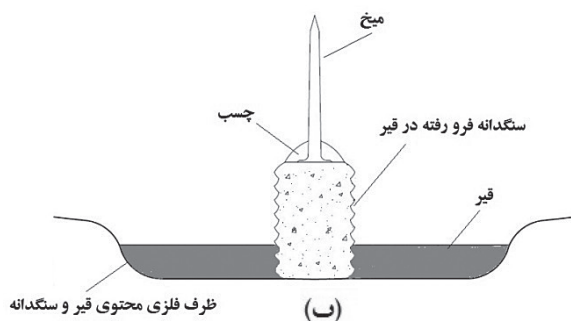
شکل ۳. سنگدانه خارج شده از داخل قیر در آزمایش نیروی خروج

مقاله توسط پودر لاستیک) و سنگدانه صورت گرفت. آزمایشها با استفاده از اعمال تغییراتی در دستگاه اندازه‌گیری خواص کشش الیاف به نام دستگاه اینسترون زوئیک<sup>۳</sup> محقق گردید (شکل ۱). این دستگاه با استفاده از نیروسنج‌های پیزوالکتریکی<sup>۴</sup> ۱۰ کیلونیوتنی که با سرعتی ثابت در بازه mm/sec ۱ تا ۲۰ حرکت می‌کند، قابلیت اندازه‌گیری نیروی خروج سنگدانه‌های تحت کشش از قیر را دارد.

روند آزمایش به این صورت است که با حرکت فک پایینی دستگاه به سمت پایین با سرعت ثابت (نرخ تغییر مکان ثابت)، نیروسنج واقع در فک بالایی دستگاه، نیروی موجود در هر لحظه را اندازه می‌گیرد و سپس اطلاعات نیروسنج‌ها از طریق یک سیستم جمع‌آوری داده، به رایانه متصل به دستگاه منتقل شده و نمودارهای نیرو بر حسب تغییر مکان را به صورت پیوسته ترسیم می‌کند.



شکل ۱. الف) دستگاه زوئیک قبل از تغییر، ب) دستگاه زوئیک پس از تغییر



شکل ۲. الف) طرز قرارگیری ظرف حاوی قیر و سنگدانه در فک پایینی دستگاه زوئیک، ب) نمونه آماده‌شده و اجزاء آن

## بررسی مکانیکی اثر کاربرد ذرات لاستیک در قیر

### ۴-۱-۲ طرح آزمایش

در این آزمایش شرایط عمل آوری قیر اصلاح شده با ذرات لاستیک هم چون درصد پودر لاستیک، اندازه ذرات پودر لاستیک، دمای اختلاط، مدت زمان اختلاط و نوع سنگدانه‌ی مصرفی مورد بررسی قرار گرفت. به این منظور، متغیرهای مستقل جهت به دست آوردن شرایط بهینه در نظر گرفته شدند:

- درصد پودر لاستیک: ۱۰، ۲۰، ۲۵، ۳۰ و ۴۰

- اندازه و نوع ذرات پودر لاستیک: پودر لاستیک در اندازه‌های

۰/۲، ۰/۴ و ۰/۶ میلی‌متر و لاستیک اصلاح شده

- دمای اختلاط: ۱۱۰، ۱۴۰ و ۱۷۰ درجه سانتی‌گراد

- مدت زمان اختلاط: ۲، ۵، ۱۰ و ۲۰ دقیقه

- جنس سنگدانه: آهکی و یا سرباره‌ای

در هر مرحله از آزمایشها یکی از عوامل فوق به عنوان متغیر در نظر گرفته شده و بقیه عوامل ثابت در نظر گرفته شدند تا حالت بهینه برای عامل متغیر به دست آید. در انجام هر آزمایش حداقل پنج نمونه مورد آزمایش قرار گرفت تا از خطاهای احتمالی در انجام آزمایش جلوگیری شود. سپس میانگین مقادیر نیروهای خروج برای نمونه‌های مورد آزمایش به عنوان نیروی خروج برای تیمار مورد نظر گزارش گردید. برنامه آزمایشهای نیروی خروج مطابق جدول (۳) است.

**جدول ۳. برنامه آزمایشهای نیروی خروج**

مرحله	ردیف	درصد پودر لاستیک (%)	مدت زمان اختلاط (دقیقه)	دمای اختلاط (°C)	اندازه و نوع پودر لاستیک	نوع سنگدانه‌ها	توضیحات
۱	۱	-	-	-	-	آهکی	قیر اصلاح نشده
	۲	۱۰	۵	۱۴۰	۰/۲	"	
	۳	۲۰	"	"	"	"	
	۴	۲۵	"	"	"	"	تعیین درصد بهینه پودر لاستیک
	۵	۳۰	"	"	"	"	
	۶	۴۰	"	"	"	"	
۲	۷	درصد بهینه	۲	"	"	"	
	۸	از مرحله	۵	"	"	"	تعیین مدت زمان اختلاط بهینه
	۹	قبل	۱۰	"	"	"	
	۱۰		۲۰	"	"	"	
۳	۱۱	درصد بهینه	زمان بهینه	۱۱۰	"	"	
	۱۲	مرحله ۱	مرحله ۲	۱۴۰	"	"	تعیین دمای اختلاط بهینه
	۱۳			۱۷۰	"	"	
۴	۱۴				۰/۲	"	
	۱۵	درصد بهینه	زمان بهینه	دمای بهینه	۰/۴	"	تعیین اندازه و نوع بهینه پودر لاستیک
	۱۶	مرحله ۱	مرحله ۲	مرحله ۳	۰/۶	"	
	۱۷				لاستیک اصلاح شده	"	
	۱۸	درصد بهینه	زمان بهینه	دمای بهینه	اندازه بهینه	آهکی	بررسی اثر نوع سنگدانه مصرفی
۱۹	مرحله ۱	مرحله ۲	مرحله ۳	مرحله ۴	سرباره‌ای		

#### ۴-۲-۴ آزمایش رئومتر برش دینامیکی<sup>۴</sup> (AASHTO TP5)

##### ۱-۲-۴ شرح آزمایش

آزمایش DSR جهت اندازه گیری مدول کل تنش برشی ( $G^*$ ) و زاویه اختلاف فاز ( $\delta$ ) مورد استفاده قرار می گیرد تا هم رفتار الاستیک و هم ویسکوز را توصیف نماید.  $G^*$  مقیاسی از پایداری کل مصالح در برابر تغییر شکل، در هنگامی است که در معرض ضربات مکرر تنش برشی قرار می گیرد، که شامل دو جزء الاستیک (قابل برگشت) و ویسکوز (غیرقابل برگشت) است [Ghaffar- pour et al. 2010].  $\delta$  نشانه ای از مقادیر نسبی تغییر شکل قابل برگشت و غیرقابل برگشت است.

یکی از کاربردهای این دو پارامتر در ارزیابی پتانسیل شیارشدگی است. شیارشدگی با نسبت  $G^*/\text{Sin}\delta$  رابطه عکس دارد. بنابراین برای کنترل این پدیده برای نسبت فوق، یک حد کمینه در نظر گرفته می شود.  $G^*/\text{Sin}\delta$  در دمای آزمایش، بایستی حداقل ۱/۰۰ کیلو پاسکال برای ماده قیر پیر نشده باشد تا شیار افتادگی به مقدار حداقل خود برسد.

از دیگر کاربردهای این دو پارامتر، بررسی پتانسیل ترک خوردگی ناشی از خستگی رویه آسفالتی<sup>۵</sup>، است. پتانسیل خستگی به کمک ضریب خستگی و حاصل ضرب  $G^* \times \text{Sin}\delta$  تعریف می شود. در روسازی های ممتاز برای تقلیل پتانسیل ایجاد ترک های خستگی، یک حد فوقانی برای حاصل ضرب  $G^* \times \text{Sin}\delta$  در نظر گرفته می شود. این حد در دمای آزمایش باید حداکثر ۵۰۰۰ کیلو پاسکال باشد تا ترک ناشی از خستگی به حداقل برسد [As-phalt Institute, 1994].

#### ۴-۲-۴ طرح آزمایش رئومتر برش دینامیکی

برای مقایسه قیر لاستیکی و قیر خالص با استفاده از نتایج آزمایش رئومتر برش دینامیکی، دو نمونه تهیه شد. نمونه اول از قیر خالص و نمونه دوم از قیر اصلاح شده با پودر لاستیک (با مشخصات بهینه حاصله از آزمایش نیروی خروج)، تهیه گردید. مطابق استاندارد، نمونه ها با قطر ۲۵ میلی متر در فرکانس ۱۰ rad/s در بازه دمایی ۴۵ تا ۸۰ درجه سانتی گراد با گام دمایی ۵ درجه سانتی گراد بر دقیقه مورد آزمایش قرار گرفتند.

#### ۵. مدلسازی و تحلیل نتایج

##### ۱-۱-۵ آزمایش نیروی خروج

##### ۱-۱-۵ مدلسازی

با شروع حرکت فک پایینی دستگاه زوئیک (مطابق شکل ۲-الف)، در نمونه، نیروی  $F$  به وجود آمده و مقدار آن از صفر شروع شده و رفته رفته زیاد می شود تا به یک مقدار بیشینه یا همان نیروی خروج، رسیده و پس از آن نمونه تسلیم شده و با ادامه حرکت فک پایینی دستگاه، مقدار این نیرو کاسته می شود. هنگامی که نمونه قیر گسیخته می شود، مقدار این نیرو نیز دوباره صفر می گردد. واضح است که نیروی خروج برابر است با:

$$F_{pull-out} = (A_{Agg} \times \tau) + (A_b \times w) \quad (1)$$

در این رابطه پراتز اول نشان دهنده تنش برشی بین سنگدانه و قیر و پراتز دوم نشان دهنده نیروی کششی وارده به کف سنگدانه از طرف قیر است. از آنجا که کف سنگدانه های مصرفی صاف شده و تقریباً در تماس با کف ظرف فلزی قرار دارد، بنابراین می توان از عامل کشش صرف نظر کرد؛ بنابراین رابطه (۱) به شکل زیر در خواهد آمد:

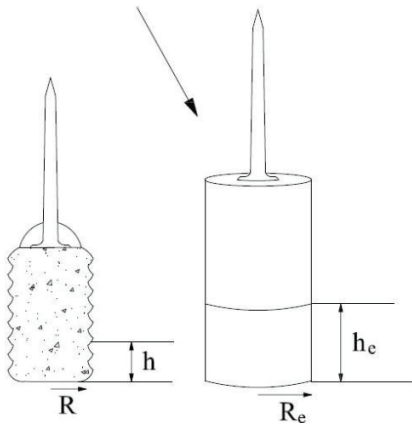
$$F_{pull-out} \propto A_{Agg} \times \tau \quad (2)$$

که در این رابطه،  $\tau$  تنش برشی موجود بین قیر جذبی سنگدانه و قیر،  $A_{Agg}$  مساحت سطح جانبی تر شده سنگدانه توسط قیر و  $F_{pull-out}$  نیروی خروج است. قیر جذبی سنگدانه باعث ایجاد پوششی نازک در پیرامون سنگدانه می گردد. به همین علت، هنگام جدایی سنگدانه از قیر، همواره پوششی بسیار نازک از قیر در اطراف سنگدانه قابل مشاهده است. به همین دلیل در مدلسازی، تنش برشی بین صفحات قیر در نظر گرفته شده است.

از طرفی، اگر از دو صفحه موازی که در فاصله کمی از هم قرار دارند، یکی با سرعت  $u_0$  شروع به حرکت کند، اولین لایه چسبیده به آن نیز بر اساس تئوری لایه های مرزی با سرعت  $u_0$  حرکت می کند. به همین صورت این لایه باعث حرکت لایه های بعدی می گردد و به این ترتیب در ماده بین دو صفحه یک گرادیان سرعت به وجود می آید. این گرادیان سرعت باعث، ایجاد یک تنش برشی بین لایه ها می شود که با گرادیان رعت و ویسکوزیته

## بررسی مکانیکی اثر کاربرد ذرات لاستیک در قیر

سنگدانه با یک استوانه فرضی جایگزین می‌گردد.



شکل ۵. معادل‌سازی سنگدانه مصرفی با یک استوانه فرضی

حال اگر عمق سنگدانه برابر  $h$  باشد، در استوانه معادل این عمق برابر  $h_e$  خواهد بود و بنابراین سطح جانبی تر شده توسط قیر عبارت خواهد بود از:

$$A_{agg} = 2\pi \times R_e \times h_e \quad (4)$$

حال با جایگذاری رابطه (۳) و رابطه (۴) در رابطه (۲) نتیجه می‌شود:

$$F_{pull-out} \propto R_e \times h_e \times \mu \times \left( \frac{\partial u_y}{\partial x} \right) \times \left| \frac{\partial u_y}{\partial x} \right|^{n-1} \quad (5)$$

از آنجا که تمامی آزمایشها با سرعت ثابت ۱۰ mm/min انجام گرفت، بنابراین  $\frac{\partial u}{\partial x}$  در تمامی حالات برابر است. همچنین همان‌گونه که اشاره شد، در انتخاب سنگدانه‌ها سعی بر آن شد که سطح مقطع همگی برابر بوده و سنگدانه‌های مصرفی در آزمایشها ثابت باشند، پس شعاع‌های معادل در نظر گرفته شده تقریباً با هم برابر می‌شوند ( $R_{e1} = R_{e2}$ ). بنابراین برای مقایسه دو حالت، رابطه (۶) حاصل می‌شود:

$$\frac{F_1}{F_2} = \frac{R_{e1}}{R_{e2}} \times \frac{h_{e1}}{h_{e2}} \times \frac{\mu_1}{\mu_2} \times \frac{\left( \frac{\partial u_y}{\partial x} \right) \times \left| \frac{\partial u_y}{\partial x} \right|^{n_1-1}}{\left( \frac{\partial u_y}{\partial x} \right) \times \left| \frac{\partial u_y}{\partial x} \right|^{n_2-1}} \quad (6)$$

$$\Rightarrow \frac{F_1}{F_2} \propto \frac{h_{e1}}{h_{e2}} \times \frac{\mu_1}{\mu_2} \times \frac{\left| \frac{\partial u_y}{\partial x} \right|^{n_1-1}}{\left| \frac{\partial u_y}{\partial x} \right|^{n_2-1}}$$

ماده رابطه مستقیم دارد. از آنجا که جنس ماده بین دو صفحه فرضی (در راستای محور Y) از قیر بوده و قیر در دمای آزمایش رفتار غیرنیوتنی از خود نشان می‌دهد، بنابراین مدلسازی با استفاده از مدل توانی صورت می‌پذیرد [Lamb, 1895]:

$$\tau_y = \mu \times \left( \frac{\partial u_y}{\partial x} \right) \times \left| \frac{\partial u_y}{\partial x} \right|^{n-1} \quad (3)$$

که در این رابطه:

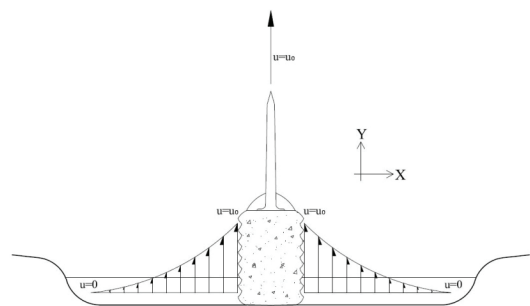
$\tau_y$ : تنش برشی بین لایه‌ای در جهت Y (در جهت حرکت)

$\mu$ : ویسکوزیته

$\frac{\partial u_y}{\partial x}$ : گرادیان سرعت در جهت X (عمود بر محور حرکت)

$n$ : ضریب ثابت،  $0 < n \leq 1$

حال در هنگام خروج سنگدانه از قیر و رسیدن به نیروی خروج بیشینه، به دلیل اینکه قیر جریان می‌یابد، می‌توان از رابطه (۳) برای برآورد نیروی برشی بین سنگدانه و قیر استفاده کرد. شکل (۴) مربوط زمان خارج شدن سنگدانه از قیر است. همان‌گونه که در شکل مشاهده می‌شود، اولین لایه قیر چسبیده به سنگدانه با سرعت  $u_0$  (که سرعت حرکت سنگدانه است)، حرکت می‌کند. سرعت در لایه‌های بعدی رفته رفته کم شده تا در فاصله‌ای از محور Y به صفر ( $u=0$ ) برسد (گویی در کنار یک صفحه ثابت قرار گرفته است).



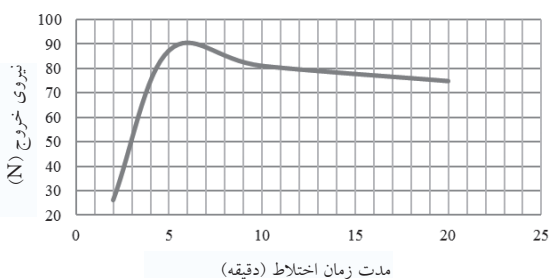
شکل ۴. وضعیت لحظه خروج سنگدانه از قیر و گرادیان سرعت در قیر

از طرفی اگر سنگدانه بکار برده شده در قیر به طور فرضی کشیده شده، تا ناهمواری‌های سطح آن صاف شود، گویی در حقیقت مطابق شکل ۵ سنگدانه مصرفی با یک استوانه فرضی به شعاع  $R_e$  جایگزین شده است.

لاستیک اتفاق می‌افتد. افزایش ویسکوزیته قیر در اثر افزایش پودر لاستیک را می‌توان از منظر شیمیایی-فیزیکی توجیه کرد. افزایش ویسکوزیته قیر، به علت کاهش آروماتیک‌های نفتی و اجزاء سبک آن است [Malekzade et al. 2004]. با اضافه نمودن پودر لاستیک به قیر، ذرات لاستیک آروماتیک‌های نفتی قیر را جذب کرده و متورم می‌شوند و به همین علت سبب افزایش ویسکوزیته در قیر اصلاح‌شده با پودر لاستیک می‌گردند. این روند تا رسیدن به مقدار بیشینه نیروی خروج ادامه داشته و بعد از آن با افزایش میزان پودر لاستیک، کاهش در نیروی خروج و به دنبال آن ویسکوزیته حاصل می‌گردد. دلیل این امر، اندر کنش ضعیف سنگدانه و قیر به علت وجود بیش از اندازه ذرات لاستیک است.

#### \* تأثیر مدت زمان اختلاط

همان‌گونه که در شکل (۷) مشاهده می‌گردد تا رسیدن به زمان بهینه، نیروی خروج افزایش یافته و بعد از آن شروع به کاهش می‌کند. البته نرخ افزایش اولیه خیلی بیشتر از نرخ کاهش ثانویه است.



شکل ۷. نمودار نیروی خروج- مدت زمان اختلاط

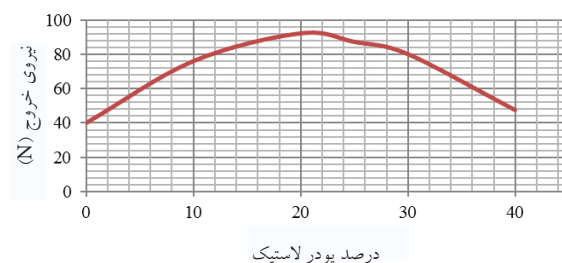
در شکل (۸) نمودار نیروی خروج- تغییر مکان برای نمونه‌های مختلف با مدت زمان‌های اختلاط متفاوت (مطابق مرحله دوم از جدول ۳)، آورده شده است. همان‌گونه که مشخص است، شیب افزایشی (نسبتی از مدول الاستیسیته) در همه نمونه‌ها تقریباً برابر است؛ بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که مدول الاستیسیته قیر اصلاح‌شده تابعی از مدت زمان اختلاط نیست

با توجه به تعمر و تحذب بسیار کم نمودارهای نیروی خروج- تغییر مکان حاصل از آزمون نیروی خروج تا قبل از نقطه اوج (به عنوان مثال شکل (۸))، بنابراین  $n_1 = n_2 = 1$  در نظر می‌گیریم.

#### ۵-۱-۲ تحلیل نتایج آزمایش نیروی خروج

##### \* تأثیر درصد پودر لاستیک

با افزایش درصد پودر لاستیک، نیروی خروج نیز افزایش یافته تا به یک مقدار بیشینه رسیده و از آن پس با اضافه کردن پودر لاستیک مقدار آن کاهش می‌یابد. همان‌طور که در شکل (۶) مشخص است، اضافه نمودن پودر لاستیک به میزان ۱۸ تا ۲۲ درصد به قیر، بهترین نتیجه را بر روی قیر اصلاح‌شده با پودر لاستیک خواهد داشت. این نتیجه با تحقیقات صورت گرفته توسط اداره راه و ترابری ایالت کالیفرنیا بر روی قیرهای لاستیکی همخوانی دارد [California Department of Transportation, 2003]، که این امر مهر تأییدی بر آزمون نیروی خروج است.



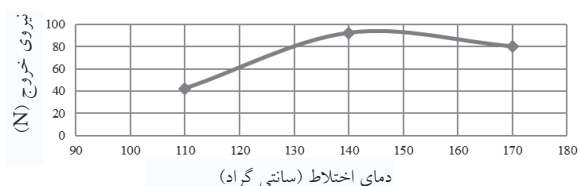
شکل ۶. تأثیر درصد پودر لاستیک اصلاح‌کننده قیر در مقدار نیروی خروج

با توجه به اینکه برای این دسته از آزمایشها (مرحله اول از جدول ۳)، عمق تر شده توسط قیر برای همگی نمونه‌ها برابر است ( $he_1 = he_2$ )، بنابراین نیروی بیشتر، نشان دهنده ویسکوزیته بیشتر قیر اصلاح شده است؛ بنابراین همان‌گونه که در شکل (۶) مشاهده شد، اضافه کردن پودر لاستیک به میزان ۱۸ تا ۲۲ درصد، باعث افزایش بیشتری در ویسکوزیته قیرهای اصلاح‌شده با لاستیک می‌گردد، یعنی بیشترین ویسکوزیته در قیرهای اصلاح شده با لاستیک، در مقدار ۱۸ تا ۲۲ درصد پودر



## بررسی مکانیکی اثر کاربرد ذرات لاستیک در قیر

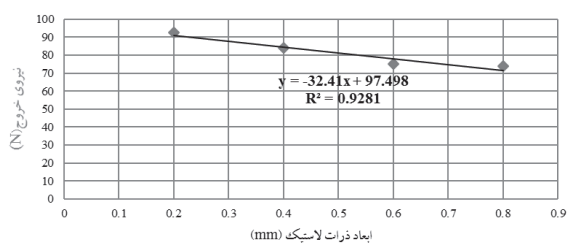
به شکل ذرات جامد درمی‌آیند. تجمع این ذرات در اطراف سنگدانه باعث چسبندگی نامطلوب بین سنگدانه و قیر می‌گردد که این پدیده باعث افت نیروی خروج خواهد شد.



شکل ۹. نمودار نیروی خروج- دمای اختلاط برای قیر لاستیکی (مطابق مرحله سوم از طرح آزمایشها)

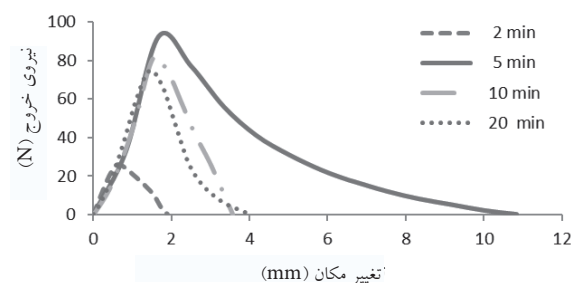
### \* تأثیر اندازه ذرات لاستیک

شکل (۱۰) تأثیر اندازه ذرات پودر لاستیک را بر روی نیروی خروج نشان می‌دهد. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، ذرات کوچک‌تر پودر لاستیک تأثیر بهتری در بهبود نیروی خروج دارند؛ به عبارت دیگر هرچه اندازه ذرات پودر لاستیک کوچک‌تر باشد، ویسکوزیته قیر لاستیکی حاصل، بیشتر خواهد بود. این پدیده را می‌توان به این شکل تفسیر کرد که ذرات کوچک‌تر سطح مؤثر بیشتری داشته و ساختار مولکول‌های تشکیل دهنده لاستیک در آن‌ها بیشتر شکسته (بهرتر دی‌پلمریزه) می‌شود؛ بنابراین در تماس با قیر بیشتر ترکیبات آروماتیک نفتی را جذب نموده و بهتر واکنش می‌دهند و مخلوط یکنواخت‌تری نتیجه می‌دهند. به همین دلیل است که ویسکوزیته و در نتیجه نیروی خروج قیر لاستیکی حاصل، افزایش می‌یابد. مقایسه لاستیک اصلاح‌شده با پودر لاستیک در شکل (۱۰) مشخص می‌کند که پودر لاستیک تأثیر به مراتب بهتری نسبت به لاستیک اصلاح‌شده به عنوان اصلاح کننده خواص قیر دارد.



شکل ۱۰. تأثیر اندازه ذرات لاستیک بر روی نیروی خروج

و عامل تأثیرگذار در این زمینه، درصد پودر لاستیک است. از طرفی همان‌گونه که در شکل (۸) مشخص است، با افزایش مدت زمان اختلاط ابتدا نیروی خروج تا یک نقطه بهینه (در اینجا مربوط به ۵ دقیقه است)، افزایش یافته ولی برای مدت‌های بیشتر از نقطه بهینه، مقدار نیروی خروج کاهش می‌یابد. مضاف بر اینکه تغییر شکل نهایی نیز کاهش می‌یابد؛ یعنی رفتار قیر شکننده می‌گردد.



شکل ۸. نمودار نیروی خروج- تغییر مکان برای قیرهای لاستیکی با زمان اختلاط متفاوت (مطابق مرحله ۲ از طرح آزمایشها)

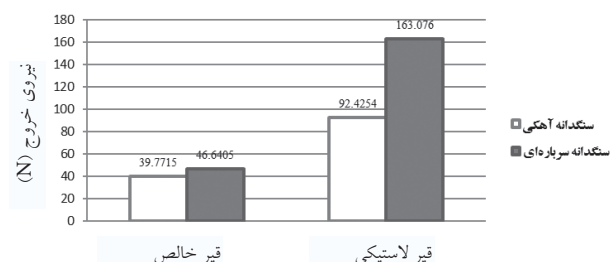
این موضوع گویای آن است که برای اختلاط مناسب ذرات پودر لاستیک و قیر، به مدت زمان مشخصی نیاز است تا ذرات لاستیک، آروماتیک‌های نفتی قیر را جذب کرده و به خوبی متورم شوند و با کاهش میزان آروماتیک‌های نفتی در قیر باعث افزایش ویسکوزیته و به دنبال آن افزایش نیروی خروج شوند. افزایش مدت زمان اختلاط بیش از مقدار بهینه، علاوه بر اینکه باعث کاهش نیروی خروج و ویسکوزیته قیر اصلاح شده می‌گردد، باعث افزایش هزینه و هدر رفتن انرژی خواهد شد.

### \* تأثیر دمای اختلاط قیر و ذرات لاستیک

همان‌گونه که در شکل (۹) مشاهده می‌شود، با افزایش دمای اختلاط، ابتدا نیروی خروج افزایش یافته تا به یک نقطه بهینه برسد و بعد از این دما، با افزایش دمای اختلاط مقدار نیروی خروج کاهش می‌یابد. به نظر می‌رسد برای امتزاج مناسب پودر لاستیک با قیر یک حداقل دمای اختلاط نیاز است. بعد از این دما ذرات لاستیک شروع به جدا شدن از قیر کرده و

\* اثر نوع سنگدانه مصرفی در مقدار نیروی خروج

همان‌گونه که در شکل (۱۱) مشاهده می‌شود، نیروی خروج در سنگدانه سرباره‌ای به طور قابل ملاحظه‌ای از سنگدانه آهکی بیشتر است. این امر هم در قیر لاستیکی اصلاح شده با مشخصات بهینه و هم در قیر خالص قابل مشاهده است. افزایش نیروی خروج به حدی است که می‌توان از اثر اختلاف وزن سنگدانه‌ها چشم‌پوشی کرد.



شکل ۱۱. نیروی لازم برای خارج نمودن سنگدانه‌ی آهکی و سرباره‌ای از قیر خالص و قیر لاستیکی

علت افزایش نیرو هنگام حضور سنگدانه سرباره‌ای را می‌توان در رابطه (۶) جست‌وجو کرد. در این رابطه به علت ثابت بودن قیر مورد استفاده ( $\mu_1 = \mu_2$ )، نتیجه می‌شود:

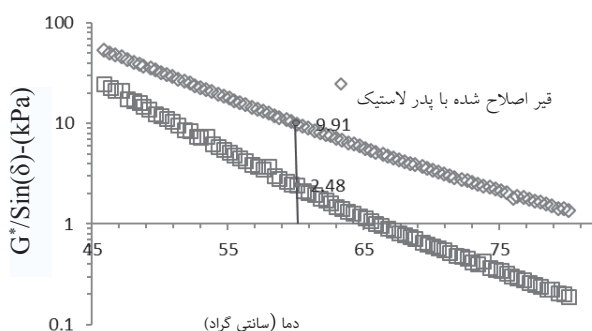
$$\frac{F_1}{F_2} \propto \frac{he_1}{he_2} \times 1 \quad (7)$$

بنابراین در نمونه سرباره‌ای به علت خلل و فرج بیشتر، سطح پیرامونی تر شده توسط قیر افزایش می‌یابد ( $he_1 > he_2$ )، بنابراین نیروی لازم برای خارج کردن سنگدانه سرباره‌ای از قیر از نیروی لازم برای خارج نمودن سنگدانه آهکی از همان قیر، بیشتر خواهد بود ( $F_1 > F_2$ ).

۲-۵ آزمون رئومتر برش دینامیکی (DSR)

همان‌گونه که اشاره گردید، برای مقایسه قیر لاستیکی و قیر خالص با استفاده از نتایج آزمایش رئومتر برش دینامیکی، دو نمونه تهیه گردید. نمونه اول از قیر خالص و نمونه دوم از قیر اصلاح شده با پودر لاستیک (با مشخصات بهینه حاصله از آزمایش نیروی خروج)، تهیه شد. مطابق آنچه در شکل (۱۲) مشاهده می‌شود، نمودار قیر

اصلاح شده با پودر لاستیک در بالای نمودار قیر خالص قرار گرفته است. این به آن معناست که در هر دمای ثابت مقدار  $G^*/\sin\delta$  برای قیر لاستیکی بیشتر از قیر خالص است؛ بنابراین از شکل (۱۲) می‌توان نتیجه گرفت که مقاومت در برابر شیارشدگی در قیر لاستیکی به مراتب از میزان این مقاومت در قیر خالص بیشتر است. به عنوان مثال در دمای ۶۰ درجه سانتی‌گراد، این میزان برای قیر خالص ۲/۴۸ کیلو پاسکال است، در صورتی که این ضریب در قیر لاستیکی ۹/۹۱ است که افزایش ۴ برابری مقاومت در برابر شیارشدگی را در این دما، نشان می‌دهد.



شکل ۱۲. نمودار در دماهای مختلف؛ خروجی آزمون DSR

از دیگر اطلاعاتی که می‌توان از نمودار برداشت کرد، حد بالای دما برای جلوگیری از شیارشدگی است. طبق بخش قبل (تئوری)، محل قطع نمودار توسط خط ( $G^*/\sin\delta = 1$ )، حد بالایی مورد استفاده در درجه‌بندی عملکردی قیر است. همان‌گونه که در شکل (۱۲) مشخص است محل قطع نمودار قیر خالص در حدود دمای ۶۷ °C است، در صورتی که این مقدار برای قیر اصلاح شده با پودر لاستیک در حدود ۸۰ °C است؛ بنابراین حد بالای دمای عملکردی برای قیر لاستیکی در مقایسه با قیر خالص افزایش یافته است؛ به عبارت دیگر قیر خالص با درجه عملکردی ۶۴ (PG64) با افزودن پودر لاستیک مطابق شرایط بهینه حاصل از آزمایش نیروی خروج، به قیر اصلاح شده با درجه عملکردی ۷۶ (PG76) تبدیل شده است. بر خلاف بازه کوچک زاویه اختلاف فاز، در قیر خالص در دماهای بالا (بیش از ۴۶ °C)، این پارامتر در قیر اصلاح شده با لاستیک، مطابق شکل (۱۳) بازه گسترده‌تری را پوشش می‌دهد.

## بررسی مکانیکی اثر کاربرد ذرات لاستیک در قیر

همان‌گونه که در اشکال فوق مشخص است، سهم قسمت الاستیک از مدول مختلط در هر دما برای قیر لاستیکی خیلی بیشتر از قیر خالص است. این موضوع نشان‌دهنده رفتار الاستیک بیشتر قیر لاستیکی در مقایسه با قیر خالص در هر دما (بیش از  $46^{\circ}\text{C}$ ) است.

### ۶. جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

در این پژوهش جهت اصلاح قیر خالص از پودر لاستیک با ۳ دانه‌بندی متفاوت و پودر لاستیک اصلاح‌شده (ریکلیم) استفاده گردید. پنج درصد مختلف پودر لاستیک به منظور بررسی اثر میزان پودر لاستیک در اصلاح قیر در طرح آزمایشها قرار گرفت. جهت بررسی اثر شرایط مختلف عمل‌آوری قیر لاستیکی از آزمایش ابداعی نیروی خروج استفاده گردید. در ادامه جهت توصیف رفتار قیر لاستیکی در مخلوط‌های آسفالتی و مقایسه آن با قیر خالص آزمایش رنومتر برش دینامیکی بکار گرفته شد.

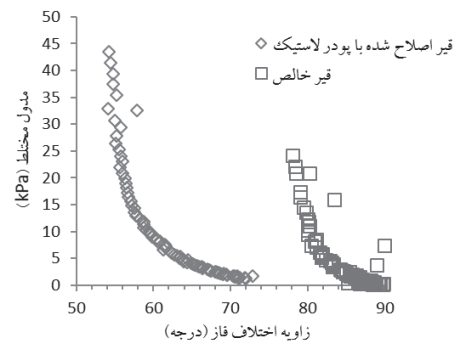
نتایج حاصل از این پژوهش می‌تواند چارچوبی جهت طراحی و ساخت مخلوط‌های آسفالتی لاستیکی فراهم نماید. برخی از نتایج این پژوهش به اختصار در ادامه ذکر گردیده است:

### ۶-۱ آزمون نیروی خروج

- نتایج حاصل از آزمایش نیروی خروج، با نتایج حاصل از پژوهش‌های دیگر محققان جهت برآورد عملکرد قیر لاستیکی همخوانی دارد. بنابراین به نظر می‌رسد که این آزمایش، روشی مناسب جهت ارزیابی چسبندگی بین قیر و سنگدانه و بررسی پدیده عریان شدگی باشد

- استفاده از پودر لاستیک به منظور اصلاح قیر، باعث افزایش نیروی خروج و به دنبال آن ویسکوزیته می‌شود که این پدیده باعث ارتقاء عملکرد قیر و آسفالت در دمای بالا می‌گردد (جلوگیری از پدیده قیرزدگی).

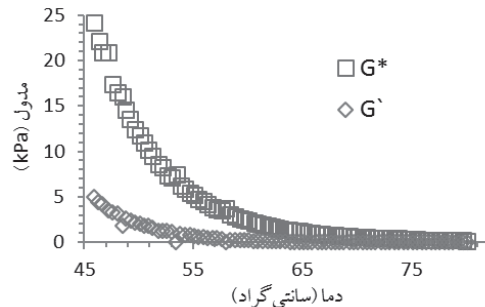
- کاربرد ذرات لاستیک با اندازه کوچک‌تر و هم‌چنین استفاده از ذرات پودر لاستیک نسبت به لاستیک اصلاح‌شده، نیروی



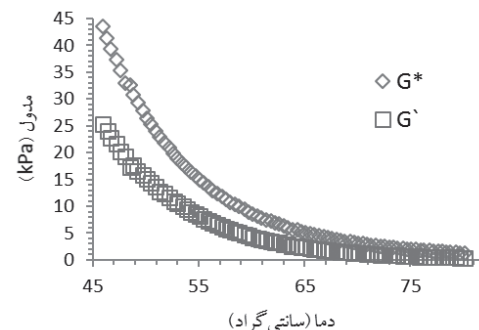
شکل ۱۳. نمودار مدول مختلط بر حسب زاویه اختلاف فاز ( $G''-G'$ )؛ خروجی آزمون DSR

مقادیر کمتر زاویه اختلاف فاز در قیر لاستیکی در مقایسه با مقادیر متناظر در قیر خالص، گویای رفتار الاستیک بیشتر در قیر اصلاح شده با پودر لاستیک است. این امر مشخص‌کننده تأثیرپذیری قیر از الاستیسیته ذرات لاستیک است.

در شکل (۱۴) و شکل (۱۵) مدول مختلط و مدول الاستیک برای قیر خالص و قیر اصلاح‌شده با پودر لاستیک، در دماهای مختلف ارائه شده است.



شکل ۱۴. مدول مختلط ( $G^*$ ) و مدول الاستیک ( $G''$ ) در دماهای بالا برای قیر خالص؛ خروجی آزمون DSR



شکل ۱۵. مدول مختلط ( $G^*$ ) و مدول الاستیک ( $G''$ ) در دماهای بالا برای قیر لاستیکی؛ خروجی آزمون DSR

## ۸. مراجع

- غفارپور جهرمی، سعید، مرتضوی، محمدرضا، وثوق، شهرام و احمدی، نبی‌اله (۱۳۸۹) "تأثیر نانورس بر رفتار خستگی و تغییر شکل ماندگار قیر"، فصلنامه مهندسی حمل و نقل، سال دوم، شماره ۱، پاییز ۱۳۸۹، ص. ۵۱-۶۴.

- ملک زاده، د.، معماریان م. ر (۱۳۸۳) "اصلاح و بهبود خواص قیرها با استفاده از لاستیک قابل بازیخت"، موسسه قیر و آسفالت ایران، دومین همایش قیر و آسفالت، ص ۵۶۹-۵۵۳.

- Abtahi, S. M., Sheikhzadeh, M. and Hejazi, S. M. (2010) "Fiber-reinforced asphalt-concrete-A review", Construction and Building Materials, 24(6), pp.871-877.

- American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO) "Standard specifications for transportation materials and methods of sampling and testing", 22nd Edition, AASHTO, Washington D.C., 2002.

- Asphalt Institute (1994) "Performance graded asphalt binder specification and testing", Superpave Series No.1 (SP-1).

- California Department of Transportation (2003) "Asphalt rubber usage guide", Office of Flexible Pavement Materials", Sacramento

- Estevez, M. (2009) "Use of coupling agents to stabilize asphalt-rubber-gravel composite to improve its mechanical properties", Journal of Cleaner Production, 17(15), 1pp.359-1362.

- Francisco De Almeida Júnior, A., Battistelle, R. A., Bezerra, B. S. and De Castro, R. (2012) "Use of scrap tire rubber in place of SBS in modified asphalt as an environmentally correct alternative for Brazil", Journal of Cleaner Production, Vol. 12, pp. 236-238.

- Frantzis, P. (2003) "Crumb rubber-bitumen interactions: Cold-stage optical microscopy", Journal of Materials in Civil Engineering, 15(5), pp.419-426.

خروج بیشتر و یا به عبارت دیگر چسبندگی بهتر قیر با سنگدانه را فراهم می‌سازد.

- استفاده از سنگدانه سرباره‌ای نسبت به سنگدانه آهکی، نیروی خروج بیشتر به دلیل افزایش سطح ترشده توسط قیر به علت خلل و فرج بیشتر، فراهم می‌نماید.

- آزمایشهای نیروی خروج، بهترین دمای اختلاط را  $140^{\circ}\text{C}$  نشان داد. مدت زمان اختلاط بهینه با استفاده از آزمایش نیروی خروج بازه زمانی ۵ تا ۷ دقیقه تعیین گردید.

- افزایش درصد پودر لاستیک باعث افزایش نیروی خروج و در نتیجه افزایش ویسکوزیته می‌شود. میزان بیشینه نیروی خروج در بازه ۱۸ تا ۲۲ درصد وزنی قیر مشاهده گردید و بعد از این درصد نیروی خروج شروع به کم شدن می‌کند.

## ۶-۲ آزمون رئومتر برش دینامیکی

- قیر لاستیکی در مقایسه با قیر خالص، مدول مختلط بیشتری دارد. علاوه بر این کمتر بودن میزان زاویه اختلاف فاز در قیر لاستیکی در مقایسه با قیر خالص، نشان‌دهنده رفتار الاستیک بیشتر در قیر لاستیکی است. در این آزمایش مشخص شد که مقاومت در برابر شیارشستگی در قیر لاستیکی به مراتب از میزان این مقاومت در قیر خالص بیشتر است. این به علت افزایش سهم تغییرشکل برگشت‌پذیر و یا الاستیک است.

- با توجه به نتایج حاصل از این آزمون، بالا بودن زاویه اختلاف فاز در قیر خالص در مقایسه با قیر لاستیکی، نشان‌دهنده این است که سهم مدول ویسکوز تقریباً به اندازه تمامی مدول مختلط در قیر خالص است.

## ۷. پی‌نوشت‌ها

1. Pull-out Force Test
2. Dynamic Shear Rheometer (DSR)
3. Zwick 190E, Germany, 1996
4. Piezoelectric load-cell
5. Fatigue Cracking, Alligator Cracking

- Tayebali, A. A., Vyas, B. B. and Malpass, G. A. (1997) "Effect of crumb rubber particle size and concentration on performance grading of rubber modified asphalt binders," Progress of superpave (superior performing asphalt pavement): evaluation and implementation, ASTM STP 1322, R.N. Jester, Ed., American Society for Testing and Materials.
- The Asphalt Institute (2003) "Performance graded asphalt binder specification and testing (SP-1)", The Asphalt Institute, Lexington.
- Wang, H., You, Z., Mills-Beale, J. and Hao, P. (2012) "Laboratory evaluation on high temperature viscosity and low temperature stiffness of asphalt binder with high percent scrap tire rubber", Construction and Building Materials, 26(1), pp.583-590.
- Yousefi, A. A. (2002) "Rubber-modified bitumens", Iranian Polymer Journal, 11(5), pp.303-309.
- Yousefi, A. A. (2004) "Rubber-polyethylene modified bitumens", Iranian Polymer Journal, pp.101-112.
- Fu, H., Xie, L., Dou, D., Li, L., Yu, M. and Yao, S. (2007) "Storage stability and compatibility of asphalt binder modified by SBS graft copolymer", Construction and Building Materials, 21(7), pp.1528-1533.
- Gallego, J., Castro, M., Prieto, J. N. and Vassallo, J. M. (2007) "Thermal sensitivity and fatigue life of gap-graded asphalt mixes incorporating crumb rubber from tire waste", Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 1998(-1), pp.132-139.
- Lamb, H. (1895) "Hydrodynamics", 6th Ed., Cambridge University Press, 632p.
- Partl, M. N., Pasquini, E., Canestrari, F. and Virgili, A. (2010) "Analysis of water and thermal sensitivity of open graded asphalt rubber mixtures" Construction and Building Materials, 24(3), pp.283-291.
- Pasquini, E., Canestrari, F. and Santagata, F. A. (2012) "Durability assessment of asphalt rubber mixtures", International Journal of Pavement Research and Technology, 5(2), pp. 69-74.
- Pasquini, E., Canestrari, F., Cardone, F. and Santagata, F. A. (2011) "Performance evaluation of gap graded asphalt rubber mixtures", Construction and Building Materials, 25(4), pp.2014-2022.
- Peralta, J., Silva, H. M., Hilliou, L., Machado, A. V., Pais, J. and Christopher Williams, R. (2012) "Mutual changes in bitumen and rubber related to the production of asphalt rubber binders", Construction and Building Materials, 36, pp.557-565.
- Shalaby, A. and Khan, R. A. (2005) "Design of un-surfaced roads constructed with large-size shredded rubber tires: a case study", Resources, Conservation and Recycling J., 44(4), pp.318-332.
- Shatanawi, K. M., Biro, S., Geiger, A. and Amirkhanian, S. N. (2012) "Effects of furfural activated crumb rubber on the properties of rubberized asphalt", Construction and Building Materials, 28(1), pp.96-103.
- Subrata, D. (2004) "Evaluation of asphalt-aggregate bond and stripping potential", Dissertation: MSc. In civil engineering, Texas Tech University.

