# اثر افزودنی لاستیکی RAR بر عملکرد آسفالت با دانه‌بندی پیوسته و میان‌تهی

**مقاله علمی- پژوهشی**

سیدحمیدرضا صاحب‌الزمانی*، دانش آموخته دکتری، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تهران، تهران، ایران
نادر محمودی‌نیا، دانش آموخته کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران
کورش نادری، دانش آموخته دکتری، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران
جورج سوسا، دانش آموخته دکتری، مدیر عامل، شرکت مهندسین مشاور Consulpav، لیسبون، پرتغال
*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: hsahebzamani@ut.ac.ir

دریافت: ١٤٠٠/٠٢/٠٥- پذیرش: ١٤٠٠/٠٨/٢٠
صفحه ١٧٤-١٥٧

**چکیده**

***تولید و اجرای آسفالت با قیر لاستیکی به روش اختلاط تر در سراسر دنیا با دشواری زیادی همراه است. در سال‌های اخیر، افزودنی لاستیکی RAR برای کاهش دشواری تهیه و مصرف قیرهای لاستیکی طراحی و به صنعت آسفالت معرفی شده است. این افزودنی متشکل از قیر خالص، پودر لاستیک و فیلرهای مختلف شامل آهک هیدراته و AMBS است که از طریق مخلوط کردن گرم و فعال‌سازی لاستیک درون قیر تولید شده و به روش اختلاط خشک مستقیماً به میکسر کارخانه آسفالت اضافه می‌شود. اثر RAR بر عملکرد آسفالت در نقاط مختلف جهان با نتایج مطلوب ارزیابی شده است، لیکن برای نشان دادن عملکرد آن در آسفالت‌های با دانه‌بندی متقاوت به تحقیقات بیشتری نیاز است. در این تحقیق سعی بر آن شده است که آسفالت لاستیکی با دانه‌بندی پیوسته و میان‌تهی به روش اختلاط تر با استفاده از پودر لاستیک و به روش اختلاط خشک با استفاده از RAR با توجه به مشخصات حجمی مربوط به نمونه‌های متراکم دستگاه تراکم چرخشی سوپرپیو طراحی شود و با انجام آزمایشهای عملکردی در مقایسه با آسفالت معمولی بدون افزودنی مورد ارزیابی قرار گیرد. تغییرشکل دائمی، خستگی و نیز شکست آسفالت‌های حاوی RAR ارزیابی شده و با آسفالت‌های اصلاح‌نشده و اصلاح‌شده با پودر لاستیک مقایسه گردید. نتایج نشان داد که اصلاح آسفالت با مواد لاستیکی باعث افزایش سفتی و کاهش تغییرشکل‌های دائمی شده و افزودنی RAR در شیارافتادگی به اندازه قیر لاستیکی مؤثر است. عمر خستگی آسفالت‌های اصلاح‌شده با پودر لاستیک بیشتر از آسفالت‌های بدون افزودنی است و عملکرد خستگی آسفالت‌های حاوی RAR به نوع دانه‌بندی بستگی دارد. همچنین استفاده از افزودنی‌های لاستیکی باعث کاهش شاخص انعطاف‌پذیری و افزایش ترک‌خوردگی آسفالت می‌شود. تغییر دانه‌بندی و مشخصات طرح اختلاط جهت طراحی آسفالت‌های لاستیکی با عملکرد مطلوب در برابر همه خرابی‌های روسازی آسفالتی ضرورت دارد.***

**واژه‌های کلیدی:** آسفالت لاستیکی، RAR، سوپرپیو، خستگی، شاخص انعطاف‌پذیری

## ١- مقدمه

دلیل اصلی استفاده از آسفالت لاستیکی، مشخصات مهندسی برتری است که نسبت به آسفالت‌های معمول و اصلاح‌نشده دارد. لاستیک باعث سفتی قیر و افزایش الاستیسیته آن می‌شود که در نتیجه آن، حساسیت دمایی آسفالت کاهش یافته و مقاومت شیارافتادگی و خستگی آن با اندکی تأثیر منفی بر عملکرد دمای پایین بهبود می‌یابد (California Department of Transportation, 2003). پودر لاستیک به روش اختلاط تر درون قیر سال‌های متمادی با نتایج عملکردی خوبی در آسفالت مصرف شده است، اما بازخوردهای منفی هم داشته است که شامل نیاز به کارخانه اختلاط افزودنی درون قیر، زمان

انتظار طولانی در کارخانه و دماهای عملیاتی بسیار بالا است. بنابراین با وجود مزایای عملکردی قیر لاستیکی، همچنان توسعه قابل‌توجهی در کاربرد جهانی آن دیده نمی‌شود. راه حل این معضلات که پایه و اساس نوآوری و بهبود در قیرهای لاستیکی شده است، محصول جدیدی با عنوان "RAR" – لاستیک فعال‌شده[1] است. RAR از قیر نرم، پودر لاستیک ریز، آهک هیدراته و فیلرهای اضافی تشکیل شده و از طریق اختلاط گرم کوتاه‌مدت و فعال‌سازی پودر لاستیک درون قیر به شکل گرانول ریز لاستیکی تولید می‌شود (Ishai et al., 2015). این افزودنی را می‌توان به هر نوع آسفالت شامل آسفالت با دانه‌بندی پیوسته، باز و میان‌تهی اضافه کرد. در مقایسه با قیرهای لاستیکی معمول و سایر قیرهای اصلاح‌شده، استفاده از RAR می‌تواند نتایج قابل قیاس و حتی بهتری داشته باشد (Sousa et al., 2013). دمای اختلاط آسفالت حاوی RAR مشابه آسفالت‌هایی است که جایگزین آن‌ها می‌شود و اگر RAR به مقدار زیاد مورد استفاده قرار گیرد، دمای مصالح سنگی باید افزایش یابد. وقتی مقدار RAR درون قیر لاستیکی بیش از ۱۵ درصد باشد، بهبود قابل‌توجهی در مشخصه‌های قیر دیده می‌شود. از سوی دیگر، اگر مقدار RAR از حد معینی بیشتر باشد، قیر کافی برای پوشش مصالح سنگی وجود نداشته و ویسکوزیته قیر لاستیکی بسیار زیاد خواهد بود که باعث افزایش فضای خالی آسفالت متراکم می‌شود و بخشی از سنگدانه‌ها نیز بدون پوشش قیری باقی می‌ماند. تجربه نشان داده است که در همه آسفالت‌ها باید حداقل ٤ درصد قیر خالص مصرف شود تا امکان پوشش کامل سنگدانه‌ها فراهم گردد و آسفالت کارپذیر باشد (Sousa et al., 2013). وقتی که موضوع اصلاح آسفالت مطرح باشد، نحوه اضافه کردن افزودنی در کارخانه آسفالت یکی از چالش‌هایی است که در نظر گرفته می‌شود و در مورد افزودنی RAR روش‌های متعددی برای اضافه کردن وجود دارد. در کارخانه‌های آسفالت پیوسته یک سیستم تغذیه اختصاصی می‌تواند این افزودنی را به درون استوانه اختلاط کارخانه تخلیه کند و در کارخانه‌های منقطع نیز روش اضافه کردن کمی راحت‌تر است، زیرا RAR را می‌توان بطور مستقیم به میکسر آسفالت اضافه کرد. تحقیقات نشان داده که آسفالت لاستیکی حاوی RAR عملکرد بهتری نسبت به آسفالت اصلاح‌نشده و حتی آسفالت‌های لاستیکی متداول دارد. بطور کلی، RAR با بهبود درجه PG و افزایش برجهندگی، نقطه نرمی و نیز برگشت‌پذیری، مشخصات قیر خالص را اصلاح می‌کند و آسفالت‌های حاوی RAR، مقاومت شیارافتادگی و خستگی بسیار بهتری دارند (Sousa et al., 2012).

آزمایش‌های خستگی در دماهای پایین و میانی نشان داده است که آسفالت لاستیکی نسبت به بتن آسفالتی گرم معمولی با دانه‌بندی پیوسته، چقرمگی شکست و مقاومت خستگی بیشتری دارد (Mamlouk and Mobasher, 2004). در یک تحقیق آزمایشگاهی به منظور مطالعه ویژگی‌های ترک خستگی آسفالت‌های اصلاح‌شده با پودر لاستیک، آزمایش خمش سه نقطه‌ای نمونه نیم‌دایره انجام پذیرفت و نتایج نشان داد که دانه‌بندی میان‌تهی برای تولید آسفالت لاستیکی با پودر لاستیک به روش تر بسیار مناسب‌تر از دانه‌بندی پیوسته است (Wang et al., 2013). در تحقیق دیگری نیز آزمایش خمش سه‌نقطه‌ای نمونه نیم‌دایره برای ارزیابی اثرات پودر لاستیک، درصد قیر و دانه‌بندی مصالح سنگی بر رفتار شکست آسفالت‌های لاستیکی انجام پذیرفت و نتایج آزمایش با محاسبه مقدار شاخص انعطاف‌پذیری ایلینوی[2] و انرژی شکست تحلیل شد. افزودن پودر لاستیک به آسفالت باعث افزایش مقدار قیر بهینه گردید. همچنین نتایج نشان داد که از میان آسفالت‌های با دانه‌بندی پیوسته، آسفالت‌های اصلاح شده با پودر لاستیک، مقدار انعطاف‌پذیری و مقاومت ترک‌خوردگی بیشتری دارد و آسفالت‌های با دانه‌بندی میان‌تهی به دانه‌بندی پیوسته برتری دارند، زیرا شاخص انعطاف‌پذیری بیشتری برای آنها حاصل گردید (Chen and Solaimanian, 2019). ویژگی‌های عملکردی آسفالت‌های اصلاح‌نشده و اصلاح‌شده لاستیکی با دانه‌بندی میان‌تهی که در جاده E6 در مالمو کشور سوئد اجرا شده، مطالعه گردیده است. محققان آزمایش تیرچه خمشی را برای ترک خستگی و آزمایش چرخ بارگذاری را برای ارزیابی گسترش ترک انجام داده و نشان دادند که عمر خستگی آسفالت لاستیکی با دانه‌بندی میان‌تهی بیشتر از آسفالت اصلاح‌نشده است. همچنین آسفالت لاستیکی مقاومت بیشتری در برابر گسترش ترک داشت (Zeiada et al., 2012). یک پروژه تحقیقاتی آزمایشگاهی و میدانی موفق بر روی آسفالت‌های اصلاح شده با RAR انجام پذیرفته که در آن بررسی‌های جاده‌ای صورت گرفت و وضعیت روسازی تحت شرایط آب و هوایی گرم ارزیابی گردید. نتایج آزمون‌ها و عملکرد روسازی پس از گذشت دو سال مزایای آسفالت حاوی RAR را نشان

داده است. در این تحقیق مقدار ۱۵ و ۲۰ درصد RAR در آسفالت با دانه‌بندی پیوسته استفاده شد (Ishai et al. 2015).

در یک تحقیق کاربردی، آسفالتی جدید با عنوان "ThinGap" با استفاده از RAR و ویژگی‌های عملکردی برتر نسبت به آسفالت لاستیکی با دانه‌بندی میان‌تهی معرفی شده است. پس از انجام آزمایش‌های طرح اختلاط و تعیین مشخصات حجمی آسفالت‌های با دانه‌بندی متفاوت، آن دانه‌بندی که مقدار بهینه قیر لاستیکی آن با ۴۵ درصد RAR بیش از ۱۰ درصد تعیین شده بود، به عنوان دانه‌بندی بهینه انتخاب گردید. این تحقیق نشان داد که ThinGap مقاومت شیارافتادگی بسیار زیاد و عمر خستگی بیشتر از آسفالت‌های معمول دارد. با انجام آزمایش چرخ بارگذاری محققان نتیجه گرفتند که ThinGap نسبت به سایر آسفالت‌های اصلاح‌شده با RAR که تا آن زمان آزمایش شده بودند، مقاومت بیشتری در برابر تغییرشکل‌های دائمی دارد. بر اساس نتایج آزمایش خستگی تیرچه خمشی، محققان اعلام کردند که مقاومت خستگی ThinGap بیشتر از آسفالت‌های با مقاومت خستگی زیاد نظیر آسفالت‌های لاستیکی است (Sousa et al., 2015). پیرشدگی و تغییرشکل‌پذیری قیر اصلاح‌شده با RAR با استفاده از دو نوع قیر خالص PG64-22 و PG70-10 مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج نشان داد که وقتی RAR به قیر نرمتر (PG64-22) افزوده شود، بهبود مشخصات بیشتر است (Medina et al., 2015). قیر حاوی مقادیر مختلف RAR در تحقیق دیگری مورد آزمایش قرار گرفته و با دو نوع قیر خالص و یک قیر لاستیکی مقایسه شد. بر اساس نتایج، اصلاح قیر با RAR منجر به افزایش دمای بالای عملکردی قیر، کاهش تغییرشکل خزشی برگشت‌ناپذیر و افزایش برگشت‌پذیری قیر می‌شود. بطور کلی توصیه شد که برای طراحی آسفالت اصلاح‌شده با عملکرد قابل قبول باید حداقل ۱۵ درصد RAR مورد استفاده قرار گیرد (Kedarisetty et al., 2016). عملکرد آسفالت با دانه‌بندی پیوسته حاوی RAR در یک تحقیق متفاوت مورد ارزیابی قرار گرفت تا مقدار مناسب RAR برای این آسفالت توصیه شود. در این تحقیق، شیارافتادگی، خستگی، شکست و دوام رطوبتی هفت نوع آسفالت متفاوت با دانه‌بندی پیوسته مورد آزمایش قرار گرفت. مقدار ۲ و ٤ درصد RAR نسبت به وزن آسفالت استفاده شد. افزودن RAR به آسفالت باعث کاهش چشمگیر کرنش دائمی آن شده و مقاومت شیارافتادگی آسفالت برای مقادیر بیشتر RAR افزایش یافت. عمر خستگی نیز برای مقادیر بیشتر RAR بهبود یافت (Kedarisetty et al., 2017). در یک پروژه بهسازی و نگهداری پیشگیرانه در شهر جاکارتا، یک مقطع آزمایشی با آسفالت حاوی RAR اجرا شد تا بتواند مانع بروز و گسترش ترک‌خوردگی روسازی شود. یک میان‌لایه جاذب تنش با استفاده از RAR بر روی روسازی بتنی اجرا شد و سپس روکش آسفالت SMA حاوی RAR بر روی آن قرار گرفت. پس از گذشت حدود ۲ سال از زمان اجرای پروژه، روکش آسفالتی در وضعیت سالم قرار داشت. برای مقایسه و دو ماه پس از آن، یک مقطع مجاور جاده با آسفالت معمولی اجرا شد که در زمان ارزیابی، دچار ترک‌خوردگی انعکاسی شدید شده و چاله‌های بسیاری در آن دیده شد (Sousa et al., 2018). طرح اختلاط سوپرپیو برای تعیین درصد قیر بهینه با مقدار ۳۵ درصد RAR انجام پذیرفته و عملکرد آسفالت‌های حاوی RAR با آسفالت لاستیکی تهیه شده به روش تر مقایسه شده است. به این منظور، دانه‌بندی میان‌تهی با حداکثر اندازه ۱۲/۵ میلیمتر و قیر PG64-22 برای آسفالت لاستیکی و دانه‌بندی پیوسته با حداکثر اندازه ۱۹ میلیمتر و قیر PG70-10 برای آسفالت شاهد استفاده شد. مقدار قیر بهینه ۹/۲۵ درصد برای آسفالت حاوی RAR و ۷/٦ درصد برای آسفالت لاستیکی با پودر لاستیک به دست آمد و برای آسفالت شاهد، مقدار آن برابر ۵/۱ درصد تعیین شد. نتایج آزمایش‌های عملکردی نشان داد که آسفالت حاوی RAR در مقایسه با سایر آسفالت‌ها، عمر خستگی، دوام رطوبتی و مقاومت ترک‌خوردگی بیشتری دارد (Shah, 2018). آسفالت با دانه‌بندی باز هم برای تعیین مقدار بهینه RAR مورد آزمایش و تحقیق قرار گرفته است. نتایج آزمایش‌های این نوع آسفالت نشان داده است که آسفالت حاوی RAR در دماهای مختلف مقدار مدول بیشتری نسبت به آسفالت اصلاح‌نشده دارد و مقدار بهینه RAR برای آسفالت مورد آزمایش برابر با ۱۰ درصد وزنی قیر مشخص شد (Plati et al., 2019).

اگرچه تحقیقات متعددی در زمینه طرح اختلاط و عملکرد آسفالت‌های اصلاح شده با RAR انجام شده، بسیاری از آنها رویکرد تغییر درصد قیر آسفالت جهت تعیین مقدار بهینه RAR را در پیش گرفته و عموماً نقش مقدار ریزدانه در دانه‌بندی مصالح نادیده گرفته شده است. کاهش مصالح ریز در آسفالت باعث افزایش ضخامت قشر قیری و در نتیجه بهبود عملکرد ترک‌خوردگی آسفالت می‌شود. در این تحقیق سعی شده است

که عملکرد آسفالت‌های حاوی RAR با دانه‌بندی‌های متفاوت ارزیابی شود. دانه‌بندی‌ها به نحوی انتخاب شده است که بتواند به مقادیر قیر بهینه منطقی ختم شود که ۱۵ و ۲۵ درصد آن شامل RAR باشد. پس از انجام طرح اختلاط سوپرپیو، آزمایش مدول برجهندگی برای ارزیابی سفتی، آزمایش‌های چرخ بارگذاری و خزش دینامیکی برای ارزیابی مقاومت شیارافتادگی و آزمایش‌های خستگی تیرچه و تعیین شاخص انعطاف‌پذیری ایلینوی نیز برای تعیین پارامترهای ترک خستگی و شکست آسفالت انجام پذیرفت.

## ۲- مواد و آزمایش‌ها

### ۲-۱- مواد و مصالح

قیر PG64-22 از شرکت نفت پاسارگاد به عنوان قیر خالص در تهیه همه آسفالت‌ها مورد استفاده قرار گرفت. این قیر برای ساخت آسفالت اصلاح‌نشده و آسفالت‌های اصلاح شده با پودر لاستیک به روش تر و اصلاح شده با RAR به روش خشک استفاده شد. پودر لاستیک عبوری از الک شماره ٢٤ با حداکثر اندازه ۰/۷ میلیمتر مورد استفاده قرار گرفت. قیر لاستیکی به روش تر با استفاده از یک میکسر دور تند با سرعت چرخش ٤۰۰۰ دور بر دقیقه تولید شد. ابتدا قیر خالص تا دمای ۱۷۰ درجه سانتیگراد گرم شده و پودر لاستیک در مدت ۱۰ دقیقه به تدریج به قیر اضافه شد. در این مدت دمای مخلوط به ۱۹۰ درجه سانتیگراد افزایش داده شد و به مدت ۵۰ دقیقه دیگر هم زده شد تا ذرات لاستیک بطور کامل متورم گردد.RAR مورد استفاده در این تحقیق از یک قیر خالص با درجه نفوذ ۱۰۰-۷۰، پودر لاستیک ریز و فیلرهای مختلف شامل آهک هیدراته و AMBS - فیلر فعال معدنی تثبیت کننده قیر[۳] تشکیل شده است. AMBS پودر سیلیسی میکرونیزه فعال سطحی و محصول جانبی صنایع معدنی فسفات است که به عنوان تثبیت کننده برای جلوگیری از ریزش قیر در آسفالت‌های با دانه‌بندی میان‌تهی و متخلخل در تولید RAR استفاده می‌شود. با در نظر گرفتن نسبت‌های وزنی، RAR شامل ۵۸ درصد پودر لاستیک، ۱۸ درصد قیر و ٢٤ درصد فیلر است (Shah, 2018). درجه قیر مصرفی در تولید RAR ممکن است با درجه قیر خالص مصرفی در این تحقیق متفاوت باشد. به هر حال، مقدار قیر موجود در افزودنی RAR بسیار کم است و نمی‌تواند اثر محسوسی بر ویژگی‌های آسفالت داشته باشد. RAR در دو مقدار ۱۵ و ۲۵ درصد وزنی کل قیر اصلاح‌شده استفاده شد که معادل با ۱۸ و ۳۳ درصد وزنی نسبت به وزن قیر خالص است. از آنجا که RAR حاوی ۵۸ درصد وزنی از پودر لاستیک است، ۱۵ و ۲۵ درصد مقدار مصرف RAR معادل با ۹ و ۱۵ درصد پودر لاستیک در روش اختلاط تر است. دانه‌بندی پودر لاستیک و RAR مصرفی در جدول ۱ ارایه شده است.

**جدول ۱. درصد عبوری پودر لاستیک و RAR از الک‌های مختلف**

| اندازه الک، میلیمتر | پودر لاستیک | افزودنی RAR |
|---|---|---|
| **۱/۱۸۰ (شماره ١٦)** | ۱۰۰ | ۱۰۰ |
| **۰/٦۰۰ (شماره ۳۰)** | ۸۵ | ٦۵ |
| **۰/۳۰۰ (شماره ۵۰)** | ۳۵ | ۲۲ |
| **۰/۱۵۰ (شماره ۱۰۰)** | ٤/٦ | ۹/۰ |
| **۰/۰۷۵ (شماره ۲۰۰)** | ۰/۰ | ۲/۲ |

مصالح سنگی درشت‌دانه، ریزدانه و فیلر مصالح سنگی از جنس سنگ دولومیت شکسته کوهی از معدن اسب‌چران واقع در شهرستان فیروزکوه تهیه شد. چهار نوع دانه‌بندی، دو دانه‌بندی پیوسته و دو دانه‌بندی میان‌تهی با حداکثر اندازه سنگدانه‌ای ۱۹ میلیمتر برای ساخت مخلوط‌های آسفالتی مورد آزمایش استفاده شد. هر دانه‌بندی مقدار ریزدانه متفاوت دارد تا اثر ضخامت قشر قیری بر ویژگی‌های عملکردی آسفالت ارزیابی شود. مشخصات مصالح سنگی و دانه‌بندی مخلوط‌های آسفالتی در جداول ۲ و ۳ ارایه شده است.

**جدول ۲. مشخصات فیزیکی مصالح سنگی**

| مشخصه | استاندارد | نتیجه آزمایش |
|---|---|---|
| مصالح سنگی درشت‌دانه | | |
| سایش به روش لوس‌آنجلس (درصد) | ASTM C131 | ۲۱ |
| شکستگی در دو جبهه و بیشتر (درصد) | ASTM D5821 | ۱۰۰ |
| سنگدانه‌های پهن و دراز (درصد) | ASTM D4791 | ۰/۳ |
| افت وزنی در سولفات سدیم (درصد) | ASTM C88 | ۰/۱ |
| وزن مخصوص حقیقی | ASTM C127 | ۲/٦٤۱ |
| جذب آب (درصد) | | ۰/۸ |
| مصالح سنگی ریزدانه | | |
| ارزش ماسه‌ای (درصد) | ASTM D2419 | ۸٤ |
| افت وزنی در سولفات سدیم (درصد) | ASTM C88 | ۱/۰ |
| گوشه‌داری (درصد) | ASTM C1252 | ٤٦ |
| دامنه خمیری (PI) | ASTM D4318 | غیر خمیری |
| وزن مخصوص حقیقی | ASTM C128 | ۲/٦۰۷ |
| جذب آب (درصد) | | ۱/۷ |

**جدول ۳. دانه‌بندی مصالح سنگی مخلوط‌های آسفالتی (درصد عبوری)**

| اندازه الک، میلیمتر | دانه‌بندی‌های پیوسته | | دانه‌بندی‌های میان‌تهی | |
|---|---|---|---|---|
| | نوع یک | نوع دو | نوع یک | نوع دو |
| | درصد عبوری از الک‌های مختلف | | | |
| ۱۹ | ۱۰۰ | ۱۰۰ | ۱۰۰ | ۱۰۰ |
| ۱۲/۵ | ۹۵ | ۹۵ | ۹۵ | ۹۵ |
| ۹/۵ | ۸۶ | ۸۶ | ۷۴ | ۷۴ |
| ۴/۷۵ (شماره ۴) | ۵۸ | ۵۸ | ۲۴ | ۲۴ |
| ۲/۳۶ (شماره ۸) | ۳۵ | ۳۵ | ۲۰ | ۲۰ |
| ۰/۳۰۰ (شماره ۵۰) | ۱۰ | ۹ | ۱۳ | ۷ |
| ۰/۰۷۵ (شماره ۲۰۰) | ۵/۰ | ۳/۰ | ۸/۰ | ۴/۰ |

## ۲-۲- طرح اختلاط آسفالت

مشخصات آسفالت‌های مورد آزمایش شامل نوع دانه‌بندی و قیر و افزودنی در جدول ۴ آورده شده است. آسفالت‌های اصلاح‌نشده و اصلاح‌شده لاستیکی، به ترتیب، در دماهای اختلاط ۱۵۵ و ۱۸۰ درجه سانتیگراد تهیه شدند. برای تهیه آسفالت لاستیکی حاوی RAR، پس از ریختن مصالح داغ درون ظرف اختلاط میکسر، RAR به مصالح اضافه شد و به مدت ۳۰ ثانیه با مصالح مخلوط شد تا قبل از ریختن قیر خالص، درون مصالح توزیع شود. سپس قیر خالص درون ظرف میکسر ریخته شد و محتویات آن حداقل ۲ دقیقه مخلوط شد تا مصالح کاملاً با قیر اندود شود. قیر خالص و قیر لاستیکی ساخته شده به روش تر نیز قبل از اختلاط با مصالح سنگی به مدت ۲ ساعت در دمای اختلاط گرم شدند. طبق استاندارد AASHTO R30 برای شبیه‌سازی پیرشدگی کوتاه‌مدت همه آسفالت‌ها در حالت نامتراکم به مدت ۴ ساعت درون آون ۱۳۵ درجه سانتیگراد گرمادهی شدند. پیش از تراکم نیز همه آسفالت‌ها به مدت یک ساعت درون آون در دمای تراکم هم‌دما شدند. آسفالت‌های اصلاح‌نشده و آسفالت‌های اصلاح‌شده لاستیکی، به ترتیب، در دماهای ۱۳۸ و ۱۷۰ درجه سانتیگراد متراکم شدند. در شکل ۱ انواع نمونه‌های آسفالتی متراکم شده در این تحقیق به تصویر کشیده شده است.

برای آسفالت‌های با دانه‌بندی پیوسته طرح اختلاط سوپرپیو طبق AASHTO R35 انجام پذیرفت و درصد قیر متناظر با ۹۶ درصد دانسیته نسبی برای تعداد ۱۰۰ چرخش تراکم طرح ($N_d$) به عنوان قیر بهینه انتخاب شد. طبق AASHTO T312 نمونه‌های استوانه‌ای به قطر ۱۵ سانتیمتر با تعداد ۱۰۰ چرخش توسط دستگاه تراکم چرخشی متراکم شدند و پارامترهای حجمی نمونه‌های متراکم برای درصد قیرهای مختلف تعیین شد. درصد قیر متناظر با ۴ درصد فضای خالی به عنوان قیر بهینه آسفالت‌های مختلف انتخاب شد. دو نمونه اضافی نیز با مقدار قیر بهینه و با تراکم حداکثر معادل ۱۶۰ چرخش ساخته شد. مشخصات حجمی، نسبت فیلر به قیر و دانسیته تراکم به ازای تراکم اولیه و تراکم ماکزیمم برای آسفالت‌های مختلف تعیین شده و با حدود مشخصات مقایسه گردید.برای آسفالت‌های با دانه‌بندی میان‌تهی نیز طرح اختلاط حجمی بر اساس AASHTO R46 و با استفاده از روش تراکم چرخشی با تعداد ۱۰۰ چرخش انجام پذیرفت. نمونه‌های استوانه‌ای به قطر ۱۵ سانتیمتر با مقادیر مختلف قیر ساخته شده و مشخصات حجمی نمونه‌ها به همراه پارامتر فضای خالی مصالح درشت، VCA، تعیین شد. مقدار قیر بهینه آسفالت‌های با دانه‌بندی میان‌تهی متناظر با ۴ درصد فضای خالی طبق مشخصات AASHTO M325 انتخاب گردید. ضخامت قشر قیری برای همه آسفالت‌ها در مقدار قیر بهینه محاسبه شد. این پارامتر برابر است با نسبت حجم قیر مؤثر به مساحت سطحی سنگدانه‌ها. مساحت سطحی نیز با ضرب کردن ضریب مساحت سطحی در درصد عبوری از الک‌های مختلف به دست می‌آید. در جدول ۵ پارامترهای طرح اختلاط و ضخامت قشر قیری برای همه آسفالت‌ها ارائه شده است.

**جدول ۴. مشخصات آسفالت‌های مورد آزمایش**

| شناسه مخلوط | نوع دانه‌بندی | نوع و درصد افزودنی | نوع قیر | روش اصلاح قیر |
|---|---|---|---|---|
| D1 | پیوسته نوع یک | – | قیر خالص PG64-22 | – |
| D1-CR10 | پیوسته نوع یک | پودر لاستیک – ۱۰٪ | قیر لاستیکی | روش تر |
| D1-RAR15 | پیوسته نوع یک | RAR – ۱۵٪ | قیر خالص PG64-22 | روش خشک |
| D2-RAR15 | پیوسته نوع دو | RAR – ۱۵٪ | قیر خالص PG64-22 | روش خشک |
| G1 | میان‌تهی نوع یک | – | قیر خالص PG64-22 | – |
| G1-CR15 | میان‌تهی نوع یک | پودر لاستیک – ۱۵٪ | قیر لاستیکی | روش تر |
| G1-RAR25 | میان‌تهی نوع یک | RAR – ۲۵٪ | قیر خالص PG64-22 | روش خشک |
| G2-RAR25 | میان‌تهی نوع دو | RAR – ۲۵٪ | قیر خالص PG64-22 | روش خشک |

**شکل ۱. انواع نمونه‌های آسفالتی متراکم مورد آزمایش**

**جدول ۵. مشخصات طرح اختلاط و ضخامت قشر قیری آسفالت‌های مورد آزمایش**

| شناسه مخلوط | قیر بهینه (٪) | دانسیته ($kg/m^3$) | فضای خالی (٪) | VMA (٪) | VFA (٪) | نسبت فیلر به قیر مؤثر | ضخامت قشر قیری (میکرون) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| D1 | ٤/٣ | ٢/٣٩٢ | ٤/٣ | ١٣/٨ | ٦٩ | ١/٢٥ | ٨/٧ |
| D1-CR10 | ٤/٥ | ٢/٤٠٢ | ٤/١ | ١٣/٦ | ٧٠ | ١/٢٣ | ٧/١ |
| D1-RAR15 | ٤/٨ | ٢/٣٨٨ | ٤/١ | ١٤/٤ | ٧١ | ١/١٥ | ٧/٦ |
| D2-RAR15 | ٥/٥ | ٢/٣٧٦ | ٤/١ | ١٥/٠ | ٧٣ | ٠/٥٩ | ١٠/٣ |
| G1 | ٦/٠ | ٢/٣٤٨ | ٤/٢ | ١٧/٠ | ٧٥ | ١/٤٧ | ١٠/٢ |
| G1-CR15 | ٦/٠ | ٢/٣٤٦ | ٤/٣ | ١٧/١ | ٧٥ | ١/٤٤ | ٧/٩ |
| G1-RAR25 | ٦/٠ | ٢/٣٤٨ | ٣/٩ | ١٧/٠ | ٧٧ | ١/٤٥ | ٦/٦ |
| G2-RAR25 | ٦/٧ | ٢/٣٤٣ | ٤/٢ | ١٧/٥ | ٧٦ | ٠/٦٥ | ١١/٠ |

به جای کنترل معیار حداقلی VMA در آسفالت‌های با دانه‌بندی پیوسته توصیه شده است که مقدار حداقل ۸ میکرون برای ضخامت قشر قیری لحاظ شود (Kandhal et al., 1998). RAR به صورت یک فیلر خشک عمل می‌کند و بنابراین بسیار مهم است که ضخامت قشر قیری در آسفالت محاسبه شده و مقدار آن در پروسه طرح اختلاط و تعیین درصد قیر بهینه در نظر گرفته شود. با توجه به تجربیات میدانی در پروژه‌های آسفالتی که در آنها از RAR استفاده شده بود، مقدار حداقل ۱۰ میکرون برای آسفالت‌های با دانه‌بندی میان‌تهی حاوی RAR توصیه شده است. در برخی پروژه‌ها در آسفالت‌هایی که ضخامت قشر قیری کمتر از ۱۰ میکرون بود، خرابی‌های زودرس نظیر ترک‌خوردگی و شن‌زدگی دیده شد (Ishai et al. 2015). آسفالت G1-RAR25 معیار حداقل ۱۰ میکرون را برآورده نکرده و ضخامت قیری آن بسیار کمتر از ۱۰ میکرون است، با این وجود برای ارزیابی‌های مقایسه‌ای مورد آزمایش قرار گرفت. ذکر این نکته ضروری است که آسفالت‌های با دانه‌بندی میان‌تهی مورد آزمایش در این تحقیق را نمی‌توان با آسفالت لاستیکی با دانه‌بندی میان‌تهی طبق استاندارد ایالت آریزونای کشور آمریکا مقایسه کرد که مقدار VMA حداقل ۱۹ درصد و مقدار قیر بیش از ۸ درصد با قشر قیری ضخیم‌تر از ۱۵ میکرون دارند.

## ۲-۳- آزمایش‌های عملکردی آسفالت

### ۲-۳-۱- آزمایش مدول برجهندگی

آزمایش مدول برجهندگی روشی سریع و غیر مخرب برای تعیین سفتی آسفالت است. این مشخصه رایج‌ترین نوع اندازه‌گیری رابطه تنش-کرنش و شاخصی از قابلیت توزیع تنش در آسفالت است. آزمایش تعیین مدول برجهندگی در بارگذاری کشش غیرمستقیم برای آسفالت‌های مختلف طبق استاندارد ASTM

D4123 در دمای ۲۵ درجه سانتیگراد انجام پذیرفت. در این آزمایش یک بار فشاری سیکلی در امتداد صفحه قائم قطری نمونه استوانه‌ای وارد شده و کرنش برگشت‌پذیر قطری در صفحه عمود بر امتداد بار اندازه‌گیری می‌شود. کرنش در امتداد بارگذاری اندازه‌گیری نمی‌شود و بنابراین یک مقدار فرضی به عنوان ضریب پواسون استفاده می‌شود. ترتیب آزمایش شامل یکصد سیکل پیش‌بارگذاری و در ادامه آن، پنج سیکل بارگذاری است که در آنها برداشت داده‌ها انجام شده و محاسبات مدول برجهندگی صورت می‌گیرد. شکل ۲ تجهیزات آزمایش مدول برجهندگی را نشان می‌دهد. همه آسفالت‌ها با سیکل بارگذاری به مدت ۱۰۰۰ میلی‌ثانیه، بارگذاری به شکل نیمه‌سینوسی به مدت ۱۰۰ میلی‌ثانیه و ضریب پواسون برابر با ۰/۳۵ آزمایش شدند. نمونه‌های متراکم ساخته شده با دستگاه تراکم چرخشی به قطر ۱۰ سانتیمتر با فضای خالی ٤ درصد برای آزمایش مورد استفاده قرار گرفت.

**شکل ۲. قاب بارگذاری و ابزار آزمایش مدول برجهندگی**

### ۲-۳-۲- آزمایش چرخ بارگذاری

برای ارزیابی عملکرد شیارافتادگی آسفالت بطور گسترده آزمایش چرخ بارگذاری مورد استفاده قرار می‌گیرد. از آنجا که در این آزمایش نمونه آسفالتی مستقیماً در معرض یک چرخ بارگذاری متحرک قرار می‌گیرد، می‌تواند رفتار تغییرشکل دائمی آسفالت را به خوبی شبیه‌سازی کند. برای ارزیابی شیارافتادگی آسفالت‌های اصلاح‌نشده و اصلاح‌شده لاستیکی، آزمایش چرخ بارگذاری با استفاده از دستگاه آزمایش نشان داده شده در شکل ۳ مطابق استاندارد EN12697-22 بر روی نمونه‌های استوانه‌ای انجام پذیرفت. این دستگاه از یک چرخ بارگذاری تشکیل شده که بر روی نمونه آزمایش به جلو و عقب حرکت می‌کند و عمق شیار ایجاد شده در سطح نمونه ثبت می‌شود. یک حلقه لاستیکی بدون آج به قطر خارجی ۲۰ سانتیمتر، عرض ۵ سانتیمتر و ضخامت ۲ سانتیمتر در این چرخ بکار رفته است. بار چرخ برابر ۷۰۰ نیوتن و جابجایی چرخ در حرکت رفت و برگشتی حدود ۲۳۰ میلیمتر با تعداد ۲٦/۵ سیکل در دقیقه است. نمونه‌های متراکم استوانه‌ای به قطر ۱۵ و ارتفاع ٦ سانتیمتر توسط دستگاه تراکم چرخشی با فضای خالی ٦ درصد ساخته شد. همه نمونه‌ها در شرایط خشک و دمای ۵۵ درجه سانتیگراد تا ۱۰۰۰۰ سیکل تحت بارگذاری قرار گرفته و نمودار عمق شیار در مقابل سیکل بارگذاری ترسیم گردید.

**شکل ۳. دستگاه چرخ بارگذاری و واحد کنترل آن**

### ۲-۳-۳- آزمایش خزش دینامیکی

آزمایش خزش دینامیکی یکی از بهترین روش‌های آزمایشگاهی برای ارزیابی شیارافتادگی آسفالت است. برای انجام این آزمایش، نمونه تحت بارگذاری فشاری تکراری قرار می‌گیرد و تغییرشکل دائمی در سیکل‌های مختلف بارگذاری ثبت می‌شود. یک رفتار خزشی کامل از سه مرحله مجزا تشکیل می‌شود. در مرحله اول، با گذشت زمان نرخ تغییرشکل خزشی کاهش می‌یابد. در مرحله دوم نرخ خزش ثابت می‌ماند و در نهایت، آسفالت در مرحله سوم به روانی می‌رسد که در این مرحله نرخ خزش افزایش یافته و گسیختگی اتفاق می‌افتد. عدد روانی آسفالت، نقطه شروع مرحله سوم یا نقطه حداقل منحنی نرخ خزش است (Witczak et al., 2002). در این تحقیق، آزمایش خزش دینامیکی مطابق روش A1 در استاندارد EN12697-25 انجام پذیرفت. در این آزمایش، یک نمونه استوانه‌ای به قطر ۱۵ و ارتفاع ٦ سانتیمتر در دمای بالا بین دو صفحه بارگذاری موازی قرار می‌گیرد. قطر صفحه پایینی حداقل ۱۰

میلیمتر بیشتر از قطر نمونه بوده و قطر صفحه بالایی برابر ۱۰ سانتیمتر است. نمونه آزمایش تحت بارگذاری فشاری سیکلی با شکل مربعی قرار گرفته و هیچگونه فشار جانبی به آن وارد نمی‌شود. تغییر ارتفاع نمونه در طول بارگذاری اندازه‌گیری شده و مقدار کرنش محوری تجمعی به ازای سیکل‌های مختلف بارگذاری تعیین می‌شود. آزمایش در دمای ۵۵ درجه سانتیگراد با فشار ۳۰۰ و ۲۰۰ کیلوپاسکال، به ترتیب، برای آسفالت‌های با دانه‌بندی پیوسته و میان‌تهی انجام پذیرفت. فرکانس بارگذاری برابر ۰/۵ هرتز و مدت زمات بارگذاری در هر سیکل یک ثانیه انتخاب شد و بارگذاری تا رسیدن به کرنش ۷ درصد ادامه یافت. نمونه‌های ساخته شده با دستگاه تراکم چرخشی سوپرپیو با مقدار فضای خالی ٦ درصد مورد آزمایش قرار گرفت. دستگاه آزمایش UTM و قاب بارگذاری آزمایش خزش دینامیکی در شکل ٤ نشان داده شده است.

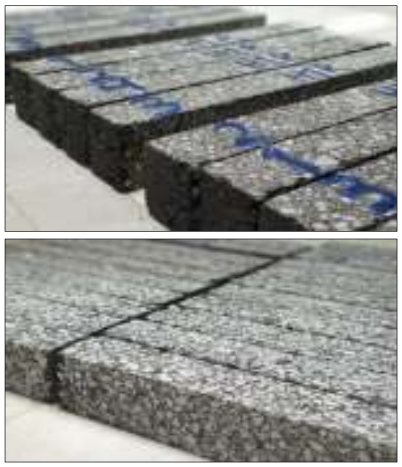
**شکل ٤. دستگاه UTM و قاب بارگذاری آزمایش خزش دینامیکی**

**۲-۳-٤- آزمایش خستگی تیرچه خمشی**

به منظور بررسی اثرات افزودنی‌های لاستیکی بر عملکرد آسفالت‌های با دانه‌بندی متفاوت، آزمایش خستگی تیرچه خمشی چهار نقطه‌ای طبق استاندارد ASTM D7460 انجام شد. این آزمایش به صورت اعمال یک کرنش ثابت تکراری به نمونه تیرچه در حالت کشش خمشی است. این بارگذاری باعث ایجاد کشش در پایین نمونه تیرچه می‌شود که در نتیجه آن ترک‌های ریز اتفاق افتاده و به بالای نمونه گسترده می‌شود که ترک‌خوردگی خستگی روسازی تحت بارهای ترافیکی را شبیه‌سازی می‌کند. یک دستگاه بارگذاری الکترو-پنوماتیکی که در شکل ۵ نشان داده شده به همراه سامانه خودکار ثبت و پردازش داده‌ها شکل موج کرنش نیمه‌سینوسی را اعمال می‌کند. در هر سیکل بارگذاری و در پاسخ به اطلاعات ارسالی از سامانه ثبت و پردازش داده‌ها، دستگاه آزمایش مقدار بار اعمالی را به نحوی تنظیم می‌کند که سطح کرنش در طول آزمایش ثابت بماند. عمر خستگی نقطه‌ای از فرآیند بارگذاری آزمایش است که حاصل‌ضرب تعداد سیکل در سفتی نمونه (S×N) به بیشترین مقدار آن برسد. در این پژوهش، آزمایش در دمای ۲۰ درجه سانتیگراد با فرکانس ۱۰ هرتز در سطوح کرنش ۷۰۰ و ۹۰۰ میکرو برای آسفالت‌های با دانه‌بندی پیوسته و میان‌تهی انجام شد. بر اساس استاندارد مذکور، سطوح کرنش برای آسفالت‌های مختلف به نحوی انتخاب شد که عمر خستگی در محدوده ۱۰۰۰۰ تا ۱۰۰۰۰۰۰ سیکل باشد.

آسفالت‌های مورد آزمایش توسط دستگاه تراکم غلتکی برای رسیدن به فضای خالی هدف ٤ درصد متراکم شده و نمونه‌های تیرچه با ابعاد ۳۹۰ × ٦۳ × ۵۰ میلیمتر از دال آسفالتی برش داده شد. تیرچه‌های آسفالتی مورد آزمایش در این تحقیق در شکل ٦ نشان داده شده است.

**شکل ۵. دستگاه آزمایش خستگی تیرچه خمشی چهار نقطه‌ای**



**شکل ٦. نمونه‌های آزمایش خستگی تیرچه خمشی چهار نقطه‌ای**

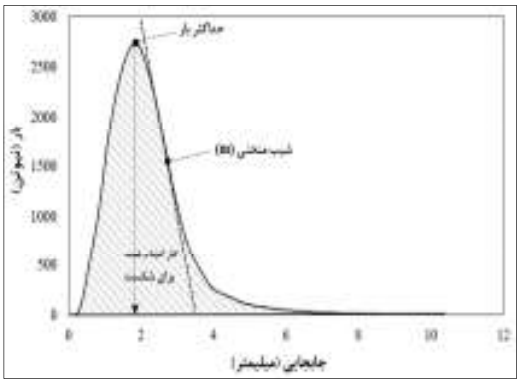
**۲-۳-۵- آزمایش شاخص انعطاف‌پذیری**

آزمایش شاخص انعطاف‌پذیری برای تعیین مشخصه‌های شکست آسفالت در دمای میانی انجام می‌شود. در این آزمایش

انرژی شکست (Gf) و شیب پس از اوج منحنی شکست (m) برای نمونه نیم‌دایره بر اساس استاندارد AASHTO TP124 تعیین می‌شود. مشخصه‌های شکست در دمای میانی برای محاسبه شاخص انعطاف‌پذیری آسفالت (FI) استفاده می‌شود. شاخص انعطاف‌پذیری با استفاده از داده‌های Gf و m محاسبه شده و به شناسایی آسفالت مستعد ترک‌خوردگی کمک می‌کند. انرژی شکست ظرفیت آسفالت را برای مقاومت در برابر خرابی ناشی از ترک نشان می‌دهد. آزمایش بر روی نمونه نیم‌دایره با ترک مصنوعی در امتداد محور عمودی آن انجام می‌شود. در این آزمایش، مغزه روسازی و یا نمونه متراکم دستگاه تراکم چرخشی پس از برش استفاده می‌شود. نمونه دستگاه تراکم چرخشی، قطر و ارتفاع برابر ۱۵ و ١٦ سانتیمتر داشته و با فضای خالی ۷ درصد متراکم می‌شود. ضخامت نمونه‌های نیم‌دایره ۵۰ میلیمتر بوده و در دمای ۲۵ درجه سانتیگراد آزمایش می‌شود. بار در امتداد شعاع قائم نمونه با جابجایی ۵۰ میلیمتر بر دقیقه اعمال می‌شود و در طول آزمایش، مقدار بار و جابجایی آن ثبت می‌شود. قاب بارگذاری و نمونه آزمایش در شکل ۷ نشان داده شده است.

انرژی شکست نشان‌دهنده انرژی مستهلک شده برای گسترش ترک و برابر با نسبت مساحت زیر منحنی شکست به سطح ترک خورده نمونه است. شاخص انعطاف‌پذیری بر اساس محاسبات مربوط به انرژی شکست و شیب پس از اوج منحنی مطابق شکل ۸ و با استفاده از رابطه ۱ محاسبه می‌شود. در این تحقیق نمونه متراکم دستگاه تراکم چرخشی برای برش و آماده‌سازی نمونه‌های نیم‌دایره به ضخامت ۵۰ میلیمتر مورد استفاده قرار گرفت. پس از آماده‌سازی نمونه‌های نیم‌دایره، ترک مصنوعی به طول ۱۵ میلیمتر و عرض ۱/۵ میلیمتر در مرکز وجه مسطح نمونه‌ها ایجاد شد.

**شکل ۷. قاب بارگذاری و نمونه آزمایش شاخص انعطاف‌پذیری**




**شکل ۸. منحنی مقدار بار در مقابل جابجایی خط بار**

$$FI=A\times\frac{Gf}{|m|} \qquad (1)$$

Gf : انرژی شکست، بر حسب $J/m^2$

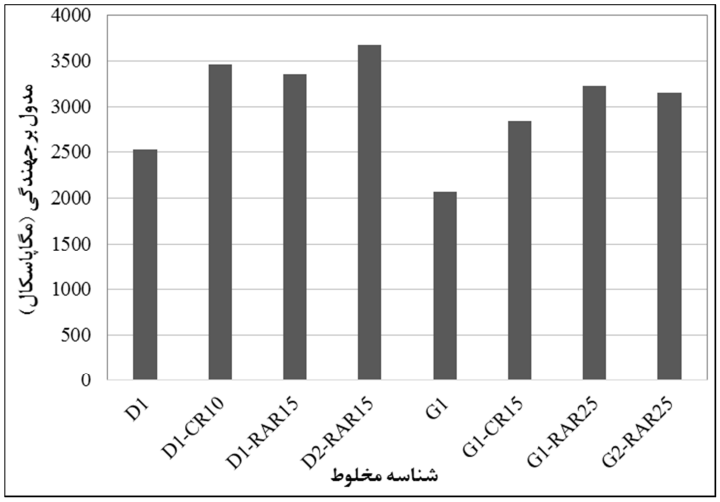
m : شیب پس از اوج منحنی شکست، بر حسب kN/mm

A : ضریب تبدیل واحد و مقیاس، برابر با ۰/۰۱

## ۳- نتایج آزمایش‌های عملکردی آسفالت

### ۳-۱- مدول برجهندگی

میانگین نتایج مدول برجهندگی در دمای ۲۵ درجه سانتیگراد برای آسفالت‌های مختلف در شکل ۹ ارائه شده است. نتایج آزمایش نشان می‌دهد که اصلاح آسفالت با مواد لاستیکی منجر به مقادیر بالاتر مدول برجهندگی شده و آسفالت‌های اصلاح‌شده با RAR نسبت به سایر آسفالت‌های مورد آزمایش، مدول برجهندگی بیشتری دارند. در آسفالت‌های با دانه‌بندی پیوسته، مدول برجهندگی آسفالت‌های D1-CR10 و D1-RAR15 مشابه است. در آسفالت‌های با دانه‌بندی میان‌تهی نیز مدول برجهندگی برای آسفالت‌های G1-CR15 و G1-RAR25 به اندازه ١/٤ و ١/٦ برابر نسبت به آسفالت اصلاح‌نشده افزایش داشته است. با وجود نسبت فیلر به قیر کم در آسفالت‌های با دانه‌بندی نوع دو، این آسفالت‌ها مدول برجهندگی قابل‌توجهی دارند و مقدار آن برای آسفالت‌های D2-RAR15 و G2-RAR25 به اندازه ٤٥ و ٥٢ درصد بیشتر از آسفالت‌های اصلاح‌نشده D1 و G1 است. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که RAR بیشترین اثر را در افزایش سفتی برای آسفالت‌های با دانه‌بندی نوع دو دارد. این نتایج نشان می‌دهد که کاربرد RAR منجر به تولید آسفالت‌های با سفتی زیاد و ظرفیت باربری بیشتر شده و ضخامت طراحی روسازی آسفالتی را کاهش می‌دهد.




**شکل ۹. مقدار مدول برجهندگی آسفالت‌های مختلف**

### ۳-۲- شیارافتادگی

شکل ۱۰ نمونه‌های آزمایش شیارافتادگی چرخ بارگذاری را پس از اتمام آزمایش نشان می‌دهد. نتایج آزمایش برای آسفالت‌های مختلف در جدول ٦ ارائه شده است. در این جدول، شیب شیارافتادگی با محاسبه نرخ تغییرات عمق شیار نمونه در فاصله تعداد ۵۰۰۰ تا ۱۰۰۰۰ سیکل بارگذاری بر حسب میلیمتر در هر ۱۰۰۰ سیکل به دست آمده است. در شکل ۱۱ نیز منحنی عمق شیار در مقابل سیکل بارگذاری برای آسفالت‌های مختلف با دانه‌بندی‌های پیوسته و در شکل ۱۲ برای دانه‌بندی‌های میان‌تهی ترسیم شده است.

**شکل ۱۰. نمونه‌های آزمایش شیارافتادگی پس از اتمام آزمایش**

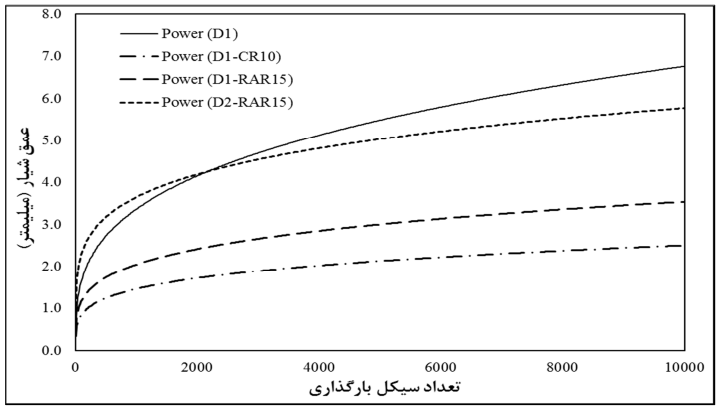
**جدول ٦. نتایج آزمایش شیارافتادگی**

| شناسه مخلوط | عمق شیار (میلیمتر) | | شیب شیارافتادگی ($10^{-3}$ × میلیمتر بر سیکل) |
|---|---|---|---|
| | ۵۰۰۰ سیکل | ۱۰۰۰۰ سیکل | |
| D1 | ٥/٤٦ | ٦/٨٠ | ٠/٢٦٨ |
| D1-CR10 | ٢/١٤ | ٢/٤٠ | ٠/٠٥٢ |
| D1-RAR15 | ٣/٢٣ | ٣/٣٦ | ٠/٠٢٦ |
| D2-RAR15 | ٤/٩٨ | ٥/٨٣ | ٠/١٧٠ |
| G1 | ٤/٠٣ | ٥/٦١ | ٠/٣١٦ |
| G1-CR15 | ٢/٦٦ | ٣/٠٢ | ٠/٠٧٢ |
| G1-RAR25 | ٢/٤٢ | ٢/٧٤ | ٠/٠٦٤ |
| G2-RAR25 | ٣/٨٠ | ٤/١٩ | ٠/٠٧٨ |

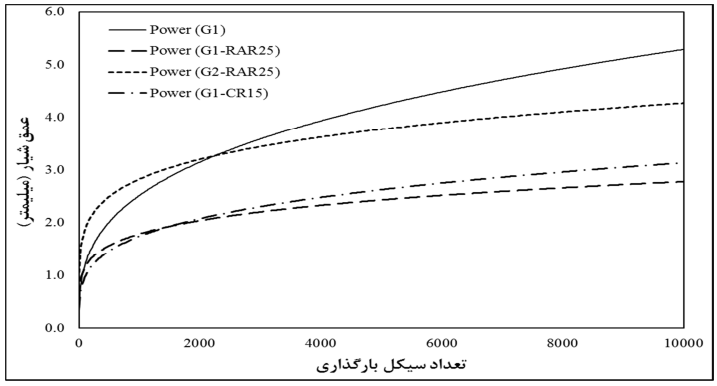
نتایج آسفالت‌های با دانه‌بندی نوع یک در انواع پیوسته و میان‌تهی نشان می‌دهد که مقاومت شیارافتادگی آسفالت‌های لاستیکی بسیار بیشتر از آسفالت‌های اصلاح‌نشده است، به نحوی که عمق شیار آسفالت‌های D1-CR10 و D1-RAR15 به اندازه ۲/۸ و ۲/۰ برابر کمتر از آسفالت اصلاح‌نشده D1 با دانه‌بندی پیوسته است و عمق شیار آسفالت‌های G1-CR15 و G1-RAR25 نیز ۱/۹ و ۲/۰ برابر کمتر از آسفالت اصلاح‌نشده G1 با دانه‌بندی میان‌تهی است. عمق شیار کمتر آسفالت D1-CR10 در مقایسه با آسفالت D1-RAR15 با دانه‌بندی یکسان را می‌توان به مقدار قیر کمتر و ضخامت کمتر قشر قیری این آسفالت نسبت داد. در سوی دیگر عمق شیار نسبتاً کمتر آسفالت G1-RAR25 در

مقایسه با آسفالت G1-CR15 با دانه‌بندی یکسان و مقدار قیر برابر به ضخامت کمتر قشر قیری، ٦/٦ میکرون در مقایسه با ٧/٩ میکرون، مربوط می‌شود. بر این اساس می‌توان گفت که عملکرد شیارافتادگی آسفالت‌های اصلاح شده با پودر لاستیک و RAR در یک نوع دانه‌بندی بسیار شبیه به یکدیگر بوده و افزودنی RAR در شیارافتادگی به اندازه قیر اصلاح‌شده لاستیکی در روش افزودن تر مؤثر است.

نتایج آسفالت‌های با دانه‌بندی نوع دو نیز نشان می‌دهد که کاهش مقدار ریزدانه در دانه‌بندی مصالح سنگی باعث افزایش عمق شیار آسفالت‌های اصلاح‌شده با RAR به اندازه ١/٧ و ١/٥ برابر در دانه‌بندی‌های پیوسته و میان‌تهی گردید، ولی همچنان عمق شیار این مخلوط‌ها کمتر از آسفالت‌های اصلاح‌نشده با دانه‌بندی نوع یک است. آسفالت‌های اصلاح‌شده با RAR با دانه‌بندی نوع دو با وجود قشر قیری ضخیم‌تر و نسبت فیلر به قیر بسیار کمتر، مقاومت شیارافتادگی بیشتری نسبت به آسفالت‌های اصلاح‌نشده نوع یک دارند. بنابراین افزودنی RAR می‌تواند رفتار تغییرشکل دائمی آسفالت با هر نوع دانه‌بندی را بهبود دهد. آنگونه که در شکل‌های ١١ و ١٢ قابل مشاهده است، آسفالت‌های با دانه‌بندی نوع دو در ابتدای آزمایش عمق شیار قابل توجهی را در نتیجه تحکیم اولیه بروز دادند، ولی با توجه به تأثیر RAR بر کاهش شیب منحنی شیارافتادگی، این آسفالت‌ها عملکرد نهایی بهتری نسبت به نمونه‌های شاهد داشتند. این موضوع با مقایسه نتایج عمق شیار و شیب شیارافتادگی برای آسفالت‌های با دانه‌بندی نوع یک و نوع دو در جدول ٦ قابل درک است.




**شکل ١١. عمق شیار در مقابل سیکل بارگذاری برای آسفالت‌های با دانه‌بندی پیوسته**




**شکل ١٢. عمق شیار در مقابل سیکل بارگذاری برای آسفالت‌های با دانه‌بندی میان‌تهی**

### ٣-٣- خزش دینامیکی

در شکل ١٣ نمونه‌های آزمایش خزش دینامیکی پس از پایان بارگذاری نشان داده شده است. عدد روانی برای آسفالت‌های مختلف در جدول ٧ ارایه شده است. همچنین منحنی کرنش تجمعی در مقابل سیکل بارگذاری برای آسفالت‌های با دانه‌بندی

پیوسته در شکل ١٤ و برای آسفالت‌های با دانه‌بندی میان‌تهی در شکل ١٥ ترسیم شده است. بر اساس نتایج آزمایش در آسفالت‌های با دانه‌بندی پیوسته، آسفالت لاستیکی اصلاح شده با پودر لاستیک مقاومت بیشتری نسبت به سایر آسفالت‌ها در مقابل تغییرشکل نشان داد. عدد روانی برای آسفالت‌های D1-CR10 و D1-RAR15 به اندازه ٤/٩ و ٢/٠ برابر بیشتر از آسفالت اصلاح‌نشده D1 به دست آمد. برای آسفالت‌های میان‌تهی، اصلاح آسفالت با پودر لاستیک و افزودنی RAR نتایج مشابهی داشت، به نحوی که عدد روانی آسفالت‌های G1-CR15 و G1-RAR25 به اندازه ١٠/٦ و ١٢/٢ برابر بیشتر از آسفالت اصلاح‌نشده G1 است.

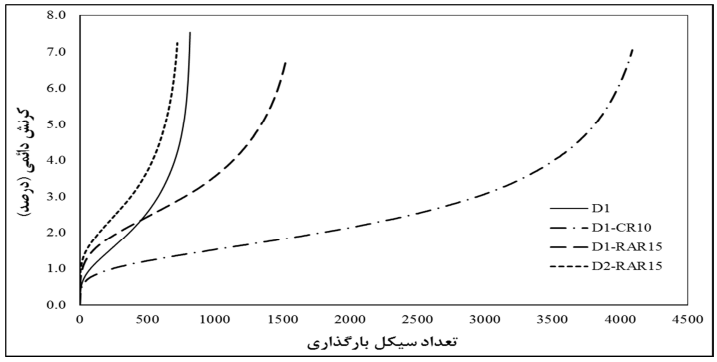
مشابه نتایج شیارافتادگی، بخشی از برتری آسفالت D1-CR10 در مقاومت تغییرشکل دائمی به مقدار قیر کمتر و ضخامت کمتر قشر قیری در مقایسه با آسفالت D1-RAR15 مربوط است. به علاوه عدد روانی بیشتر در آسفالت G1-RAR25 در مقایسه با G1-CR15 با دانه‌بندی و درصد قیر مشابه به ضخامت کمتر قشر قیری نسبت داده می‌شود. آسفالت میان‌تهی با دانه‌بندی نوع دو و حاوی RAR به شناسه G2-RAR25 نسبت به آسفالت اصلاح‌نشده G1 مقاومت بیشتری در برابر تغییرشکل داشته و برای دانه‌بندی پیوسته، آسفالت اصلاح‌شده D2-RAR15 و آسفالت اصلاح‌نشده D1 نتایج مشابهی دارند.

نتایج نشان می‌دهد که اصلاح آسفالت با RAR می‌تواند اثرات منفی ناشی از ضخامت زیاد قشر قیری و نسبت پایین فیلر به قیر را جبران کند. عدد روانی آسفالت‌های D2-RAR15 و G2-RAR25 به اندازه ١/١ و ٢/٨ برابر بیشتر از آسفالت‌های D1 و G1 است. اصلاح آسفالت با افزودنی‌های لاستیکی برای مخلوط‌های با دانه‌بندی میان‌تهی از مخلوط‌های با دانه‌بندی پیوسته مؤثرتر است. آسفالت‌های با دانه‌بندی میان‌تهی و اصلاح شده با RAR مقاومت شیارافتادگی مطلوبی دارند و در مخلوط‌های با دانه‌بندی پیوسته، نتایج برای پودر لاستیک بهتر از افزودنی RAR است. از سوی دیگر، بررسی و مقایسه نتایج آزمایش‌های چرخ بارگذاری و خزش دینامیکی نشان می‌دهد که عدد روانی همبستگی خوبی با مقدار عمق شیار در آزمایش چرخ بارگذاری دارد.

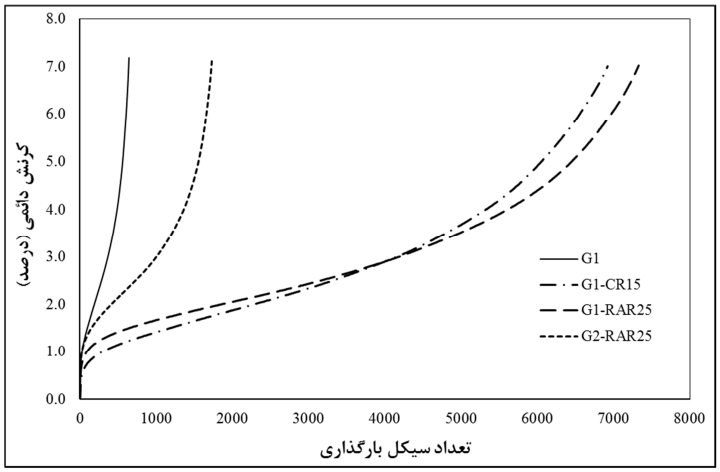
**شکل ١٣. نمونه‌های آزمایش خزش دینامیکی پس از پایان بارگذاری**

**جدول ٧. عدد روانی آسفالت‌های مختلف در آزمایش خزش دینامیکی**

| شناسه مخلوط | عدد روانی (سیکل) |
|---|---|
| D1 | ٢٦٤ |
| D1-CR10 | ١٣٠٤ |
| D1-RAR15 | ٥٤٠ |
| D2-RAR15 | ٢٨١ |
| G1 | ١٩٠ |
| G1-CR15 | ٢٠٠٨ |
| G1-RAR25 | ٢٣٢٠ |
| G2-RAR25 | ٥٢٨ |




**شکل ١٤. منحنی خزش برای آسفالت‌های با دانه‌بندی پیوسته**



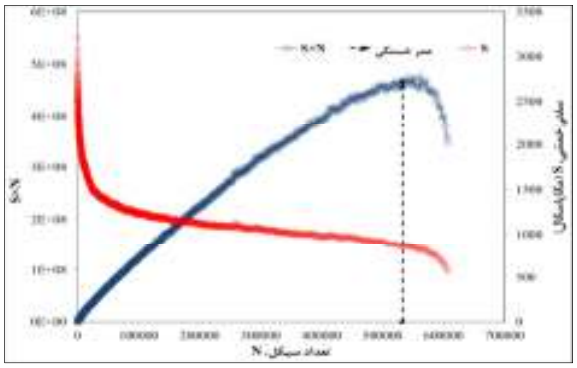

**شکل ١٥. منحنی خزش برای آسفالت‌های با دانه‌بندی میان‌تهی**

### ٣-٤- خستگی تیرچه خمشی

یک نمونه نمودار آزمایش خستگی تیرچه شامل منحنی سفتی خمشی در مقابل سیکل بارگذاری و منحنی حاصلضرب سفتی در سیکل بارگذاری (S×N) در مقابل سیکل بارگذاری در شکل ١٦ نشان داده شده است. نتایج آزمایش خستگی تیرچه خمشی در کرنش‌های ٧٠٠ و ٩٠٠ میکرو برای آسفالت‌های با دانه‌بندی پیوسته و میان‌تهی در جدول ٨ ارائه شده است. مقادیر سفتی خمشی در آزمایش خستگی تیرچه با نتایج مدول برجهندگی آسفالت‌های مختلف هم‌خوانی دارد، به نحوی که سفتی خمشی برای آسفالت‌های اصلاح‌شده لاستیکی افزایش یافته است. در آسفالت‌های با دانه‌بندی پیوسته و میان‌تهی، مخلوط‌های اصلاح‌شده با پودر لاستیک به روش تر نسبت به آسفالت‌های اصلاح‌نشده D1 و G1 عملکرد خستگی بسیار بهتری دارند. با مقایسه نتایج آسفالت‌های اصلاح شده با پودر لاستیک و RAR با دانه‌بندی پیوسته نوع یک و با توجه این که آسفالت D1-CR10 در مقایسه با D1-RAR15 مقدار قیر و ضخامت قیری کمتری دارد، می‌توان نتیجه گرفت که در شرایط یکسان میزان لاستیک، درصد قیر و ض‌خامت قشر قیری، قیر اصلاح شده با پودر لاستیک برتری قابل‌توجهی نسبت به افزودنی RAR در اصلاح رفتار خستگی آسفالت‌های با دانه‌بندی پیوسته دارد.

عمر خستگی آسفالت‌های اصلاح‌شده با RAR به نوع دانه‌بندی بستگی دارد، به این صورت که آسفالت با دانه‌بندی پیوسته نوع دو (D2-RAR15) مقاومت خستگی بالایی از خود نشان داد، کمی بهبود در عمر خستگی آسفالت با دانه‌بندی میان‌تهی نوع دو (G2-RAR25) مشاهده شد و آسفالت‌های با دانه‌بندی نوع یک (D1-RAR15 و G1-RAR25) هیچ افزایشی در عمر خستگی نداشتند. ضخامت کم قشر قیری آسفالت G1-RAR25 در مقایسه با G1-CR15 با دانه‌بندی و درصد قیر یکسان اثر مخرب بر عمر خستگی این آسفالت داشته و تا حد زیادی می‌تواند اختلاف عملکرد این دو آسفالت را توجیه نماید. عمر خستگی آسفالت‌های D1-CR10 و

D2-RAR15 در سطح کرنش ۷۰۰ میکرو به اندازه ٤/٥ و ٢/٥ برابر بیشتر از آسفالت اصلاح‌نشده D1 تعیین شد.



**شکل ١٦. نمونه‌ای از منحنی‌های نتایج آزمایش خستگی تیرچه خمشی**

**جدول ٨. نتایج آزمایش خستگی تیرچه خمشی**

| شناسه مخلوط | کرنش (×۱۰^٦) | سفتی اولیه (مگاپاسکال) | عمر خستگی (سیکل) |
|---|---|---|---|
| D1 | ۷۰۰ | ٢٢٧٣ | ١١٧٣٤٠ |
| D1-CR10 | | ٢٩١٤ | ٥٣٢٥٥٠ |
| D1-RAR15 | | ٢٤٨١ | ١٦٤٨٣٠ |
| D2-RAR15 | | ١٩٦٢ | ٣١٢٥٨٠ |
| G1 | ۹۰۰ | ١٨٤٥ | ١٠٦٨٣٠ |
| G1-CR15 | | ٢١١٨ | ٥١٠٠٨٠ |
| G1-RAR25 | | ٢٤٢٠ | ٨٣٨٣٠ |
| G2-RAR25 | | ٢١٧٩ | ١٣٦٤٩٠ |

### ٣-٥- شاخص انعطاف‌پذیری

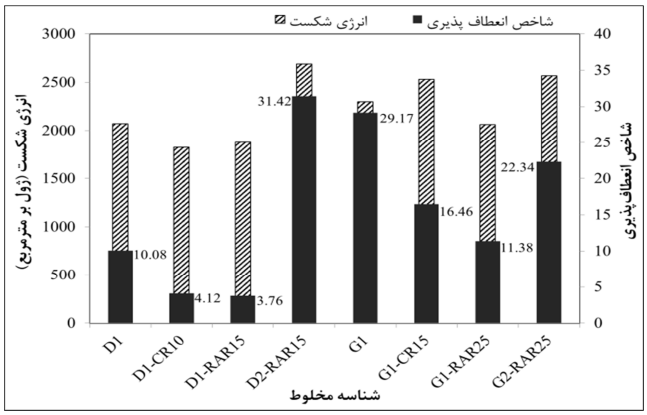
در بخشی از این پژوهش، آسفالت‌های با دانه‌بندی پیوسته و میان‌تهی با انجام آزمایش شاخص انعطاف‌پذیری ارزیابی شدند. این آزمایش برای تعیین اثر افزودنی RAR با روش افزودن خشک بر ویژگی‌های شکست آسفالت‌ها از طریق تعیین شاخص انعطاف‌پذیری (FI) انجام پذیرفت که نتایج آن در شکل ١٧ ارائه شده است. اثر اصلاح آسفالت با مواد لاستیکی برای آسفالت‌های مختلف با نسبت فیلر به قیر و ضخامت قشر قیری متفاوت در این شکل به وضوح نشان داده شده است. مقدار بیشتر شاخص انعطاف‌پذیری نشان‌دهنده مقاومت ترک‌خوردگی بهتر است. از میان آسفالت‌های با دانه‌بندی پیوسته، آسفالت D2-RAR15 با بیشترین مقدار شاخص انعطاف‌پذیری و انرژی شکست بهترین عملکرد ترک‌خوردگی را دارد. مقدار FI برای آسفالت D2-RAR15 به اندازه ٣/١ برابر بیشتر از آسفالت اصلاح‌نشده D1 است. نتایج نشان داد که برای آسفالت‌های با دانه‌بندی پیوسته، اصلاح آسفالت با افزودنی RAR در کنار کاهش نسبت فیلر به قیر می‌تواند منجر به تولید آسفالت بسیار مقاوم در برابر ترک گردد. از سوی دیگر، استفاده از پودر لاستیک و RAR مقدار شاخص انعطاف‌پذیری را برای مخلوط‌های با دانه‌بندی پیوسته تا حد زیادی کاهش داده است و آسفالت‌های D1-CR10 و D1-RAR15 نتایج مشابهی داشتند. در آسفالت‌های با دانه‌بندی میان‌تهی نیز استفاده از افزودنی‌های لاستیکی مقدار شاخص انعطاف‌پذیری را نسبت به آسفالت بدون افزودنی تا حدودی کاهش داده است، به این صورت که مقدار FI برای آسفالت‌های G1-CR15 ، G1-RAR25 و G2-RAR25 به ترتیب، ٧٧ و ١٥٦ و ٣١ درصد کمتر از آسفالت G1 به دست آمده است. شاخص انعطاف‌پذیری کمتر در آسفالت G1-RAR25 در مقایسه با آسفالت G1-CR15 با دانه‌بندی و درصد قیر یکسان به ضخامت کمتر قشر قیری آسفالت حاوی RAR ارتباط دارد و می‌توان نتیجه گرفت که در صورت برابری مقدار قیر و ضخامت قشر قیری، اختلاف مشخصه‌های شکست آسفالت اصلاح شده با پودر لاستیک و RAR در دانه‌بندی‌های میان‌تهی حداقل خواهد بود. آسفالت G2-RAR25 با دانه‌بندی نوع دو شاخص انعطاف‌پذیری بیشتری دارد که با نسبت فیلر به قیر کمتر و ضخامت بیشتر قشر قیری در این آسفالت ارتباط دارد. آسفالت G1-RAR25 نیز بدترین نتایج را دارد و نشان می‌دهد که در آسفالت‌های با دانه‌بندی میان‌تهی که با حداقل مقدار قیر برابر با ٦٪ تهیه شده باشند، استفاده از افزودنی RAR به مقدار قابل‌توجه تا ٢٥ درصد می‌تواند اثرات مخرب بر عملکرد ترک‌خوردگی داشته باشد.

اداره حمل و نقل ایالت ایلینوی در آمریکا مقدار حداقل ٨ را برای شاخص انعطاف‌پذیری رویه آسفالتی در نظر گرفته است. از میان مخلوط‌های با دانه‌بندی پیوسته، تنها آسفالت‌های D1 و D2-RAR15 این معیار را برآورده ساختند. توصیه شده است که برای میان‌لایه‌های آسفالتی که در زیر لایه رویه جهت به تأخیر انداختن ترک‌های انعکاسی اجرا می‌شود، مقدار شاخص انعطاف‌پذیری بسیار بیشتری استفاده شود.

همه آسفالت‌های با دانه‌بندی میان‌تهی که در این پژوهش مورد آزمایش قرار گرفتند، شاخص انعطاف‌پذیری بالایی داشتند و رفتار انعطاف‌پذیر از خود نشان دادند. هر دو آسفالت با دانه‌بندی نوع دو از میان مخلوط‌های با دانه‌بندی پیوسته و میان‌تهی، به دلیل نسبت فیلر به قیر پایین و ضخامت زیاد قشر قیری، شاخص انعطاف‌پذیری

بالایی داشتند. از میان مخلوط‌های با دانه‌بندی میان‌تهی، آسفالت G1-RAR25 رفتار ترد و شکننده دارد، چرا که حاوی ۲۵ درصد افزودنی RAR بوده و ضخامت قشر قیری آن برابر ٦/٦ میلیمتر و بسیار کم است. با توجه به نتایج این پژوهش، آزمایش شاخص انعطاف‌پذیری یک آزمایش مناسب برای ارزیابی ترک‌خوردگی ناشی از شکست آسفالت بوده و اثرات افزودنی‌های لاستیکی را به خوبی نشان می‌دهد.

مقایسه نتایج آزمایش‌های خزش دینامیکی و شیارافتادگی با نتایج آزمایش شاخص انعطاف‌پذیری برای آسفالت‌های با دانه‌بندی مشابه نشان می‌دهد که استفاده از افزودنی‌های لاستیکی شامل پودر لاستیک و RAR بدون تغییر قابل توجه در دانه‌بندی و طرح اختلاط، از یک سو، منجر به بهبود رفتار تغییرشکل دائمی و کاهش شیارافتادگی آسفالت و از سوی دیگر، باعث تضعیف ویژگی‌های شکست آسفالت و افزایش ترک‌پذیری آن می‌شود. بر اساس نتایج و برای دانه‌بندی پیوسته نوع یک، آسفالت‌های D1-CR10 و D1-RAR15 در مکانیزم تغییرشکل دائمی عملکرد بهتری نسبت به آسفالت D1 دارند، در حالی‌که عملکرد این آسفالت در برابر خرابی ترک‌خوردگی بهتر از دو آسفالت دیگر حاوی افزودنی است. این رویه برای آسفالت‌های با دانه‌بندی میان‌تهی نیز دیده می‌شود. لذا همانطور که از نتایج مربوط به آسفالت‌های با دانه‌بندی نوع دو بر می‌آید، اصلاح دانه‌بندی و کاهش مقدار مصالح ریزدانه به منظور افزایش درصد قیر و ضخامت قشر قیری جهت طراحی آسفالت‌های لاستیکی با عملکرد مطلوب در برابر خرابی‌های رایج روسازی آسفالتی امری ضروری است.




**شکل ۱۷. نتایج آزمایش شاخص انعطاف‌پذیری**

## ٤- نتیجه‌گیری

این تحقیق آزمایشگاهی برای ارزیابی مشخصه‌های عملکردی آسفالت‌های اصلاح‌شده با RAR و مقایسه آن با آسفالت‌های اصلاح‌نشده و اصلاح‌شده با پودر لاستیک انجام شده است. آزمایش‌های مدول برجهندگی برای ارزیابی سفتی، خزش دینامیکی و چرخ بارگذاری برای شیارافتادگی، خستگی تیرچه خمشی برای ترک‌خوردگی خستگی و شاخص انعطاف‌پذیری برای ارزیابی ترک ناشی از شکست آسفالت‌های مختلف انجام شد. تحلیل مختصری هم بر روی ضخامت قشر قیری سنگدانه‌های آسفالت صورت گرفت. یافته‌های این تحقیق در ادامه خلاصه شده است.

– اصلاح آسفالت با افزودنی‌های لاستیکی باعث افزایش مدول برجهندگی آسفالت شده و اثر افزودنی RAR بر افزایش مدول برجهندگی آسفالت بیش از پودر لاستیک است.

– افزودنی RAR می‌تواند کاهش مقدار ریزدانه در دانه‌بندی آسفالت را که منجر به کاهش سفتی و ظرفیت باربری لایه آسفالتی می‌شود، جبران کند و کاربرد RAR منجر به تولید آسفالت‌های با سفتی زیاد و ظرفیت باربری بیشتر نسبت به آسفالت‌های با دانه‌بندی معمول می‌شود.

– مقاومت شیارافتادگی آسفالت‌های لاستیکی بسیار بیشتر از آسفالت‌های اصلاح‌نشده است. عملکرد شیارافتادگی آسفالت‌های

اصلاح شده با پودر لاستیک و RAR شبیه به یکدیگر بوده و افزودنی RAR در برابر شیارافتادگی به اندازه قیر اصلاح‌شده لاستیکی با روش افزودن تر مؤثر است.

– کاهش مقدار ریزدانه در دانه‌بندی آسفالت باعث افزایش عمق شیار آن می‌شود؛ با این وجود، استفاده از RAR در آسفالت‌های با مقدار ریزدانه کم منجر به کاهش عمق شیار این آسفالت‌ها نسبت به آسفالت‌های اصلاح‌نشده با دانه‌بندی معمول می‌شود.

– آسفالت‌های لاستیکی نسبت به آسفالت اصلاح‌نشده، مقاومت بیشتری در برابر تغییرشکل دارند. عدد روانی آسفالت‌های لاستیکی حاوی پودر لاستیک و RAR در آزمایش خزش دینامیکی بسیار بیشتر از آسفالت‌های اصلاح‌نشده است.

– آسفالت‌های اصلاح‌شده با پودر لاستیک عملکرد خستگی بهتری نسبت به آسفالت‌های اصلاح‌نشده دارند و در شرایط مشابه مقدار لاستیک، درصد قیر و ضخامت قشر قیری، قیر اصلاح‌شده با پودر لاستیک برتری قابل‌توجهی در مکانیزم خستگی نسبت به افزودنی RAR دارد. عمر خستگی آسفالت‌های اصلاح‌شده با RAR به دانه‌بندی و مشخصات طرح اختلاط آسفالت بستگی دارد.

– استفاده از افزودنی‌های لاستیکی در آسفالت‌های با دانه‌بندی پیوسته و میان‌تهی، شاخص انعطاف‌پذیری را کاهش می‌دهد. در دانه‌بندی پیوسته، با کاهش نسبت فیلر به قیر و استفاده از افزودنی RAR می‌توان آسفالت مقاوم در برابر ترک‌خوردگی تولید کرد. شاخص انعطاف‌پذیری نسبتاً زیاد در آسفالت‌های با مقدار ریزدانه کمتر با ضخامت بیشتر قشر قیری در این آسفالت‌ها ارتباط دارد.

– استفاده از افزودنی‌های لاستیکی بدون تغییر قابل‌توجه در دانه‌بندی و طرح اختلاط، منجر به بهبود رفتار تغییرشکل دائمی و کاهش شیارافتادگی آسفالت از یک سو، و تضعیف ویژگی‌های شکست آسفالت و افزایش ترک‌پذیری آن، از سوی دیگر می‌شود.

– تغییر مشخصات دانه‌بندی و طرح اختلاط به منظور افزایش درصد قیر و ضخامت قشر قیری جهت طراحی آسفالت‌های لاستیکی با عملکرد مطلوب در برابر خرابی‌های رایج روسازی آسفالتی ضرورت دارد.

## ۵- سپاسگزاری

این مقاله هیچ محصول و یا تکنولوژی را ترویج نمی‌کند و نمی‌تواند مبنای مشخصات استاندارد باشد. مؤلفین مقاله از شرکت آزمایشگاه فنی و مکانیک خاک برای انجام آزمایش‌های پژوهش حاضر کمال تشکر و قدردانی را دارند.

## ۶- پی‌نوشت‌ها

1. Reacted and Activated Rubber
2. Illinois Flexibility Index Test, I-FIT
3. Activated Mineral Binder Stabilizer, AMBS

## ۷- مراجع

-California Department of Transportation, (2003), "Asphalt rubber usage guide", Office of Flexible Pavement Materials, Materials Engineering and Testing Services.

-Chen, X. and Solaimanian, M., (2019), "Evaluating Fracture Properties of Crumb Rubber Modified Asphalt Mixes", International Journal of Pavement Research and Technology, Volume 12, No. 4, pp. 407-415.

-Ishai, I., Amit, M., Kesler, T. and Peled, R., (2015), "New Advancements in Rubberized Asphalt Using an Elastomeric Asphalt Extender - Three Case Studies", 6th Rubberized Asphalt Rubber Conference (RAR2015), Las Vegas, 4-7 October.

-Kandhal, P. S., Foo, K. Y. and Mallick, R. B., (1998), "A Critical Review of VMA Requirements in Superpave", National Center for Asphalt Technology, NCAT Report No. 98-1.

-Kedarisetty, S., Biligiri, K. P., and Sousa, J. B., (2016), "Advanced Rheological Characterization of Reacted and Activated Rubber Modified Asphalt Binders", Construction and Building Materials, Volume 122, PP 12-22.

Kedarisetty, S., Saha, G., Biligiri, K. P. and Sousa, J. B., (2017), "Performance Characterization of Reacted and Activated Rubber Dense Graded Asphalt Mixtures", Transportation Research Board 96th Annual Meeting, Washington, 8-12 January.

-Mamlouk, M. and Mobasher, B., (2004), "Cracking Resistance of Asphalt Rubber Mix Versus Hot Mix Asphalt", Journal of Road Materials and Pavement Design, Volume 5, No. 4, pp. 435-452.

-Sousa, J. B., Miranda, H. B. and Silva, F. (2015), "Development of new asphalt mixture ThinGap 9.5 mm with Reacted and Activated Rubber", 6th Rubberized Asphalt Rubber Conference (RAR2015), Las Vegas, 4-7 October.

-Sousa, J. B., Purwadi, A. and Way, G., (2018), "Road Pavement Preservation Trial with Reacted and Activated Rubber at JORR W2 Toll Road-Indonesia", 7th Rubberized Asphalt Rubber Conference (RAR2018), Kruger Park, South Africa, 25-28 September.

-Wang, H., Dang, Z., Li, L. and You, Z., (2013), "Analysis on Fatigue Crack Growth Laws for Crumb Rubber Modified (CRM) Asphalt Mixture", Journal of Construction and Building Materials, Volume 47, pp.1342-1349.

Witczak, M. W., Kaloush, K. E., Pellinen, P. K., El-Basyouny, M. and Von Quinus, H. L., (2002), "Simple Performance Test for Superpave Mix Design", Transportation Research Board, NCHRP Report 465.

Zeiada, W., Souliman, M., Stempihar, J., Biligiri, K. P., Kaloush, K., Said, S. and Hakim, H., (2012), "Fatigue Resistance and Crack Propagation Evaluation of a Rubber-Modified Gap Graded Mixture in Sweden", 7th RILEM International Conference on Cracking in Pavements, Delft, 20-22 June.

-Medina, J., Kaloush, K. and Underwood, S., (2015), "Properties of Activated Crumb Rubber Modified Binders", 6th Rubberized Asphalt Rubber Conference (RAR2015), Las Vegas, 4-7 October.

-Plati, C., Cliatt, B. and Loizos, A., (2019), "Preliminary Study on the Mechanical Properties of an Asphalt Mixture Containing RAR Modifiers", 5th International Symposium on Asphalt Pavements & Environment (APE), Radova, 11-13 September.

-Shah, J., (2018), "Superpave Mix Design and Laboratory Testing of Reacted and Activated Rubber Modified Asphalt Mixtures", Thesis for the Degree Master of Science, Arizona State University.

-Sousa, J. B., Vorobiev, A., Rowe, G. M. and Ishai, I., (2013), "Reacted and Activated Rubber", Transportation Research Record, Journal of the Transportation Research Board, Volume 2371, No. 1, pp. 32-40.

-Sousa, J. B., Vorobiev, A., Ishai, I. and Svechinsky, G., (2012), "Elastomeric Asphalt Extender - A New Frontier on Asphalt Rubber Mixes", 5th Asphalt Rubber Conference (AR2012), Munich, 23-26 October.

# The Effect of Reacted and Activated Rubber on the Performance of Gap and Dense Graded Asphalt Mixtures

*Hamidreza Sahebzamani, Ph.D.,Grad., Faculty of Civil Engineering, University of Tehran, Iran.*
*Nader Mahmoodinia, M.Sc., Grad., K. N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran.*
*Koorosh Naderi, Ph.D., Grad., Department of Civil and Environmental Engineering, Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran.*
*Jorge B. Sousa, Ph.D., Grad., President, Consulpav International, Lisbon, Portugal.*

*E-mail: hsahebzamani@ut.ac.ir*

Received: August 2021-Accepted: November 2021

**ABSTRACTR**

Production and implementation of wet-process rubber modified asphalt is associated with several difficulties all around the world. In recent years, Reacted and Activated Rubber, RAR, has been designed and introduced to the asphalt industry to alleviate the problems involved with the production and implementation of rubber modified bitumen. It is composed of soft bitumen, fine Crumb Rubber and different fillers including hydrated lime and AMBS and is produced by hot blending and activation of rubber particles with an asphalt binder. RAR is added directly to the pug-mill in asphalt plant via a dry mixing process. Although the effect of RAR on asphalt performance has been evaluated with desirable results in different parts of the world, further investigation is required to show its performance for asphalt mixtures with different gradation types. It is attempted in this research to design the dry-method RAR and the wet-process crumb rubber modified asphalts of dense and gap gradations based on the volumetric properties of Super pave gyratory compactor specimens and to evaluate them by performance testing compared to unmodified asphalts. Permanent deformation, fatigue as well as fracture properties of RAR modified asphalts were evaluated and compared to those of unmodified and crumb rubber modified asphalts. The results revealed that rubber modification of asphalt mixtures increases stiffness, decreases permanent deformation and the RAR is as effective in rutting as the rubber modified bitumen. The fatigue life of CR modified asphalts is more than unmodified ones and the fatigue performance of RAR modified asphalts is sensitive to mix gradation. Furthermore, rubber modification reduces flexibility index, increasing asphalt fracture cracking potential. Changing aggregate gradation and mix design characteristics is essential for rubber modified asphalts with an enhanced performance against all pavement distresses.

**Keywords:** Rubber Asphalt, RAR, Super pave, Fatigue, Flexibility Index