

ارزیابی مخلوط‌های آسفالتی مقاوم در برابر سوخت برای استفاده در روسازی فرودگاه

مقاله علمی - پژوهشی

* علی نصرالله تبار آهنگر (نویسنده مسئول)، استادیار، دانشکده مهندسی عمران، موسسه آموزش عالی علوم و فناوری آریان،

بابل، ایران

رضوان باباگلی، استادیار، گروه مهندسی عمران، دانشگاه علم و فناوری مازندران، بهشهر، ایران

محمد مهدی قاسمی، دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی عمران، موسسه آموزش عالی علوم و فناوری آریان، بابل، ایران

*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: alinasrahangar@gmail.com

دریافت: ۱۴۰۴/۱۱/۱۰ - پذیرش: ۱۴۰۵/۰۲/۰۵

صفحه ۳۳۵-۳۷۲

چکیده

هدف از اجرای روسازی، ایجاد سطحی هموار و ایمن برای تردد وسایل نقلیه است. این سطح باید علاوه بر دارا بودن دوام کافی در برابر بارهای ترافیکی، در مقابل عوامل جوی و محیطی نیز مقاومت مناسبی از خود نشان دهد. آسفالت متشکل از مصالح سنگی، فیلر و قیر است؛ اما با گذشت زمان و زوال خواص اجزای تشکیل دهنده، مقاومت آن در برابر تابش خورشید، رطوبت و مواد شیمیایی کاهش می‌یابد. از آنجا که قیر نقش چسباننده در ساختار سنگدانه‌ای مخلوط را ایفا می‌کند، افت کیفیت آن سبب کاهش چسبندگی و تخریب زودرس روسازی می‌شود. افزون بر این، تماس سوخت‌ها و روغن‌های نفتی با سطح آسفالت موجب نرم شدن قیر و تشدید فرسایش سطحی می‌گردد بدین منظور، دو نوع مخلوط آسفالتی با دانه‌بندی‌های پیوسته ۱۹-۰ و ۱۳-۰ میلی‌متر، با استفاده از قیر خالص و قیر پلیمری اصلاح‌شده با پلیمر استایرن-بوتادین-استایرن (SBS) و درجه عملکردی PG 82-22 (معادل PG 82-28FR توصیه شده در استاندارد FAA Item P-404) ساخته و مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج نشان داد که استفاده از قیر پلیمری موجب بهبود قابل توجه دوام مخلوط در برابر بنزین، افزایش مقاومت در برابر رطوبت (TSR) و کاهش تغییر شکل دائمی (شکل‌پذیری یا شیارشدگی) می‌شود. در نمونه‌های با دانه‌بندی ۱۹-۰، استفاده از قیر پلیمری منجر به کاهش ۶۵٫۶٪ در اثرگذاری سوخت بنزین، افزایش ۳۲٫۳٪ در شاخص TSR و کاهش ۲۸٪ در شیارشدگی نسبت به نمونه شاهد گردید. همچنین در نمونه‌های با دانه‌بندی ۱۳-۰، کاهش اثر سوخت به میزان ۵۱٫۱٪، افزایش TSR به میزان ۲۷٫۵٪ و کاهش ۲۱٫۹٪ در شیارشدگی مشاهده شد. نتایج بیانگر نقش مؤثر قیر پلیمری در افزایش دوام و پایداری عملکردی مخلوط آسفالتی در برابر عوامل محیطی و تماس با سوخت‌های نفتی است.

واژه‌های کلیدی: روسازی، مخلوط آسفالت، سوخت، قیر پلیمری، افزودنی آسفالت

۱- مقدمه

سانتیگراد گرم شده و سپس وارد برج تقطیر می‌شود. در این مرحله اجزای سبک آن مانند بنزین، نفت سفید و گازوئیل جدا می‌شود. اجرای سنگین‌تر که مخلوط پیچیده‌ای از

عمده قیر مصرفی در صنعت راه‌سازی از تقطیر نفت خام به دست می‌آید. در مرحله نخست تقطیر، نفت خام درون کوره تحت فشار محیط تا رسیدن به دمای حداکثر ۳۵۰ درجه

مشتقات نفتی مقاوم بوده و دارای ظرفیت باربری بالایی است، اما در بیشتر مواقع به دلیل هزینه‌های بالای این روش، حتی در روسازی فرودگاه‌ها از گزینه رویه آسفالتی استفاده می‌شود. به هر حال، در یک رویکرد سنتی از قطران ذغال‌سنگ برای مقاوم‌سازی رویه آسفالتی در برابر مواد حلال استفاده می‌شد (Yan et al, 2018).

علی‌رغم افزایش مقاومت در برابر حلال‌های نفتی، امروزه از قطران ذغال‌سنگ به دلایلی کمتر استفاده می‌شود. مواد آب‌بندی حاوی قطران ذغال‌سنگ عمر کوتاهی دارند. این مواد دارای ضریب دمایی متفاوتی نسبت به لایه آسفالتی زیرین هستند. در نتیجه بعد از دو یا سه سال به دلیل ترک‌های دمایی نیاز به ترمیم دارد. مطالعات نشان داده است که میزان حلالیت قیر در حلال‌های نفتی با افزودن موادی چون پودر لاستیک و برخی پلیمرها به طور قابل توجهی کاهش می‌یابد. اما استفاده از پلیمرها جهت بهبود خواص قیر، چالش‌هایی نظیر کاهش مدت ماندگاری قیر پس از افزودن پلیمرها و افزایش هزینه را در پی دارد (Merusi et al, Deneuvillers et al, 2003)؛ (2022).

آسفالت مقاوم در برابر حلال‌های نفتی برای اولین بار در هلند مطرح گردیده و در چندین فرودگاه بین‌المللی از جمله فرودگاه کوالالمپور در سال ۱۹۹۶، قاهره در سال ۱۹۹۷ و عدن در سال ۱۹۹۹ استفاده شد. FRA² در ایالات متحده برای اولین بار در فرودگاه لاگوردیا در سال ۲۰۰۲ و سپس در سالهای ۲۰۰۴ و ۲۰۰۵ در فرودگاه بین‌المللی لوگان شهر بوستون در کف آشیانه استفاده شد. FRA در سال ۲۰۰۶ با موفقیت در فرودگاه بین‌المللی داگلاس در شارلوت ایالت کارولینای شمالی و نیز در بهسازی ایستگاه تحقیقات کشاورزی سازمان حمل و نقل ایالت فلوریدا مورد استفاده قرار گرفت. همچنین در سال ۲۰۱۱ در فرودگاه Bob Sykes ایالت فلوریدا جهت بهسازی سطح روسازی هوازده و قدیمی آشیانه هواپیما از آسفالت مقاوم در برابر حلال استفاده شد. در همه پروژه‌ها، FRA عملکرد بسیار خوبی از نظر مقاومت در برابر حلال‌های نفتی نشان داده است. استفاده از آسفالت مقاوم در برابر مواد نفتی در فرودگاه‌ها و سایر پروژه‌ها در کشور آمریکا منجر به معرفی یک طرح آسفالت مناسب گردید.

این طرح به صورت آسفالت اصلاح‌شده پلیمری با حداکثر اندازه سنگدانه‌ای ۱۲ میلیمتر، تراکم ۵۰ ضربه چکش مارشال و فضای خالی کم در حدود ۲ درصد پیشنهاد شده و اجرا می‌شود (Davis et al, 2018).

هیدروکربن‌های با جرم مولکولی بالا و متشکل از قیر و روغن‌های روان‌کننده است، از برج تقطیر خارج می‌شود. در مرحله دوم، این مخلوط تا دمای حداکثر ۴۰۰ درجه سانتیگراد گرم شده و به برج تقطیر در خلاء وارد می‌شود. در این مرحله نیز مواد فرار سبک از بالای برج تقطیر خارج شده و مواد غیر فرار که بخش اعظم آن را قیر تشکیل می‌دهد، تحت عنوان باقیمانده برج خلاء از پایین برج خارج شده و برای مصرف مستقیم در صنعت و یا تولید قیر با درجه‌های مختلف به روش هوادهی به کار می‌رود. از آنجا که قیر پسماند نفت خام است، اجزای سازنده آن نیز مشابه نفت خام بوده و تنها مقدار ترکیبات در قیر و نفت خام متفاوت است، چرا که پالایش نفت خام صرفاً یک فرآیند جداسازی فیزیکی با استفاده از اختلاف نقطه جوش اجزای آن است.

نفت خام شامل چهار جزء اشباع‌ها (پارافین‌ها)، آروماتیک‌های نفتنی (نفتن‌ها)، آروماتیک‌های قطبی (رزین‌ها) و آسفالتن‌ها است که سه جزء اول، فاز مالتن قیر را تشکیل می‌دهد. قیر مخلوطی کلوئیدی از ذرات آسفالتن است که در فاز مالتن پراکنده شده است. آسفالتن سنگین‌ترین جزء قیر و یک ترکیب بسیار قطبی است که در حلال‌های غیرقطبی نظیر n - هپتان بسیار نامحلول و در حلال تولوئن حل‌شدنی است. حلال‌های آلی و نفتی نظیر بنزین، نفت سفید و گازوئیل قطبیت کمی دارند و لذا آسفالتن در آنها حل نمی‌شود. رزین‌ها حدود ۲۳ درصد قیرهای راه‌سازی را تشکیل می‌دهند و بر خلاف آسفالتن در هپتان نرمال محلول هستند، لیکن در حلال‌های نفتی حلالیت کمی دارد. نفتن‌ها (نفتن آروماتیک‌ها) محیطی برای پراکندگی ذرات آسفالتن و حتی رزین است. این جزء که نزدیک به ۶۰ درصد قیرهای راه‌سازی را تشکیل می‌دهد، در بسیاری از حلال‌های آلی و نفتی به راحتی حل می‌شود. اشباع‌ها حدود ۸ درصد قیرهای راه‌سازی را شکل داده و قطبیت بسیار کمی دارد که در حلال‌های نفتی حل‌شدنی است (شرکت نفت پاسارگاد، ۱۳۹۰). قیر در تمامی سوخت‌های مشتقات نفتی حل‌شدنی است. قرار گرفتن آسفالت در معرض سوخت‌ها و روغن‌های نفتی باعث نرم شدن سطح آن، شن‌زدگی و آسیب‌های عمیق‌تر در آسفالت می‌شود و اغلب به عنوان اولین دلیل اضمحلال زود هنگام آسفالت در فرودگاه‌ها، ایستگاه‌های سوخت‌گیری، پارکینگ‌ها و مناطق صنعتی شناخته می‌شود (Giuliani et al, 2009). یکی از راهکارهای رایج، استفاده از روسازی بتنی به جای روسازی انعطاف‌پذیر آسفالتی است. روسازی بتنی در برابر

سطحی نیز شوند (Davis et al, 2018). با توجه به سرطان‌زا بودن قطران ذغال‌سنگ و عدم استفاده آن در اصلاح قیر، نیاز به مواد دیگر جهت افزایش مقاومت آسفالت در برابر حلال‌های نفتی برای استفاده در فرودگاه‌ها، پارکینگ‌ها، ایستگاه‌های سوخت و مناطق صنعتی که ریزش سوخت اتفاق می‌افتد، وجود دارد. مواد آب‌بندی حاوی ترکیبات لاستیکی و اپوکسی از دیگر آب‌بندهای پرکاربرد در صنعت راه‌سازی هستند. استفاده از آب‌بندهای بر پایه رزین نیز به عنوان لایه حفاظتی کاربرد دارد که با توجه به هزینه زیاد مقرون به صرفه نیست. اولین آزمون ارزیابی رفتار قیر خالص و قیر اصلاح شده بعد از غرقاب شدن در سوخت توسط استرنبرگ و همکارانش در سال ۲۰۰۰ معرفی شده است. آنها برخی جنبه‌های بنیادی فعل و انفعالات بین قیر و سوخت را مشخص کردند. همچنین نشان دادند که فرایند انحلال قیر به جذب همزمان سوخت در قیر بستگی دارد. این مسئله در تعیین میزان مقاومت در برابر سوخت‌های نفتی حائز اهمیت است، چرا که سوخت باقیمانده در قیر با اثرات ثانویه آن تأثیر بسزایی بر مقاومت نهایی قیر دارد.

او برای اولین بار با استفاده از یک روشی تجربی رابطه‌ای بین اصلاح‌کننده‌های مختلف مانند قطران ذغال‌سنگ، رزین‌ها و پلیمرهای ترموپلاستیک و مقاومت انحلال در سوخت جت ارائه نمود. جولیان و همکارانش در سال ۲۰۰۸ روشی جهت ارزیابی میزان حلالیت قیرهای پلیمری در سوخت جت معرفی کردند و رفتار ویسکوالاستیک آنها را پس از غرقاب شدن در سوخت تعیین نمودند. با توجه به داده‌های رئولوژیکی قیرها، آنها به این نتیجه رسیدند که بسته به خصوصیات قیر پایه، قیرهای اصلاح‌شده پلیمری مقاومت بیشتری در برابر سوخت دارند (Giuliani et al, 2008).

درصد فضای خالی آسفالت با مقاومت آن در برابر حلال‌های نفتی رابطه‌ی معکوس دارد. نوع قیر نیز بر روی مقاومت در برابر حلال‌های نفتی بسیار مؤثر است و هرچه قیر سفت‌تر باشد، این مقاومت بیشتر می‌شود. زمانی که درجه عملکردی قیر ضعیف‌تر باشد، نوع و جنس مصالح نیز بر روی مقاومت آسفالت در برابر حلال‌ها تأثیرگذار است. نتایج نشان می‌دهد در مواردی که قیر با درجه عملکردی برتر انتخاب می‌گردد، نوع مصالح بر حلالیت آسفالت تأثیر کمتری دارد (Hanson et al, 2009). سیو و همکارانش در سال ۲۰۰۴ و نیز پراتیکو و همکارانش در سال ۲۰۰۸ به ارزیابی میزان حلالیت آسفالت در حلال‌های نفتی پرداختند و با بررسی خصوصیات آسفالت،

چنانچه طراحی و اجرای روسازی به درستی انجام شود، هر یک از انواع آن (صلب، انعطاف‌پذیر، مرکب) روسازی مناسبی برای انواع هواپیمای مسافری خواهد بود. هرچند ممکن است برخی از طراحی‌ها اقتصادی‌تر از انواع دیگر باشد و همچنین عملکرد رضایت‌بخشی داشته باشد، مهندس طراح باید دلایل مستدل و منطقی در ارتباط انتخاب نوع روسازی ارائه نماید. اغلب این دلایل بر مبنای عوامل اقتصادی است که از طراحی‌های مختلف نتیجه می‌شود. چنانچه انتخاب طرح بر مبنای حداقل هزینه باشد، می‌بایست تجزیه و تحلیل هزینه برای دوره طرح صورت گیرد. برای بهبود مقاومت آسفالت در برابر حلال‌های نفتی، ابتدا پلیمرها و اصلاح‌کننده‌های بر پایه رزین مورد استفاده قرار گرفتند. آسفالت پلیمری در مقایسه مواد آب‌بندی با استفاده از امولسیون قطران ذغال سنگ و یا لایه‌های حفاظتی بر پایه رزین که برای سطوح پروازی استفاده می‌گردید، مقاومت بیشتری در برابر حلال‌های نفتی دارد (Newman et al, 2002; Giuliani et al, 2006).

آسفالت از مصالح سنگی، فیلر و قیر تشکیل شده و زمانی که مواد تشکیل دهنده آن شروع به زوال می‌کند، در برابر آسیب‌های ناشی از نور خورشید، رطوبت و مواد شیمیایی مستعدتر می‌شود. هنگامی که قیر به عنوان ماده چسباننده این مخلوط که اسکلت سنگدانه‌ای را در کنار هم نگه می‌دارد، خصوصیات اولیه خود را از دست دهد، عملکرد چسباننده نخواهد داشت. از سوی دیگر، ریزش سوخت‌های نفتی سطوح آسفالتی را دچار فرسایش شدید کرده و خسارت جبران‌ناپذیری را برجا می‌گذارد. سوخت‌ها و روغن‌های نفتی نیز قیر موجود در آسفالت را نرم کرده و باعث می‌شوند سرعت تخریب آسفالت افزایش یابد. معابر و پارکینگ‌ها همواره در معرض نشت مواد نفتی هستند. لذا آسفالت باید به طور مرتب تمیز شود تا مواد شیمیایی مضر نظیر مواد نفتی، قبل از اینکه بتواند سطح آسفالت را حل کرده و باعث آسیب جدی شود، از بین برود. خرابی روسازی ناشی از روغن موتور و سوخت نفتی در مراحل مختلفی رخ می‌دهد و تعمیر آن نیز به میزان خرابی بستگی دارد. هدف از طراحی مخلوط‌های آسفالتی مقاوم در برابر سوخت، ارائه‌ی رویه مقاوم برای روسازی‌هایی است که در معرض نشت مواد نفتی قرار دارند. این مواد حاوی مقدار قابل توجهی از هیدروکربن‌های آروماتیک هستند که سرطان‌زا بوده و برای سلامتی بسیار مضر هستند. همچنین طبیعت تجزیه‌ناپذیر و آلاینده محیط زیست هستند. این نگرانی وجود دارد که استفاده از این مواد باعث آلودگی آب‌های

با استفاده از آزمایش‌های حلالیت و رئولوژیکی قیرها به این نتیجه رسیدند که میزان حلالیت با استفاده از پودر لاستیک بسیار کاهش می‌یابد. این کاهش به جهت جذب مولکول‌های سبک‌تر قیر و محلول در نفت سفید است که در لاستیک حل شده است (Merusi et al, 2022).

تحقیقات نشان می‌دهد که علاوه بر مشخصات قیر، جنس فیلر و نوع دانه‌بندی نیز بر عملکرد شیارشدگی مخلوط سرد آسفالتی تأثیرگذار است. استفاده از فیلر سیمان و دانه‌بندی پیوسته در ساخت مخلوط‌های سرد آسفالتی باعث افزایش چشمگیر مقاومت شیارشدگی مخلوط می‌گردد، به طوری که این مخلوط‌ها عملکرد مشابه و یا حتی بهتر از آسفالت گرم داشته و می‌توانند در بدنه روسازی راه استفاده شوند (Hasanuzzaman et al, 2017). ناگیم و همکاران نشان می‌دهند که استفاده از فیلر خاکستر بادی در مقایسه با سیمان پرتلند تأثیر بیشتری در افزایش مقاومت شیارشدگی مخلوط‌های سرد آسفالتی دارا است (Nagim et al, 2012).

استفاده از فوم پلی اورتان، بتن زود سخت شونده (Perriday et al, 2007) و آسفالت گرم کوگردی (Chavoshian et al, 2017) از دیگر روش‌هایی است که می‌توان برای تعمیر سریع چاله‌های حاصل از بمب به کار برد. همچنین کفپوش به منظور ساخت راه‌های موقتی برای تحمل ترافیک خودروهای نظامی سنگین نیز قابل استفاده می‌باشند (Rushing et al, 2011).

بینگ‌زانگ و همکاران (۲۰۱۶)، تأثیر قطران ذغال‌سنگ بر عملکرد قیر را با استفاده از آزمایشات نقطه نرمی، کشش‌پذیری و درجه نفوذ مورد بررسی قرار دادند. آنها نشان دادند که مقدار ۱۵ درصد قطران ذغال سنگ باعث بهبود چشمگیر خصوصیات قیر از جمله افزایش نقطه نرمی، کاهش درجه نفوذ و کشش‌پذیری می‌گردد. همچنین تأثیر اندازه ذرات قطران ذغال‌سنگ در اصلاح قیر مورد بررسی قرار گرفت و اندازه ذرات بین ۸۰-۶۰ منجر به کمترین مقدار درجه نفوذ و حداکثر کشش‌پذیری و نقطه نرمی گردید (Bingzheng et al, 2021).

دیویس (Davis et al, 2018)، علی‌رغم افزایش مقاومت در برابر حلال‌های نفتی، امروزه از قطران ذغال‌سنگ به دلایلی کمتر استفاده می‌شود. مواد آب‌بندی حاوی قطران ذغال‌سنگ عمر کوتاهی دارند. این مواد دارای ضریب دمایی متفاوتی نسبت به لایه آسفالتی زیرین هستند. در نتیجه بعد از دو یا سه سال به دلیل ترک‌های دمایی نیاز به ترمیم دارد. این مواد حاوی مقدار قابل توجهی از هیدروکربن‌های آروماتیک هستند که

پیش و پس از غرقاب شدن در سوخت، به این نتیجه رسیدند که مقدار و اندازه دانه‌های مصالح سنگی نیز بر روی این مقاومت تأثیرگذار است (Seive et al, 2004; Pratico et al, 2008).

پلاگ و همکارانش در سال ۲۰۰۴ یک روسازی دو لایه متشکل از لایه زیرین نازک متخلخل با ضخامت ۱۵ میلیمتر و لایه رویه میکروسرفیسینگ با مصالح بازالت و حداکثر اندازه دانه‌های ۳ میلیمتر را که هر دو لایه حاوی مواد اصلاح‌کننده بود، مورد ارزیابی قرار دادند. آنها قیر نفتنی را با استفاده از پلیمر³ SBS و افزودنی‌های دیگر اصلاح کردند و سپس قیر امولسیون با مقدار ۶۳ درصد قیر پلیمری و ۳۷ درصد آب تولید کردند. مخلوط میکروسرفیسینگ با مصالح بازالتی و قیرهای امولسیونی معمولی و پلیمری تهیه و نمونه‌های مارشال آماده شد. سپس مقاومت آنها در برابر سوخت با استفاده از یک روش آزمون بومی هلند مورد بررسی قرار گرفت. در این آزمون، جهت ارزیابی مقاومت در برابر حلال‌های نفتی، نمونه‌های مارشال غرقاب در سوخت جت پس از مدت ۲۴ ساعت وزن شدند. نمونه‌های ساخته شده با امولسیون خالص پس از ۲۴ ساعت مضمحل شده و نمونه‌های ساخته شده با امولسیون پلیمری همچنان سالم ماند. نمونه‌های اصلاح شده ۰/۹ درصد و نمونه‌های خالص ۷/۴ درصد کاهش وزن داشتند. مرکز اطلاعات و فناوری حمل و نقل و زیر ساخت‌های کشور هلند در گزارشی حد این کاهش وزن را برای آسفالت‌های مقاوم در برابر مواد شیمیایی کمتر از ۰/۱٪ اعلام کرده است (Plug et al, 2004).

جولیانی و همکارانش در سال ۲۰۰۹ دو نوع قیر پایه را با ۴ و ۶ درصد وزنی از پلیمرهای مختلف اصلاح نمودند. آنها امکان آنالیز کمی ویژگی حلالیت قیرها را بررسی کرده و یک روش آزمون با رویکرد غوطه‌وری قرص قیرها در سوخت جت معرفی کردند. آنها نشان دادند که برخی پلیمرها بهبود قابل توجهی در مقاومت قیرها در برابر سوخت ایجاد می‌کنند. همچنین کلیه قیرها را از نظر مورفولوژی بررسی کرده و برخی از آنها را از طریق کروماتوگرافی مورد ارزیابی قرار دادند. نتایج نشان دادند که تحلیل مورفولوژی قیرهای پلیمری اطلاعات مناسبی از سازگاری قیر و پلیمر ارائه می‌دهد که به طور مستقیم به مقاومت قیر پلیمری در برابر سوخت مرتبط است (Giuliani et al, 2008).

مروسی و همکارانش در سال ۲۰۲۲ به بررسی مقاومت آسفالت اصلاح شده با پودر لاستیک در برابر نفت سفید پرداختند. آنها

آسفالتی در ساخت سریع روسازی تاکسی وی و توقفگاه و عوامل تأثیرگذار بر مقاومت شیارشدگی مخلوط‌های سرد آسفالتی مورد بررسی قرار می‌گیرد. شریفی و همکاران (Sharifi et al, 2023)، در این پژوهش تلاش شده است که با نگاه چندجانبه بر موارد مهم و تأثیرگذار، ضمن رفع نواقص موجود، به تفکیک و گزینش روش‌های متنوع روسازی سطوح پروازی پرداخته شود. برای رسیدن به این هدف، ابتدا تلاش می‌گردد با مروری بر مبانی و پیشینه پژوهش‌های به انجام رسیده در این حوزه، معیارهای مؤثر سنجیده شود و سپس با بررسی مزایا و معایب این روش‌ها، گزینه‌ی منتخب ارائه گردد.

این موضوع به دلیل حصول منافع ایمنی، زیست محیطی و اقتصادی از اهمیت زیادی برخوردار است. متأسفانه تا به امروز در انتخاب یک تکنیک با ویژگی‌های چند معیاره برای استفاده در اولویت‌بندی متد روسازی غفلت شده است. این مسأله، ناخواسته هر فرودگاه را متحمل هزینه‌های هنگفتی می‌نماید.

از آنجا که تبادل شاخص‌ها در اولویت بندی انواع روسازی بر اساس ویژگی‌های خاص آنها یک مسئله چند معیاره غیرجبرانی می‌باشد، حل این مسائل با تحلیل تخصصی پارامترهای مؤثر و بکارگیری دانش تصمیم‌گیری چندمعیاره قابل انجام است، بر این اساس پس از شناسایی معیارها مبتنی بر مبانی نظری و نهایی‌سازی بر اساس نظرات خبرگان، برای وزن‌دهی به معیارها از تکنیک خبره‌سنجی (میانگین وزن ارائه شده توسط خبرگان پژوهش) و با توجه به شرایط مسأله از تکنیک الکترونیک اولویت‌بندی روش‌های روسازی (آلترناتیوهای تصمیم‌گیری) استفاده شده است. یافته‌های پژوهش نشان می‌دهد که ترتیب اولویت در این روسازی‌ها، عبارتند از آسفالت سستی، آسفالت پلیمری، آسفالت ماستیکی، (SMA⁴) بتن سستی، آسفالت لاستیکی، آسفالت سبز، آسفالت متخلخل، بتن منعطف (ECC^۵)، (بتن سبز، بتن اسفنجی که بر این مبنا پیشنهاد می‌گردد از نتایج حاصل برای انتخاب گزینه‌ی مناسب در فرودگاه‌های کشور استفاده شود. اخوان بهابادی (Akhavan-behabadi et al, 2016)، تسهیلات زمینی بخش جدا ناپذیر فرودگاه‌ها بوده که از جمله مهمترین آنها روسازی باند فرودگاه می‌باشند. یکی از مشکلات و خرابی‌های اجتناب ناپذیر روسازی ترک خوردگی است. ترک خوردگی در روسازی‌ها انعطاف پذیر از جمله عوارضی است که در اکثر محوطه‌های پروازی دیده می‌شود. بنابراین، این مسئله اهمیت دارد که با اتخاذ تدابیری سرعت گسترش آن را کاهش داد. در این پژوهش برای دستیابی به این هدف و جهت انطباق نتایج با واقعیت، از اطلاعات میدانی فرودگاه کرمان استفاده گردید و از مقادیر واقعی ضخامت لایه‌ها و چگالی آنها و سایر مشخصات لایه‌ها که با استفاده از

سرطان‌زا بوده و برای سلامتی بسیار مضر هستند. همچنین در طبیعت تجزیه‌ناپذیر و آلاینده محیط زیست هستند. این نگرانی وجود دارد که استفاده از این مواد باعث آلودگی آب‌های سطحی نیز شوند. استفاده از آسفالت مقاوم در برابر مواد نفتی در فرودگاه‌ها و سایر پروژه‌ها در کشور آمریکا منجر به معرفی یک طرح آسفالت مناسب گردید. این طرح به صورت آسفالت اصلاح‌شده پلیمری با حداکثر اندازه سنگدانه‌ای ۱۲ میلی‌متر، تراکم ۵۰ ضربه چکش مارشال و فضای خالی کم در حدود ۲ درصد پیشنهاد شده و اجرا می‌شود. والری و همکاران (Valeri et al, 2022)، جهت ارزیابی بهترین ماده اصلاح‌کننده برای آسفالت‌های متخلخل که به عنوان رویه‌های زهکش مورد استفاده قرار می‌گیرند، سه نوع قیر را مورد آزمایش قرار دادند. آنها سه نوع آسفالت با قیر خالص معمولی، قیر پلیمری و یک قیر خالص مقاوم در برابر سوخت با سفتی زیاد و درجه نفوذ کم تهیه کرده و در دو آزمایش مورد بررسی قرار دادند. مخلوط‌های آسفالتی با ۴/۵ درصد قیر تهیه شده و نمونه‌های استوانه‌ای به قطر ۱۰ سانتیمتر توسط چکش تراکم مارشال با ۵۰ ضربه به هر طرف نمونه ساخته شدند. آزمایش حلالیت در سوخت بر اساس استاندارد EN ۱۲۶۹۷-۴۳ و آزمایش کانتابرو بر اساس استاندارد EN ۱۲۶۹۷-۱۷ برای ارزیابی مقاومت در برابر شن‌زدگی انجام پذیرفت. نتایج نشان دادند که آسفالت پلیمری بیشترین مقاومت را در برابر سوخت و شن‌زدگی پس از آن دارد. شیشه‌بران و گلستانه (Shishebaran et al, 2020)، فرودگاه‌ها یکی از مهم‌ترین مراکز حساس و حیاتی هستند که در شرایط جنگ، مورد تهاجم دشمن قرار می‌گیرند. بنابراین، در شرایط بحرانی نیاز به ساخت و توسعه سریع فرودگاه به منظور انجام نشست و برخاست هواپیماهای جنگی، انجام حملات نظامی، انتقال تجهیزات جنگی، نیروی انسانی و دیگر عوامل ضروری است. در این مطالعه به بررسی مواد، تکنولوژی‌ها و روش‌های ساخت سریع که تاکنون در ساخت روسازی فرودگاه استفاده شده است، پرداخته می‌شود. بدین منظور، روش‌های آنالیز سریع برای شناخت خصوصیات خاک محل، روش‌های آنالیز سریع کیفیت ساخت روسازی، الزامات طراحی روسازی‌های بدون رویه، روش‌های مقاوم‌سازی سریع خاک‌ها جهت به‌کارگیری در ساخت سریع روسازی فرودگاه، کاربرد سیستم کفپوش (ماتینگ) در ساخت و توسعه سریع روسازی هلی‌پد، تاکسی وی، توقفگاه، خط پرواز، رویه هواپیماهای بدون سرنشین و همچنین امکان‌سنجی استفاده از مخلوط‌های سرد

شرایطی مناسب تر می باشد و برای سطوح دیگر نیاز به سطحی با مقاومت کافی و مقاومت در برابر لغزندگی می باشد. آسفالت مرکب (combi_layer)، مشکلات مربوط به ناپایداری و شیارشدگی روسازی را بهبود می بخشد، لایه اصطکاکی متخلخل مقاومت بالایی در برابر صیقل شدن دارد و خطرات ناشی از لغزندگی و ... را به حداقل رسانده، مخلوط های آسفالتی با استخوان بندی سنگدانه ای سبب افزایش دوام، بهبود رفتار در مقابل درجه حرارت های پایین و ... می شود. با وجود پیشرفت های گسترده در زمینه ی بهبود خواص قیر و توسعه ی آسفالت های اصلاح شده، هنوز شناخت جامعی از تأثیر هم زمان نوع قیر، افزودنی پلیمری و دانه بندی بر مقاومت مخلوط های آسفالتی در برابر سوخت های نفتی وجود ندارد. از سوی دیگر، اغلب پژوهش های پیشین صرفاً بر ارزیابی ویژگی های رئولوژیکی قیر یا مقاومت مکانیکی مخلوط متمرکز بوده اند و رفتار عملکردی روسازی در شرایط تماس مستقیم با حلال های نفتی کمتر مورد توجه قرار گرفته است. در این پژوهش با هدف ارتقای دوام روسازی های مورد استفاده در سطوح پروازی و صنعتی، تأثیر استفاده از قیر پلیمری در دو نوع مخلوط آسفالتی گرم با دانه بندی های ۱۹-۰ و ۱۲-۰ میلی متر بر مقاومت در برابر سوخت، رطوبت و تغییر شکل دائمی بررسی شده است. آزمایش های مقاومت در برابر غوطه وری در سوخت بنزین، مقاومت در برابر رطوبت و شیارشدگی با استفاده از دستگاه شیار جای چرخ انجام گرفته است. نتایج حاصل می تواند به درک عمیق تری از مکانیسم بهبود دوام آسفالت های پلیمری و ارائه ی راهکارهایی برای طراحی مخلوط های مقاوم در برابر سوخت های نفتی در روسازی فرودگاه ها و سایر محیط های صنعتی منجر شود.

نتایج آزمایش های به دست آمده استفاده شد. با استفاده از نرم افزار المان محدود روسازی باند فرودگاه و یک شکل ترک مدلسازی شد و از خروجی آن جهت تحلیل روسازی در حالت های مختلف استفاده گردید. ابتدا با جابه جایی بار هواپیمای طرح نسبت به موقعیت ترک محدوده محلی که بارگذاری بیشترین تنش را به ترک وارد می کند به دست آورده و سپس تحلیل های مختلف در این فاصله انجام گرفت و تأثیر تغییر ضخامت آسفالت، تغییر طول ترک و همچنین تغییرات دما بر رفتار ترک بررسی شد. نتایج تغییر طول ترک نشان داد با ۲ برابر شدن طول آن، میزان ضریب شدت تنش K_1 حدود ۱۷ درصد افزایش پیدا می کند و با افزایش ضخامت آسفالت مقدار ضریب شدت تنش کاهش پیدا می کند. به عبارت دیگر با افزایش ضخامت لایه آسفالتی سرعت رشد ترک کاهش پیدا می کند. نتایج نشان می دهند که به ازای هر درجه افزایش دما، میزان تنش متمرکز ۳ درصد کاهش می یابد که نشان دهنده اهمیت پارامتر دما می باشد. بنابراین می توان ساعات پروازی هواپیما را به نحوی تنظیم نمود که در دماهای نزدیک به صفر درجه و کمتر از آن، تعداد پروازها محدود گردند.

کاووسی (۱۳۹۶)، روسازی های متداول در فرودگاه اعم از بتنی صلب، مرکب (نیمه صلب) مانند Combi-layer و آسفالتی (انعطاف پذیر) مانند لایه اصطکاکی متخلخل، مخلوط های آسفالتی با استخوان بندی سنگدانه ای و ... است. برای اجزای فرودگاه هر کدام به نوع خاصی از روسازی نیاز دارد، به عنوان مثال برای توقفگاه، محل سوخت گیری و تعمیر هواپیماها نیاز به مقاومت در برابر پانچ شدن و مقاومت در برابر سوخت و مواد شیمیایی می باشد، در به همین علت در کف سازی آسفالت آن باید با مقاومت زیاد طراحی شده و استفاده از بتن در چنین

۲- روش تحقیق

۲-۱- مواد و مصالح

۲-۱-۱- مصالح سنگی

به منظور انتخاب مصالح سنگی مناسب که بتواند تمام مشخصات لازم را برای تولید آسفالت داشته باشد با بررسی و انجام آزمایش های مرغوبیت مصالح سنگی و آنالیز شیمیایی مصالح سنگی، معدن واقع در علی آباد گلستان انتخاب شد. مطابق بند ۴۰۴-۲، استاندارد P-۴۰۴، استفاده از ماسه طبیعی در مخلوط آسفالتی مقاوم به سوخت مجاز نیست و کل بخش ریزدانه باید از مصالح حاصل از خردایش سنگ تأمین گردد. حذف ماسه طبیعی به منظور افزایش قفل و بست داخلی، کاهش

لغزش بین ذره ای، و کنترل کاهش پایداری در برابر سوخت انجام می شود. بنابراین، کلیه مصالح ریز و درشت مصرف شده در این تحقیق به صورت خرد شده و فاقد ماسه طبیعی تأمین گردیدند تا الزامات استاندارد فرودگاهی رعایت شود. جدول ۱ نتایج تشریح میکروسکوپی سنگ مورد استفاده در تولید مصالح سنگی آسفالت مطابق با روش استاندارد ASTM C294 (روش پیشنهادی ISRM) را شرح می دهد.

جدول ۱. نتایج تشریح میکروسکوپی سنگ

اختصاصات سنگ روی نمونه دستی	سنگ در نمونه دستی به رنگ خاکستری روشن، در سطح تازه شکسته شده فاقد هوازدگی، ساختار آن
عناصر و کانی‌های مشکله سنگ:	آلوکم سنگ را فسیلی و پیژولیت (دانه‌های پوشش دار که تا اندازه چند میلیمتری نیز دیده می‌شوند) و گاهاً اواولیت و اینترکلاست تشکیل می‌دهد.
کانی‌های اصلی، کانی‌های فرعی، کانی‌های کمیاب، قطعات سنگی و چرت	اورتوکم سنگ آهک اسپاری (روشن و درشت بلور) می‌باشد. سنگ فاقد چرت و قطعات سنگی است.
بافت سنگ	اسپاریتی
خمیره یا سیمان سنگ	سیمان اسپاری روشن رنگ
درجه آلتراسیون و ترک‌های میکروسکوپی	فاقد آلتراسیون - دارای ترک ریز میکروسکوپی پر شده از کلسیت
اندازه، شکل، نحوه تماس و جهت گیری دانه‌ها، به هم فشردگی و تخلخل	آلوکم‌ها اکثراً فسیل و بعضاً پیژولیت و اواولیت و اینتراکلاست بوده که بعضی از آن‌ها تا اندازه سه میلیمتر نیز می‌رسد. به هم متصل بوده، اورتوکم آهک اسپاری سنگ نسبتاً فشرده و فاقد تخلخل بالا است.
مچوریتی یا جورشدگی بافتی سنگ	سوپر مچور
منشاء و محیط تشکیل سنگ	رسوبی - محیط تشکیل دریایی و آرام
طبقه‌بندی گروه اصلی سنگ	رسوبی - شیمیایی - بیولوژیکی
نام تخصصی سنگ	از نظر تقسیم‌بندی فولک معادل بایووا، اسپار، دایت و از نظر تقسیم‌بندی دانه‌ای معادل گرینستون

سیلیسی با درجه خلوص بیش از ۹۵٪ می‌باشد و از دیدگاه تشریح نظری سنگ، سنگ سیلیسی به رنگ خاکستری می‌باشد. (دارای سختی متوسط و مدول الاستیسته متوسط)

آنالیز شیمیایی سنگ لاشه معدن توسط دستگاه XRF^۱ انجام شد که نتایج آن در جدول ۲ آورده شده است. با توجه به نتایج آنالیز شیمیایی سنگ، جنس سنگ از نظر شیمیایی سنگ

جدول ۲. نتایج آنالیز شیمیایی معدن سنگ انتخابی

Compound	Wt %
CaO	۰/۳۲
SiO ₂	۵۲/۴۸
MgO	۰/۳۲
Al ₂ O ₃	۰/۱۶
Fe ₂ O ₃	۰/۱۴

SO ₃	۰/۰۱
K ₂ O	۰/۲۳
Na ₂ O	-
MnO	-
P ₂ O ₅	۰/۰۴
SrO	۰/۰۲
Cl	-
TiO ₂	-
L.O.I (Loss on Ignition 1000°C,2h)	۴۶/۲۸

سولفات سدیم (AASHTO-T104)، تعیین درصد شکستگی در یک جبهه و دو جبهه (ASTM-D5821) گوشه‌داری مصالح سنگی (ASTM C1252)، بر روی مصالح سنگی ارسالی انجام پذیرفت که نتایج در جداول ۳ و ۴ درج گردیده است.

آزمایش‌های تعیین حدود ات‌برگ (AASHTO-T89,T90)، تعیین ارزش ماسه‌ای (AASHTO-T176)، تعیین شاخص تطویل و تورق (سنگدانه‌های پهن و دراز) (ASTM -4791) D، تعیین درصد افت وزنی در مقابل سایش به روش لوس آنجلس (ASTM -C131)، تعیین افت وزنی در مقابل

جدول ۳. نتایج آزمایش‌های مرغوبیت مصالح سنگی ۱۹-۰

مقدار / نتیجه	روش استاندارد		مشخصه / آزمون	
	ASTM	AASHTO		
مصالح سنگی درشت‌دانه				
□	C131	T 96	افت وزنی در مقابل سایش	
۵۰۰			نوع دانه‌بندی	به روش لوس آنجلس (درصد)
۱۹			تعداد دور	
۰/۷۳	C88	T 104	درصد سایش	
۰/۵۴	D4791		افت وزنی در مقابل سولفات سدیم (درصد)	
۹۵	D5821		سنگدانه‌های پهن و دراز، نسبت ۵ به ۱ (درصد)	
۹۴			در یک جبهه	شکستگی مصالح سنگی (درصد)
			در دو جبهه	
مصالح سنگی ریزدانه				
N.P	D4318	T 89 T 90	دامنه خمیری (PI)	
-			حد خمیری (PL)	حدود ات‌برگ
غیر قابل تعیین			حد روانی (LL)	
۱/۵۱	C88	T 104	افت وزنی در مقابل سولفات سدیم (درصد)	
۶۴	D2419	T 176	ارزش ماسه‌ای مصالح سیلوی سرد (درصد)	
۴۴/۸	C1252	T 304	گوشه‌داری مصالح سنگی ریزدانه، روش آزمون □ (درصد)	
فیلر				
-	D7928	T 88	مقدار دانه‌های کوچکتر از ۰/۰۰۲ میلیمتر (درصد)	
بدون ناخالصی آلی	C40	T 21	وجود مواد ناخالصی آلی (دارای ناخالصی یا بدون ناخالصی آلی)	

جدول ۴. وزن مخصوص و جذب آب مصالح سنگی

جذب آب (درصد)	وزن مخصوص		مشخصه
	حقیقی	ظاهری	
۰/۸۱	۲/۶۷۹	۲/۷۳۸	مصالح مانده روی الک شماره ۴
۱/۲۰	۲/۶۶۸	۲/۷۵۵	مصالح رد شده از الک شماره ۴ و مانده روی الک شماره ۲۰۰
-	-	۲/۷۸۱	مصالح رد شده از الک شماره ۲۰۰
۲/۶۷۷			وزن مخصوص حقیقی مخلوط مصالح سنگی (G_{sb} یا G_{agg})

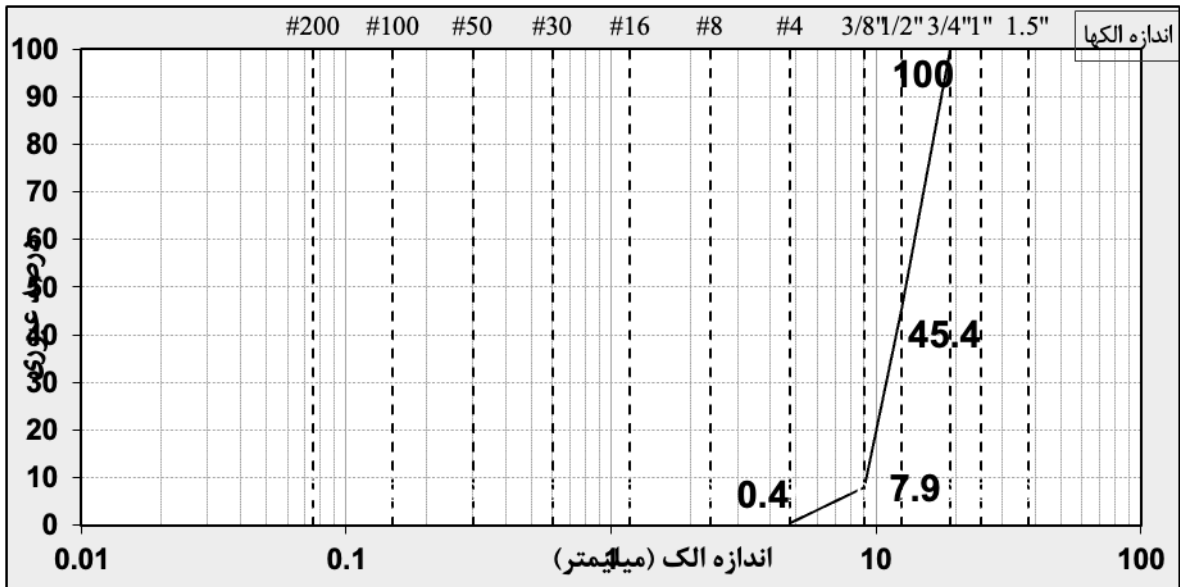
حدود مشخصات دانه‌بندی برای آسفالت ۱۹-۰ و ۱۲/۵-۰ بر اساس بخشنامه اداره کل حمل و نقل فدرال هوانوردی ایالات متحده با موضوع مشخصات استاندارد برای ساخت فرودگاه‌ها ($10H$) در جدول ۵ آمده است.

جدول ۵. حدود مشخصات دانه‌بندی آسفالت ۱۲/۵-۰ و ۱۹-۰ ($10H$)

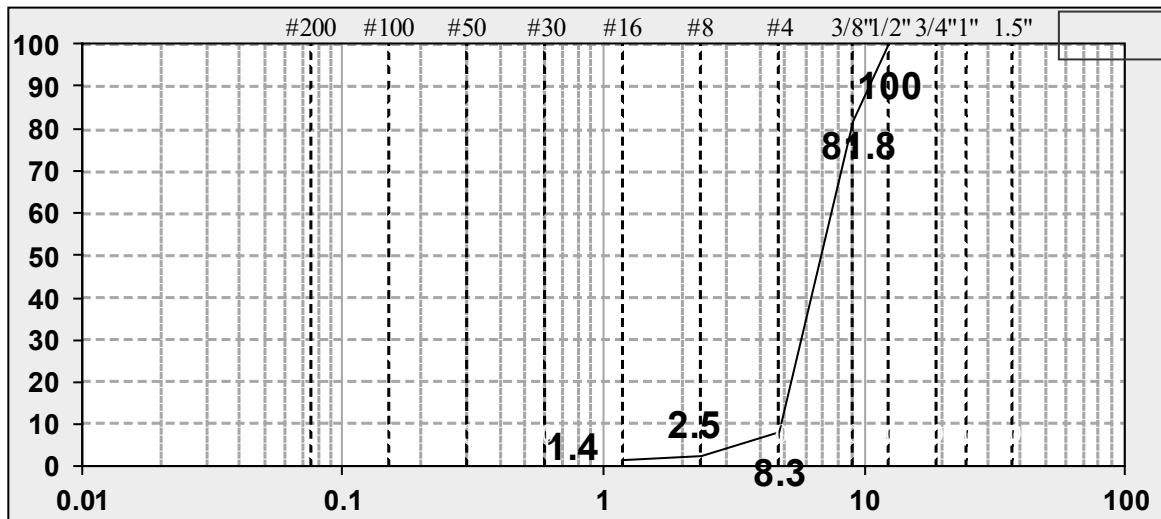
اندازه الک	حدود مشخصات دانه‌بندی ۱۹ میلیمتر	حدود مشخصات دانه‌بندی ۱۲٫۵ میلیمتر
۳/۴ اینچ	۱۰۰	-
۱/۲ اینچ	۱۰۰-۹۰	۱۰۰
۳/۸ اینچ	۸۸-۷۲	۱۰۰-۹۰
شماره ۴	۷۳-۵۳	۷۸-۵۸
شماره ۸	۶۰-۳۸	۶۰-۴۰
شماره ۱۶	۴۸-۲۶	۴۸-۲۸
شماره ۳۰	۳۸-۱۸	۳۸-۱۸
شماره ۵۰	۲۷-۱۱	۲۷-۱۱
شماره ۱۰۰	۱۸-۶	۱۸-۶
شماره ۲۰۰	۶-۳	۶-۳

آسفالت را دارد، فراهم نمود. بدین منظور با انجام آزمایش دانه‌بندی مطابق با استاندارد ASTM C136 بر روی تک تک مصالح سنگی انجام گردید، که منحنی‌های دانه‌بندی حاصل از هر کدام مصالح سنگی در شکل‌های ۱ تا ۵ آورده شده است.

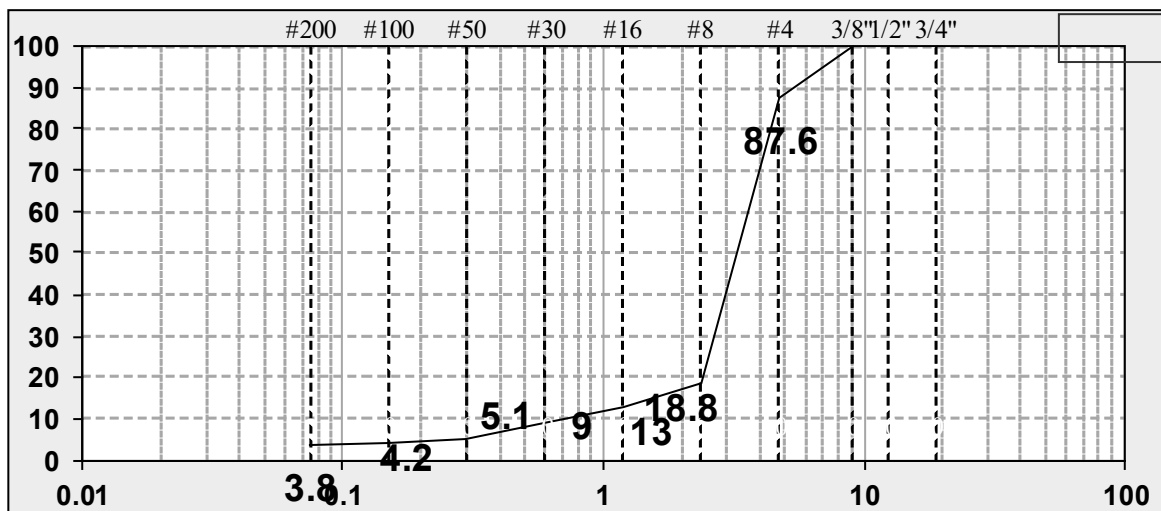
جهت قرار گرفتن مخلوط مصالح سنگی داخل حدود مشخصات، لازم است ابتدا مصالح سنگی درشت، ریز و فیلر دانه‌بندی و با تعیین نسبت‌های مناسب از مصالح فوق، دانه‌بندی مخلوط مصالح سنگی که مشخصات لازم برای تولید



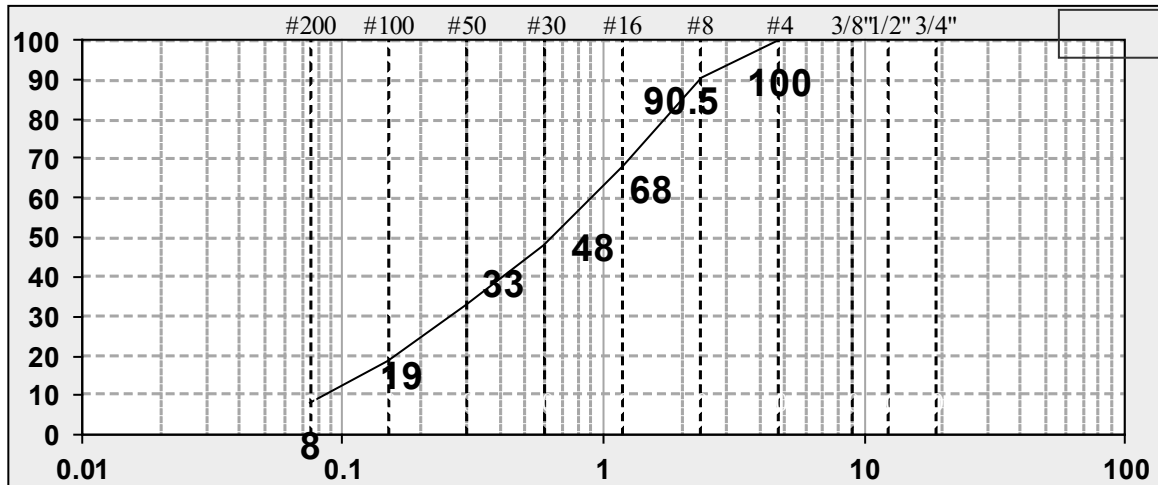
شکل ۱. نمودار دانه‌بندی شن متوسط



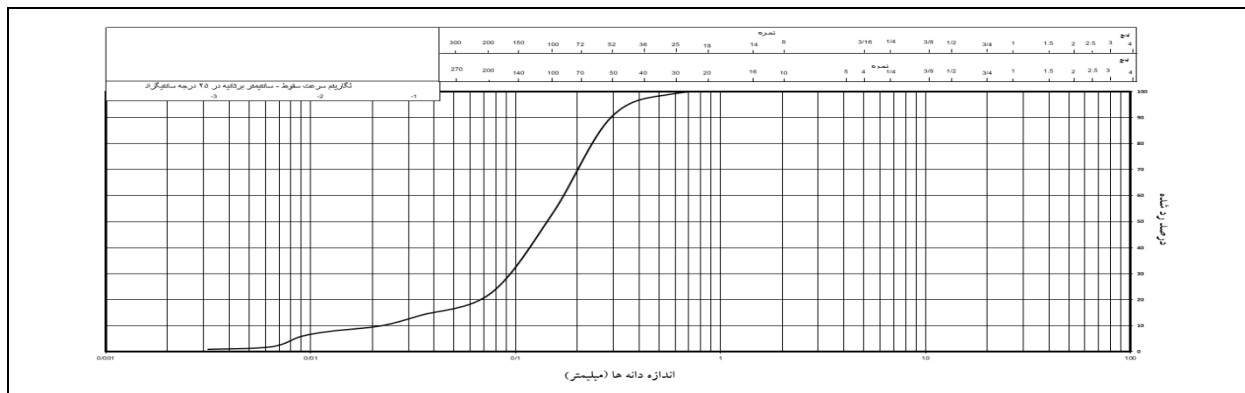
شکل ۲. نمودار دانه‌بندی شن ریز



شکل ۳. نمودار دانه‌بندی ماسه درشت



شکل ۴. نمودار دانه‌بندی ماسه ریز

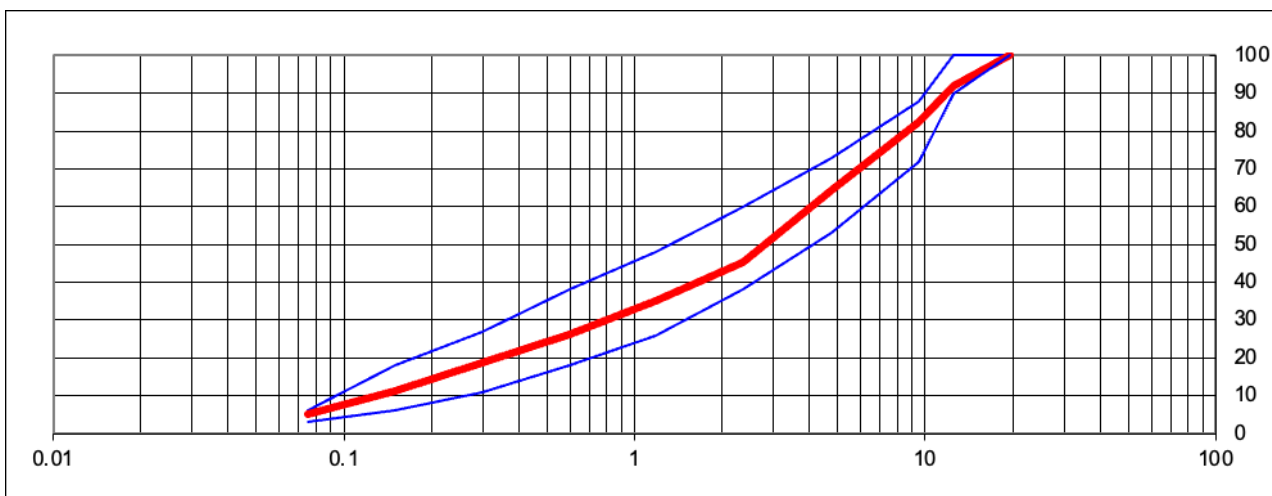


شکل ۵. نمودار دانه‌بندی فیلتر

-تعیین نسبت‌های اختلاط مصالح سنگی

باتوجه به حدود مشخصات دانه‌بندی و در نظر گرفتن دانه‌بندی هر کدام از مصالح سنگی مناسب‌ترین نسبت مصالح سنگی برای طرح اختلاط ۰-۱۹ به شرح ذیل در جدول ۶ و برای طرح اختلاط ۰-۱۲/۵ در جدول ۷ آورده شده است.

برای فیلتر علاوه بر دانه‌بندی بوسیله الک کردن، آزمایش هیدرومتری نیز جهت تعیین اندازه و درصد ذرات کوچکتر از ۷۵ میکرون انجام شده است.



باتوجه به نسبت‌های بدست آمده منحنی دانه‌بندی مخلوط مصالح سنگی همراه با حدود مشخصات دانه‌بندی برای آسفالت ۰-۱۹ میلی‌متر در شکل ۶ و برای آسفالت ۰-۱۲/۵ میلی‌متر در شکل ۷ ترسیم شده است.

نسبت‌های اختلاط مصالح سنگی بشرح ذیل می‌باشد.

- مصالح سنگی ۱۵٪ = ۱۹-۱۲ میلی‌متر

- مصالح سنگی ۲۰٪ = ۱۲-۶ میلی‌متر

- مصالح سنگی ۲۰٪ = ۶-۳ میلی‌متر

- مصالح سنگی ۴۰٪ = ۳-۰ میلی‌متر

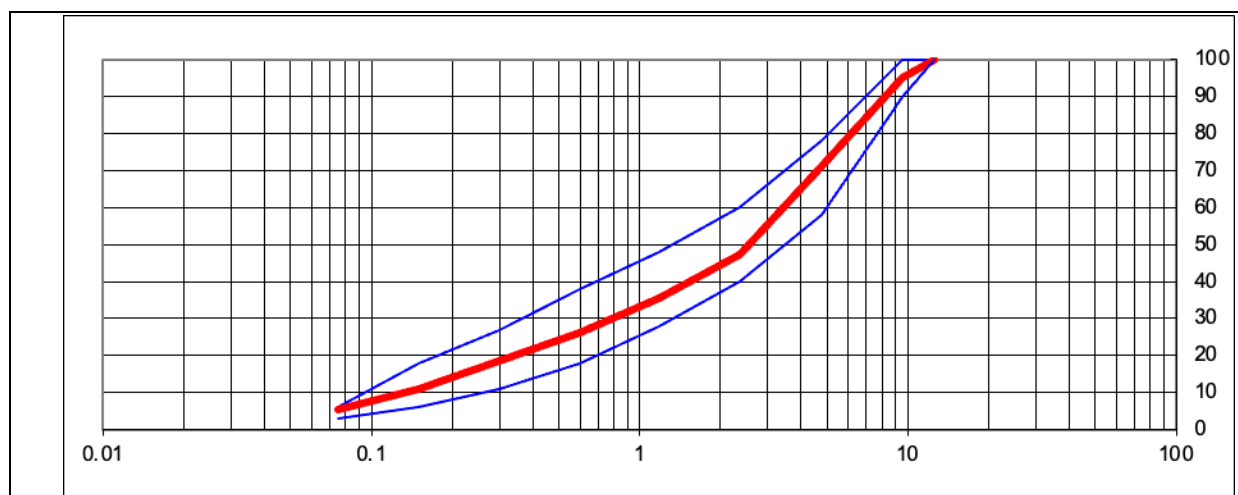
- فیلر مصالح سنگی ۵٪ میلی‌متر

جدول ۶. نسبت‌های اختلاط مصالح سنگی برای طرح اختلاط ۱۹-۰

اندازه الک	حدود مشخصات دانه بندی ۱۹ میلیمتر	درصد وزنی رد شده حاصل از اختلاط با نسبت‌های فوق
۳/۴ اینچ	۱۰۰	۱۰۰
۱/۲ اینچ	۱۰۰-۹۰	۹۲
۳/۸ اینچ	۸۸-۷۲	۸۳
شماره ۴	۷۳-۵۳	۶۴
شماره ۸	۶۰-۳۸	۴۵
شماره ۱۶	۴۸-۲۶	۳۵
شماره ۳۰	۳۸-۱۸	۲۶
شماره ۵۰	۲۷-۱۱	۱۹
شماره ۱۰۰	۱۸-۶	۱۱
شماره ۲۰۰	۶-۳	۵

جدول ۷. نسبت‌های اختلاط مصالح سنگی برای طرح اختلاط ۱۲/۵-۰

اندازه الک	حدود مشخصات دانه‌بندی ۱۲,۵ میلیمتر	درصد وزنی رد شده حاصل از اختلاط با نسبت‌های فوق
۱/۲ اینچ	۱۰۰	۱۰۰
۳/۸ اینچ	۱۰۰-۹۰	۹۵
شماره ۴	۷۸-۵۸	۷۱
شماره ۸	۶۰-۴۰	۴۷
شماره ۱۶	۴۸-۲۸	۳۶
شماره ۳۰	۳۸-۱۸	۲۶
شماره ۵۰	۲۷-۱۱	۱۹
شماره ۱۰۰	۱۸-۶	۱۱
شماره ۲۰۰	۶-۳	۵



شکل ۷. نسبت‌های اختلاط مصالح سنگی و محاسبات برای طرح اختلاط ۱۲/۵-۰

۲-۱-۲- قیر

قیر مصرفی جهت تهیه نمونه‌های آسفالت از نوع قیر خالص با طبقه‌بندی براساس درجه عملکردی آن (PG64-۲۲) می‌باشد. نتایج آزمایش‌های انجام شده بر روی قیر در جدول ۸ آورده شده است.

جدول ۸. نتایج عملکردی قیر مصرفی در ساخت آسفالت

درجه عملکردی	PG۶۴						PG۷۰					
	۱۰	۱۶	۲۲	۲۸	۳۴	۴۰	۱۰	۱۶	۲۲	۲۸	۳۴	۴۰
میانگین حداکثر دمای هفت روزه طرح روسازی (درجه سانتی‌گراد)	< ۶۴						< ۷۰					
حداقل دمای طرح روسازی (درجه سانتی‌گراد)	> -۱۰	> -۱۶	> -۲۲	> -۲۸	> -۳۴	> -۴۰	> -۱۰	> -۱۶	> -۲۲	> -۲۸	> -۳۴	> -۴۰
قیر اصلی												
دمای اشتعال ASTM D92 (درجه سانتی‌گراد)	۳۲۰											
ویسکوزیته چرخشی RV	۱۳۵											
ASTM D4402	۰/۵۰۸ (Pa.s)											
DSR	۶۴						۷۰					
ASTM D7175	۱/۰۹ (kPa) G*/Sinδ						۰/۶۰۷					
قیر باقیمانده آزمون RTFO پیرشدگی اون لایه نازک متحرک قیر ASTM D2872												
تغییر جرم قیر در آزمون پیرشدگی RTFO (%)	-۰/۰۴۲											
DSR	۶۴						۷۰					
ASTM D7175	۲/۲۵ (kPa) G*/Sinδ						۱/۲۳					
قیر باقیمانده آزمایش PAV تسریع پیرشدگی قیر ASTM D6521												
دمای پیرشدگی آزمون □□□ (درجه سلسیوس)	۱۰۰						۱۰۰					
DSR	۳۱	۲۸	۲۵	۲۲	۱۹	۱۶	۳۴	۳۱	۲۸	۲۵	۲۲	۱۹
ASTM D7175	۳۴۲۰ (kPa) G*×Sinδ											
BBR	۰	-۶	-۱۲	-۱۸	-۲۴	-۳۰	۰	-۶	-۱۲	-۱۸	-۲۴	-۳۰
ASTM D6648	۱۵۵ (MPa) S						۲۸۶					
	۰/۳۰۳						۰/۲۷۰					
	ضریب m											

قیر آزمایش شده با مشخصات فوق، معیارهای درجه عملکردی PG۶۴-۲۲ را بر آورده می‌سازد. هم چنین نتایج چگالی و ویسکوزیته قیر در جدول ۹ آورده شده است.

جدول ۹. نتایج قیر مصرفی

مقدار	روش استاندارد		مشخصه
	ASTM	AASHTO	
۱/۰۲۴	D70	T 228	چگالی (گرم بر سانتیمتر مکعب)، در ۲۵ درجه سانتی گراد
۶۵۶	D2170	T 201	کندروانی کینماتیک (سانتی استوکس)، در ۱۲۰ درجه سانتی گراد
۳۰۷	D2170	T 201	کندروانی کینماتیک (سانتی استوکس)، در ۱۳۵ درجه سانتی گراد
۱۲۷	D2170	T 201	کندروانی کینماتیک (سانتی استوکس)، در ۱۶۰ درجه سانتی گراد
۶۳۲	*	*	کندروانی (میلی پاسکال ثانیه)، در ۱۲۰ درجه سانتی گراد
۲۹۳	*	*	کندروانی (میلی پاسکال ثانیه)، در ۱۳۵ درجه سانتی گراد
۱۱۹	*	*	کندروانی (میلی پاسکال ثانیه)، در ۱۶۰ درجه سانتی گراد

تحقیق از پلیمر استایرن-بوتادین-استایرن برای اصلاح قیر خالص استفاده شد. مقدار پلیمر برابر ۵ درصد وزنی قیر پایه در نظر گرفته شد. قیر مصرفی جهت تهیه نمونه‌های آسفالت از نوع قیر خالص با طبقه بندی براساس درجه عملکردی آن (۲۲-۸۲) PG می‌باشد. نتایج آزمایش‌های انجام شده بر روی قیر در جدول ۱۰ آورده شده است. جهت ایجاد اختلاط کامل و یکنواخت، فرآیند پلیمری شدن در دمای ۱۸۰-۱۷۰ درجه سانتی گراد و با استفاده از همزن دوربالا با سرعت ۳۰۰۰ rpm به مدت ۴۵ دقیقه انجام گرفت تا پایداری فازی و تورم کامل زنجیره‌های پلیمر در ماتریس قیر تامین شود. این فرآیند مطابق با الزامات استاندارد ASTM D5976 انجام شده است.

بر اساس استاندارد FAA Item P-404، استفاده از قیر اصلاح‌شده‌ی مقاوم در برابر سوخت الزامی است. قیر مورد استفاده در روسازی‌های در معرض تماس با سوخت می‌بایست از نوع PG 82-28FR یا PG 88-22FR باشد که دارای بازیابی کشسان حداقل ۸۵٪ طبق استاندارد ASTM D6084 و پایداری حرارتی مطابق ASTM D ۷۱۷۳ است. این نوع قیر به صورت ویژه برای کاهش نفوذپذیری و جلوگیری از حل‌شدگی در برابر سوخت‌های هوانوردی (نظیر کروزن و جت سوخت) اصلاح می‌گردد. هدف از استفاده از قیر مقاوم به سوخت، ایجاد ماتریسی با ساختار اتصال-مقاطع و مدول بالا در دمای کارکرد فرودگاهی است تا اختلالات ناشی از تماس مستقیم سوخت در سطح روسازی به حداقل برسد. در این

جدول ۱۰. نتایج عملکردی قیر مصرفی در ساخت آسفالت

درجه عملکردی	PG۸۲						PG۸۸					
	۱۰	۱۶	۲۲	۲۸	۳۴	۴۰	۱۰	۱۶	۲۲	۲۸	۳۴	۴۰
میانگین حداکثر دمای هفت روزه طرح روسازی (درجه سانتی گراد)	< ۸۲						< ۸۶					
حداقل دمای طرح روسازی (درجه سانتی گراد)	> -۱۰	> -۱۶	> -۲۲	> -۲۸	> -۳۴	> -۴۰	> -۱۰	> -۱۶	> -۲۲	> -۲۸	> -۳۴	> -۴۰
قیر اصلی												
دمای اشتعال (°C) ASTM D92	۳۰۶											
دمای آزمون (°C) ویسکوزیته چرخشی RV	۱۳۵											
ویسکوزیته (Pa.s) ASTM D4402	۱/۲۴۵											
رئومتر برشی دینامیکی DSR	۸۲						۸۸					
ASTM D7175 (kPa) G*/Sinδ	۱/۰۳						۰/۶۱۹					
قیر باقیمانده آزمون RTFO پیرشدگی اون لایه نازک متحرک قیر ASTM D2872												
تغییر جرم قیر در آزمون پیرشدگی RTFO (%)	۰/۰۰۹											

رئومتر برشی دینامیکی DSR ASTM D7175	دمای آزمایش (°C)	۸۲						۸۸					
	(kPa) G*/Sinδ	۲/۴۵۰						۱/۰۹۲					
قیر باقیمانده آزمایش PAV تسریع پیرشدگی قیر ASTM D6521													
دمای پیرشدگی آزمون PAV (درجه سلسیوس)		۱۰۰						۱۰۰					
رئومتر برشی دینامیکی DSR ASTM D7175	دمای آزمون (°C)	۴۰	۳۷	۳۴	۳۱	۲۸	۲۵	۴۳	۴۰	۳۷	۳۴	۳۱	۲۸
	(kPa) G*×Sinδ			۹۶۸									
رئومتر تیرچه خمشی BBR ASTM D6648	دمای آزمون (°C)	۰	-۶	-۱۲	-۱۸	-۲۴	-۳۰	۰	-۶	-۱۲	-۱۸	-۲۴	-۳۰
	سفتی خزشی S (MPa)			۱۳۹	۲۶۴								
	ضریب m			۰/۳۰۵	۰/۲۶۴								

۲-۲- طرح اختلاط مخلوط آسفالت

کینماتیک قیر در سه دمای ۱۶۰، ۱۳۵ و ۱۲۰ درجه و رسم منحنی ویسکوزیته قیر نسبت به دما، می‌توان دمای مناسب برای مخلوط کردن آسفالت و همچنین متراکم نمودن آن را بدست آورد. در شکل ۸ نمونه‌های ساخته شده مارشال با درصد قیرهای ذکر شده نشان داده می‌شود.

دمای مناسب برای مخلوط کردن آسفالت، دمایی است که ویسکوزیته قیر $cst \pm 20$ تا 170 سانتی استوکس باشد؛ همچنین دمای مناسب برای تراکم آسفالت، دمایی است که ویسکوزیته قیر $cst \pm 30$ تا 280 سانتی استوکس باشد. در شکل ۹ منحنی ویسکوزیته قیر جهت تعیین دمای اختلاط مصالح سنگی با قیر و همچنین دمای تراکم آسفالت آورده شده است.

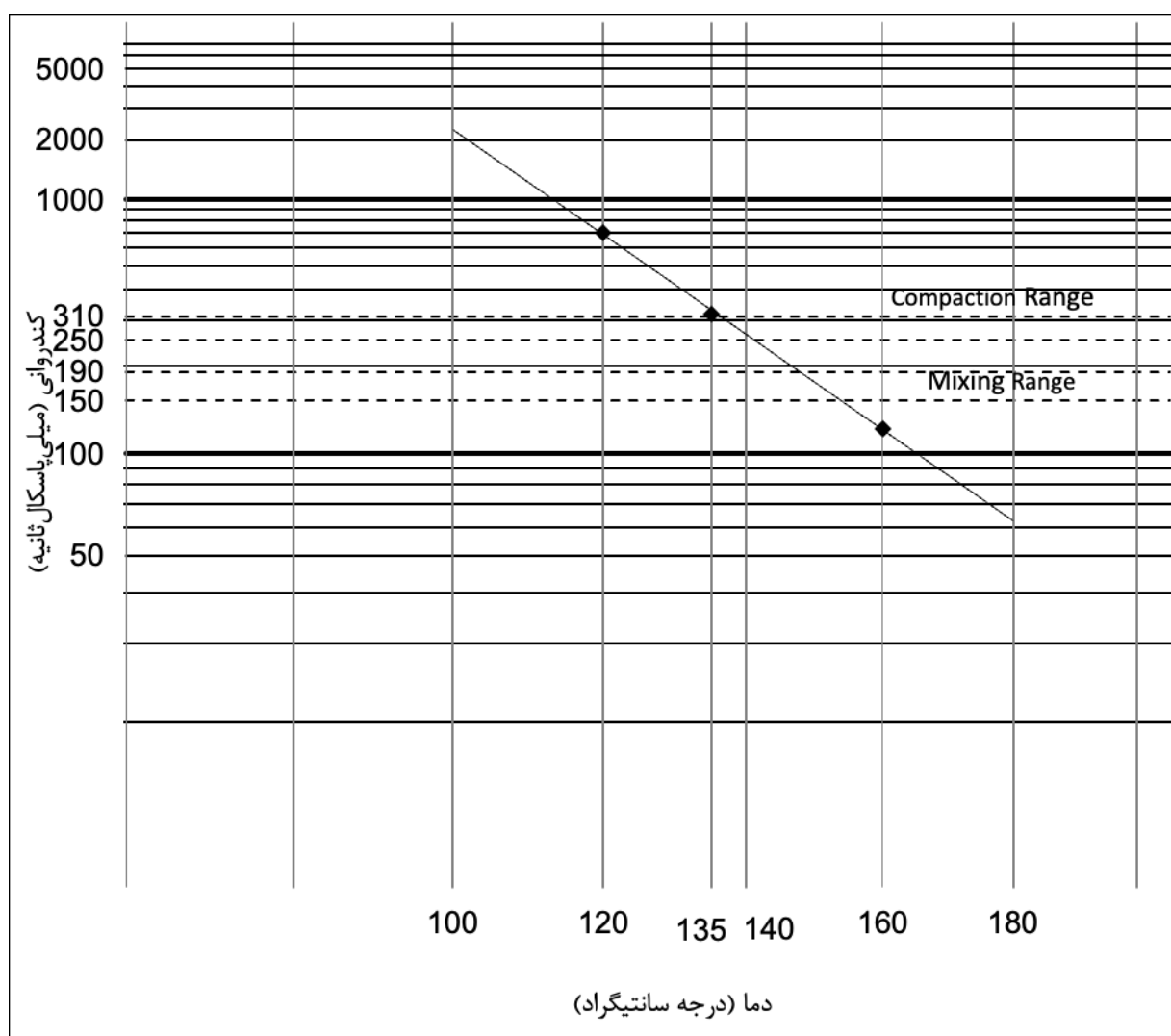
مطابق دستورالعمل P-404، مخلوط آسفالتی مقاوم به سوخت باید با روش مارشال ۵۰ ضربه طراحی شود تا فضای خالی مخلوط در محدوده ۳٫۵-۱٫۵ درصد کنترل گردد. کنترل دقیق فضای خالی، نقش کلیدی در کاهش نفوذ سوخت و افزایش دوام مخلوط دارد. همچنین مقدار حداقل VMA برای مخلوط‌های با حداکثر اندازه اسمی ۱۲٫۵ و ۱۹ میلی‌متر به ترتیب برابر ۱۶٪ و ۱۵٪ توصیه شده است. در این پژوهش نیز مقدار قیر بهینه طوری انتخاب شد که فضای خالی و VMA مطابق حدود استاندارد تأمین گردد.

برای تعیین مقدار قیر بهینه، لازم است نمونه‌هایی از آسفالت با درصدهای مختلف قیر تهیه و متراکم شود. ترجیحاً میزان قیر می‌بایست در درصدهای نزدیک به قیر بهینه (تخمین اولیه) حدود یک و نیم درصد پایین‌تر از قیر بهینه و حدود یک تا دو درصد بالاتر از قیر بهینه و با افزایش تدریجی نیم درصد قیر، تهیه می‌شود. نمونه‌های آسفالت با دستگاه متراکم کننده ژیراتوری یا ۱۰۰ دور چرخش و با نیروی ۶۰۰ کیلو پاسکال و یا با معادل سازی به روش مارشال در حدود ۵۰ ضربه به دو طرف نمونه تهیه می‌گردد. در این تحقیق نمونه‌های آسفالت با استفاده از روش مارشال تهیه گردید. جهت تعیین مقدار قیر بهینه، تعداد ۱۸ نمونه آسفالت (از هر درصد قیر ۳ نمونه) تهیه شده است. با تخمین اولیه مقدار قیر بهینه (حدود ۶ درصد)، با ساخت نمونه‌های آسفالت از درصد قیر ۴/۵ با افزایش نیم درصدی تا ۷/۰ درصد برای توپکا ۱۲-۰ و تعداد ۱۸ نمونه آسفالت (از هر درصد قیر ۳ نمونه) تهیه شده است. با تخمین اولیه مقدار قیر بهینه (حدود ۵/۵ درصد)، با ساخت نمونه‌های آسفالت از درصد قیر ۴ با افزایش نیم درصدی تا ۶/۵ درصد برای سایز ۱۹-۰ تهیه شد.

دمای ساخت و متراکم کردن نمونه‌های آسفالت با توجه به ویسکوزیته قیر تعیین می‌شود. با اندازه‌گیری ویسکوزیته



شکل ۸. ساخت نمونه های مارشال با درصد قیر های مختلف برای انجام آزمایشات



شکل ۹. منحنی ویسکوزیته قیر جهت تعیین دمای اختلاط و تراکم آسفالت



شکل ۱۰. جداسازی نمونه و تفکیک مصالح با توجه به نسبت‌های اختلاط



شکل ۱۱. ساخت نمونه آسفالت

می‌شود. نمونه‌هایی با ابعاد دیگر نیز می‌توان ساخت، خصوصاً اگر اندازه دانه‌های مصالح سنگی بزرگتر از ۲۵ میلیمتر (۱ اینچ) باشد. بعد از عمل‌آوری، مخلوط را در گرمخانه با دمای 135°C (275°F) به مدت ۲ ساعت قرار دهید. نمونه‌ها مطابق با یکی از روش‌های $T 245$ ، $T 247$ یا $ASTM D 3387$ متراکم شوند. مخلوط‌ها بایستی طوری متراکم شوند که درصد فضای خالی آن‌ها 1 ± 0.7 ، یا مشابه فضای خالی روسازی محل باشد. این فضای خالی می‌تواند با تنظیم تعداد ضربات چکش مطابق با $T 245$ یا تغییر ارتفاع فشار و سطح نیرو در $T 247$ یا تغییر تعداد چرخش بر طبق استاندارد $ASTM D 3387$ حاصل شود. این روش دقیقاً می‌بایست قبل از تراکم نمونه‌های آزمایشی، با انجام آزمایش‌های لازم تعیین گردد.

- پیش عمل‌آوری نمونه‌های آزمایشی

- یک گروه به روش خشک آزمایش می‌شوند و گروه دیگر قبل از آزمایش پیش عمل‌آوری می‌شوند.
- نمونه‌های خشک تا زمان آزمایش در دمای آزمایشگاه نگهداری شوند. این نمونه‌ها بایستی در کیسه‌های پلاستیکی دربسته قرار گیرند، پس از آن نمونه‌ها باید به مدت حداقل ۲ ساعت در حمام آب 25°C قرار داده شوند و آنگاه مورد آزمایش قرار گیرند.

- گروه دیگر مطابق مراحل زیر باید عمل‌آوری شوند.

- نمونه‌ها را در ظرف خلاء طوری قرار دهید که از کف ظرف فاصله داشته باشند. دردمای آزمایشگاه ظرف را با آب مقطر پر نمایید، طوری که سطح آب حداقل به میزان $25/4$ میلیمتر (۱ اینچ) از سطح نمونه‌ها بالاتر باشد. خلاءزایی را با فشار مطلق ۱۳ تا ۶۷ کیلو پاسکال ($26-10$ اینچ جیوه) برای مدت کوتاهی (۵ تا ۱۰ دقیقه) اجرا کنید. خلاء را قطع نمایید و نمونه‌ها را به مدت کوتاه (۵ تا ۱۰ دقیقه) در آب قرار دهید.
- وزن مخصوص حقیقی نمونه‌ها را مطابق $T 166$ تعیین کنید.
- وزن اشباع با سطح خشک نمونه‌ها را با وزن اشباع با سطح خشکی که از بخش قبلی بدست آمده است، مقایسه کنید.
- حجم جذب آب را محاسبه نمایید.
- درجه اشباع‌شدگی نمونه‌ها را با استفاده از حجم آب جذب شده و حجم فضای خالی بدست آمده، تعیین می‌کنند. اگر حجم آب بین ۷۰ تا ۸۰ درصد حجم فضای خالی بود، مطابق مرحله بعد عمل می‌شود. اگر حجم آب کمتر از ۵۵ درصد بود،

در اشکال ۱۰ و ۱۱ نحوه ساخت نمونه‌های آسفالت در ظرفی مسی با کف ضخیم جهت انتقال حرارت و جلوگیری از سوخته شدن آسفالت نشان داده شده است. البته گرم کردن مصالح و پخت آسفالت با حرارت غیر مستقیم انجام می‌گردد، برای این کار مصالح سنگی ابتدا در داخل اون گرم و سپس مخلوط کردن مصالح سنگی با قیر بر روی حمام شنی در داخل ظرف مسی انجام می‌شود. امروزه دستگاه‌های مخلوط‌کن مدرن و پیشرفته آزمایشگاهی جهت مخلوط کردن مصالح سنگی با قیر (پخت آسفالت) نیز وجود دارد.
متراکم کردن نمونه‌های آسفالتی، توسط چکش مارشال و مولد (قالب) ۴ اینچ با ۵۰ ضربه چکش به هر دو طرف نمونه انجام شده است.

۳- روش آزمایشگاهی

۳-۱- آزمایش تعیین پایداری مخلوط‌های آسفالتی متراکم شده در برابر خرابی‌های رطوبت AASHTO T283

این روش شامل تهیه نمونه‌های آسفالتی و اندازه‌گیری تغییرات مقاومت کششی قطری آن‌ها در اثر اشباع سازی و عمل‌آوری تسریع شده با آب بر روی مخلوط‌های آسفالتی متراکم شده در آزمایشگاه می‌باشد. نتایج آزمایش را می‌توان جهت پیش بینی استعداد مخلوط‌های آسفالتی در مقابل پدیده عریان‌شدگی و ارزیابی اثر مایعات افزودنی ضد عریان‌شدگی به قیر خالص یا فیلر آهک هیدرات‌های که به مصالح سنگی اضافه می‌شود، بکار برد. نمونه‌های آزمایشی برای هر دسته آسفالت با قیر خالص، آسفالت با قیر پلیمری، تهیه می‌شوند. هر دسته از نمونه‌ها به دو دسته فرعی تقسیم می‌شود، یک دسته فرعی در حالت خشک تحت آزمایش کشش غیرمستقیم آزمایش می‌شوند و دسته فرعی دیگر را قبل از انجام آزمایش کشش غیرمستقیم در معرض اشباع‌شدگی با خلا و سپس یک دوره انجماد و یک دوره آب گرم قرار می‌دهند. شاخص‌های کمی مقاومت کششی غیرمستقیم با استفاده از نتایج حاصله از دو دسته فرعی، خشک و اشباع محاسبه می‌شوند.

برای هر آزمایش حداقل شش نمونه ساخته می‌شود. سه نمونه به روش خشک و سه نمونه بعد از اشباع‌شدگی و در معرض انجماد و ذوب، آزمایش می‌شوند. معمولاً نمونه‌هایی با قطر $101/6$ (۴ اینچ) و ضخامت $63/5$ میلیمتر ($2/5$ اینچ) ساخته

شیمیایی (قرارگیری در بنزین) انجام می‌شود. در مرحله اول نمونه استوانه‌ای به قطر ۱۰۰ میلی‌متر و ارتفاع ۴۰ تا ۶۰ میلی‌متر به مدت ۲ دقیقه $30 \pm$ ثانیه در دمای محیط (۲۷-۲۰ درجه سانتیگراد) درون پیمانه سوخت قرار می‌گیرد. مطابق استاندارد، جهت قرار گرفتن کامل نمونه در معرض سوخت و تراز شدن افقی آن از دو میله به قطر ۸ میلی‌متر و طول ۷۰ میلی‌متر در کف پیمانه استفاده شد. نمونه باید به اندازه حداقل ۱۰ میلی‌متر از دیواره ظرف فاصله داشته و ۵۰ درصد ارتفاع آن داخل سوخت قرار گیرد. نمونه‌های آزمایش پس از ۲ دقیقه قرارگیری درون سوخت از داخل ظرف خارج گردیده و بلافاصله روی سطح آن با دستمال کاغذی تمیز، خشک و سپس وزن در هوا با دقت ۰/۱ گرم تعیین شد. سپس نمونه‌ها دوباره به مدت ۲۴ ساعت $10 \pm$ دقیقه در بنزین قرار گرفته و بعد از ۲۴ ساعت سطح آن با دستمال جاذب خشک شده و توزین شد. و مقدار افت وزنی آنها محاسبه گردید. برای آماده‌سازی نمونه‌های آزمایش به قطر ۱۰ و ارتفاع ۶ سانتی‌متر، مخلوط آسفالتی با استفاده از دستگاه چکش تراکم مارشال با تعداد ۵۰ ضربه به هر طرف نمونه به منظور دستیابی به فضای خالی ۲/۵ درصد متراکم شد. برای مقاومت آسفالت در برابر سوخت. مراحل آزمایش مقاومت آسفالت در برابر سوخت باید به شرح زیر باشد:

۱- نمونه آزمایش را مطابق با الزامات طراحی مخلوط در درصد بهینه قیر ۰/۷ \pm ۲/۵ درصد فضای خالی هوا آماده کنید.

۲- درصد فضاهای خالی هوا را در هر نمونه تعیین کنید، در صورتی که شرایط فوق را برآورده نمی‌کند، دور انداخته و جایگزین کنید. نمونه‌ها را زیر یک فن در دمای اتاق $68-80^{\circ}\text{F}$ ($20-27^{\circ}\text{C}$) به مدت حداقل ۲۴ ساعت خشک کنید.

۳- نمونه را به طور کامل در بنزین با استاندارد ASTM ۳۶۹۹ D در دمای اتاق $68-80^{\circ}\text{F}$ ($20-27^{\circ}\text{C}$) به مدت ۲ دقیقه غوطه ور کنید. (عمل آوری نمونه با صفحه مش فلزی در قوطی رنگ یک گالن (۴ لیتری) رضایت بخش خواهد بود).

۴- پس از غوطه وری ۲ دقیقه \pm ۳۰ ثانیه، نمونه را بردارید و بلافاصله آن را با دستمال کاغذی تمیز روی سطح خشک کنید. سپس بلافاصله وزن موجود در هوا را با دقت ۰/۱ گرم تعیین کنید. این را به عنوان وزن "A" (وزن قبل) گزارش دهید.

۵- نمونه را دوباره به مدت ۲۴ ساعت در بنزین غوطه ور کنید.

۶- پس از ۲۴ ساعت \pm ۱۰ دقیقه نمونه را با احتیاط از ظرف بنزین و سوسپانسیون خارج کرده و روی پارچه یا دستمال

با استفاده از میزان یا زمان خلاء بیشتر تکرار می‌گردد. اگر حجم آب بیشتر از ۸۰ درصد بود، نمونه خراب شده و دور ریخته شود. مراحل را از شروع تکرار کنید.

سپس هریک از نمونه‌های خلاء‌زایی شده اشباع را به خوبی در سفلون پلاستیکی می‌پیچیم. هر نمونه پلاستیک پیچ را درون یک کیسه پلاستیکی قرار داده، ۱۰ میلی متر آب اضافه کرده و درب کیسه را محکم ببندید. کیسه حاوی نمونه را در فریزر در دمای $3^{\circ}\text{C} \pm 1$ -۱۸ به مدت حداقل ۱۶ ساعت نگهداری نمایید. سپس نمونه‌ها را به مدت 24 ± 1 ساعت در حمام آب با دمای 60°C قرار دهید. پس از قرار دادن نمونه‌ها در حمام، هرچه سریع‌تر کیسه پلاستیکی و سفلون روی نمونه‌ها را خارج کنید.

- بعد از قرار دادن نمونه‌ها به مدت 24 ± 1 ساعت در حمام آب 60°C نمونه‌ها را خارج کرده و آن‌ها را در حمام آب با دمای $25 \pm 0/5^{\circ}\text{C}$ به مدت ۲ ساعت قرار دهید. ممکن است لازم باشد یخ به آب اضافه کنید تا جلوی بالا رفتن دمای آب از 25°C را بگیرد، در این حالت نباید بیش از ۱۵ دقیقه برای رسیدن دمای حمام آب به 25°C لازم باشد. مقاومت کششی غیر مستقیم نمونه‌های خشک و اشباع را در دمای 25°C تعیین می‌کنیم. نمونه‌ها را بین نوارهای بارگذاری فولادی قرار داده و سپس نمونه و نوارهای بارگذاری را بین صفحات بارگذاری دستگاه آزمایش قرار می‌دهیم بارگذاری ماشین آزمایش با سرعت ثابت ۵۰ میلی متر در دقیقه (۲ اینچ در دقیقه) اعمال می‌شود. حداکثر بار فشاری نمایش داده شده بر روی دستگاه را ثبت کرده و بارگذاری را ادامه می‌دهیم تا یک ترک قائم در نمونه ظاهر شود. نمونه را از دستگاه برداشته و از محل ترک آن را به دو نیم می‌کنیم. سطح داخلی نمونه را برای رسیدن به شواهدی از مصالح سنگی ترک خورده یا شکسته بررسی می‌کنیم. میزان خرابی رطوبتی را در مقیاس صفر تا پنج تخمین می‌زنیم. (که عدد ۵ بیانگر بیشترین عریان‌شدگی است). شاخص کمی مقاومت مخلوط آسفالتی گرم در برابر اثر مخرب آب به صورت نسبت مقاومت کششی پس از عمل آوری رطوبتی و ذوب و انجماد (اشباع) به مقاومت کششی اولیه دست نخورده (خشک) بیان می‌شود.

۳-۲- آزمایش مقاومت در برابر سوخت

آزمایش مقاومت در برابر سوخت بر روی نمونه‌های متراکم آسفالت با دانه‌بندی پیوسته ۱۲-۰ و ۱۹-۰ میلی‌متر با استفاده از سوخت انجام پذیرفت. این آزمایش در دو مرحله بارگذاری

۷- پس از خشک شدن به مدت ۲۴ ساعت $\pm 10\%$ دقیقه وزن نمونه در هوا با دقت ۰,۱ گرم، این را به عنوان وزن "B" (وزن پس از غوطه وری) گزارش کنید.

کاغذی جاذب قرار دهید. نمونه را زیر یک فن در دمای اتاق به مدت ۲۴ ساعت خشک کنید.

درصد کاهش وزن با غوطه وری در سوخت:

A = وزن قبل

B = وزن بعد

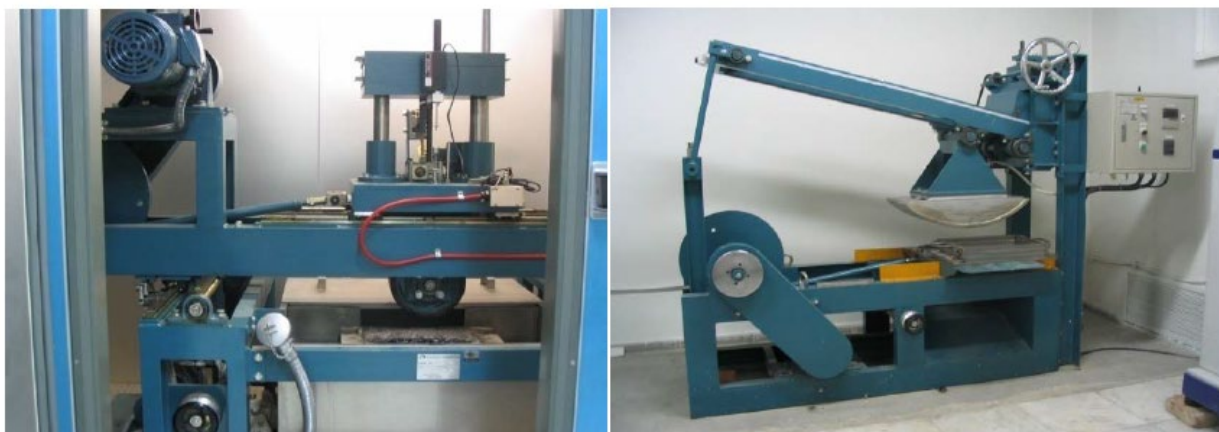
دانه‌بندی ۰-۱۹ و ۶,۵٪ برای دانه‌بندی ۰-۱۲) و با کنترل دقیق فضای خالی در محدوده $2,5 \pm 0,3\%$ (با استفاده از متراکم‌کننده ژیراتوری، $N_{design} = 75$) ساخته شدند. این کنترل برای حذف اثر متغیر فضای خالی بر نتایج مقاومت در برابر سوخت ضروری بود.

آزمایش مقاومت در برابر سوخت مطابق روش ارائه‌شده در بند ۴-۳، ۴-۳، استاندارد P-۴۰۴ انجام شد. محدودیت استاندارد برای کاهش وزن نمونه‌ها کمتر از ۱,۵ درصد است. این معیار مبنای ارزیابی دوام مخلوط در برابر حل‌شدگی و جداسازی ماتریس قیری در تماس مستقیم با سوخت است. نمونه‌های استوانه‌ای مارشال با درصد قیر بهینه (۶,۰٪) برای

۳-۳- آزمایش ویل تراک

گردد. پس از تهیه و استقرار نمونه داخل دستگاه ویل تراک، چرخ بارگذاری در قسمت میانه نمونه قرار گرفت و فشار چرخ بارگذاری برابر ۵/۵ کیلوگرم بر سانتیمتر مربع تنظیم شد و سرعت حرکت رفت و برگشتی چرخ بارگذاری برابر با ۲۷ رفت و برگشت در دقیقه تنظیم گردید. آزمایش‌های شیارشدگی در شرایط خشک و دمای ۶۰ درجه سانتیگراد انجام شد. مقدار ۸۰۰۰ سیکل بارگذاری بر روی نمونه جهت انجام آزمایش انتخاب شد و اعمال گردید. مقدار عمق شیار در سیکل‌های معینی ثبت گردید. در شکل ۴-۲۲ شمایی از دستگاه ویل تراک و متراکم‌کننده ماکروس نشان داده شده است.

برای انجام این آزمایش از دستگاه ویل تراک ماکروس مدل TR-۳۳۲ استفاده گردید. این دستگاه برای بررسی تغییرات خصوصیات مخلوط‌های آسفالتی در دمای بالا، مانند مقاومت در برابر شیارشدگی تحت اثر بار ترافیکی و شرایط رطوبتی طراحی شده است و در شرایط خشک و مرطوب قابل استفاده می‌باشد. برای انجام این آزمایش مخلوط آسفالتی درون قالب‌هایی به ابعاد $30 \times 30 \times 5$ سانتیمتر ریخته شده و سپس بوسیله دستگاه متراکم‌کننده غلتکی به روش رز دادن کوبیده می‌شود. نمونه‌ها به قدری متراکم می‌شوند که چگالی حقیقی آنها برابر چگالی حقیقی بدست آمده با روش چکش مارشال



شکل ۱۲. شمایی از دستگاه ویل تراک و متراکم‌کننده ماکروس

۴- بحث

نتایج طرح اختلاط نمونه‌های آسفالتی

طبق قانون ارشمیدس و مطابق با استاندارد ASTM D2726 تعیین می‌گردد. که در شکل ۱۳، اوزان نمونه‌های مارشال (وزن در آب، وزن خشک در هوا) نشان داده شده است.

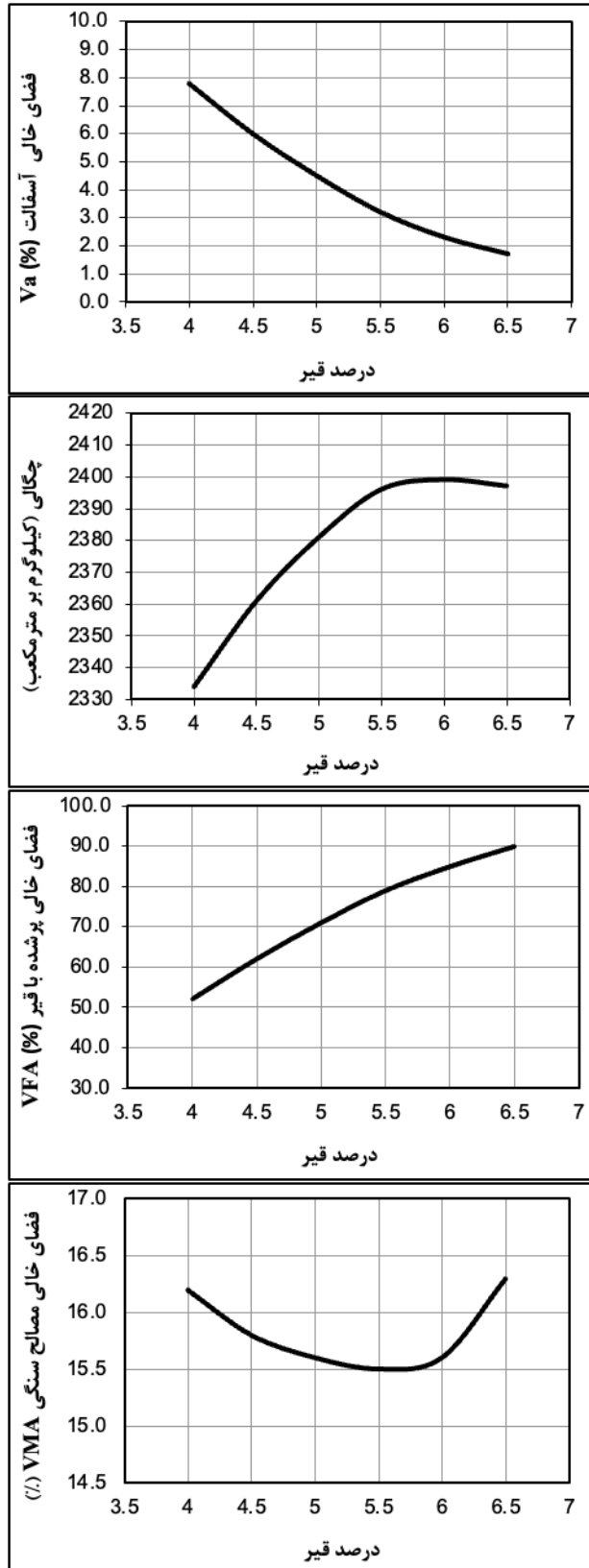
پس از سرد شدن نمونه‌های آسفالت، آن‌ها را توسط جک مخصوص بیرون آورنده از قالب خارج نموده و با استفاده از یک برس، مواد سست آن جدا می‌شود، سپس وزن مخصوص

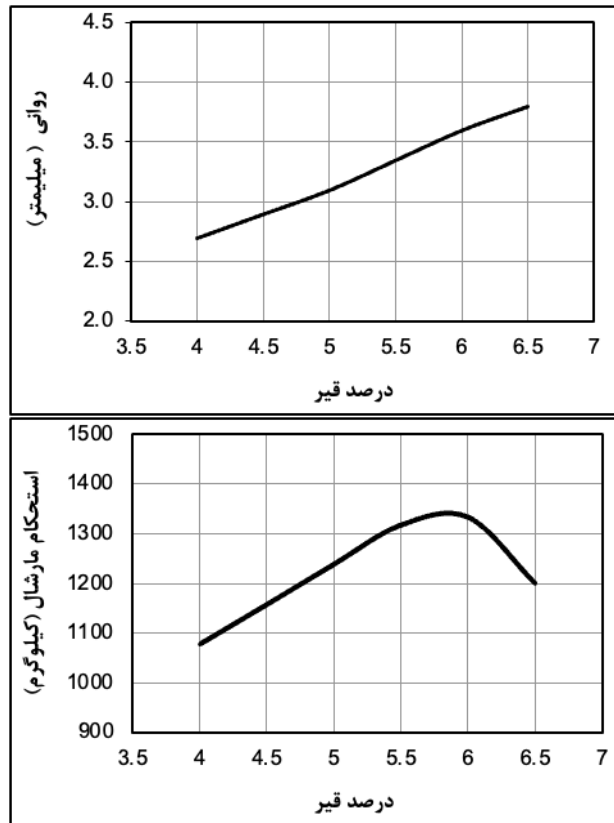


شکل ۱۳. وزن نمونه های مارشال با استفاده از میز ارشمیدس

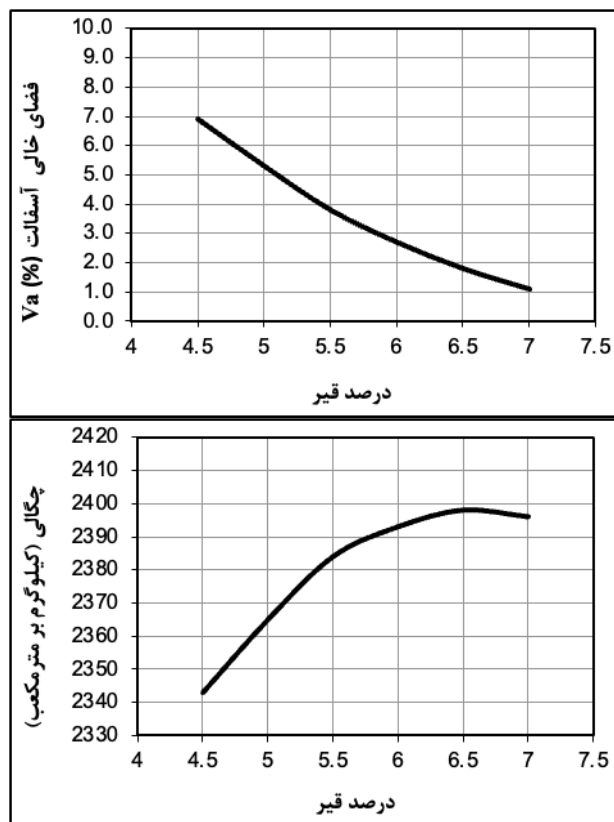
همچنین بر روی نمونه‌ها پس از تعیین وزن مخصوص، آزمایش استحکام و نرمی انجام گرفته است. نمودار نتایج حاصل نسبت به درصد قیر در شکل ۱۴ نشان داده شده است.

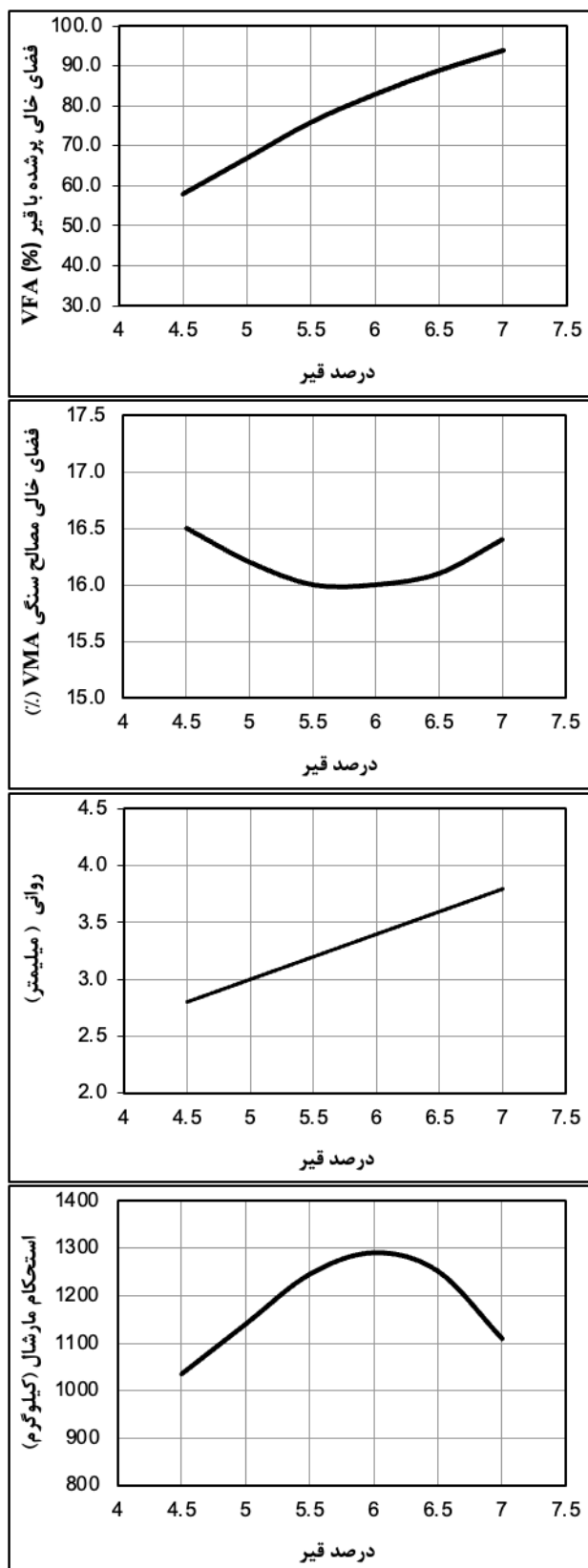
با در نظر گرفتن وزن مخصوص نمونه‌های مارشال آسفالت، وزن مخصوص حقیقی مصالح سنگی و وزن مخصوص قیر، همچنین وزن مخصوص حداکثر مخلوط آسفالتی، می‌توان پارامترهای حجمی مخلوط آسفالتی را تعیین کرد.





شکل ۱۴. منحنی‌های تغییرات ویژگی‌های آسفالت ۱۹-۰ با درصد‌های مختلف با قیر PG





شکل ۱۵. منحنی‌های تغییرات ویژگی‌های آسفالت ۱۲/۵-۰ با درصدهای مختلف با قیر PG

باتوجه به منحنی‌های ترسیم شده در شکل ۱۴ مقدار قیر بهینه برای آسفالت ۱۹-۰ میلی‌متر با مصالح سنگی انتخابی برابر با ۵/۸٪ نسبت به مخلوط آسفالت می‌باشد. این مقدار قیر باید فضای خالی نظیر ۲/۵٪ طبق ۱۰H را برای آسفالت فراهم

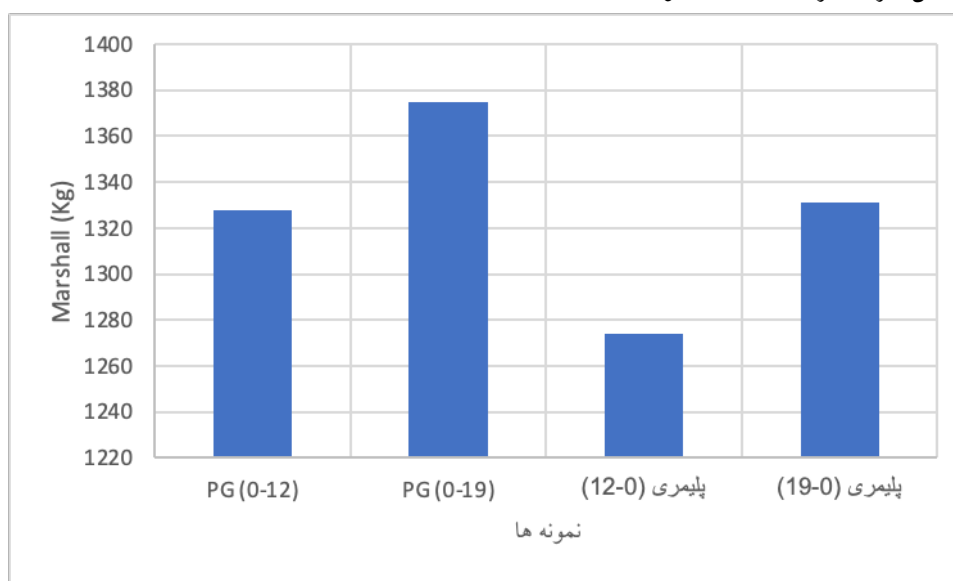
۳۵۸

(۶۰°) اهمیت دارد، زیرا در این دما قیر خالص در حالت نیمه‌مایع رفتار کرده و پیوند سنگدانه‌ها عمدتاً از نوع اصطکاکی است؛ درحالی‌که قیر پلیمری در همین دما ساختار ویسکوالاستیک پایدارتری ایجاد می‌کند. در واقع، اصلاح قیر با پلیمر سبب انتقال مکانیسم گسیختگی از سطح تماس قیر-سنگدانه به داخل ماتریس قیر می‌شود. در نتیجه، انرژی شکست در نمونه‌های اصلاح‌شده افزایش یافته و مخلوط در برابر بارگذاری ماندگار پایداری بیشتری از خود نشان می‌دهد. همچنین، با افزایش ویسکوزیته قیر پلیمری، مهاجرت قیر در اطراف سنگدانه‌ها کاهش یافته و فیلم قیری ضخیم‌تر و یکنواخت‌تری ایجاد می‌شود که مقاومت کششی و برشی ناحیه تماس را افزایش می‌دهد. به همین دلیل، مشاهده می‌شود که تفاوت بین دانه‌بندی‌های ۱۲-۰ و ۱۹-۰ در نمونه‌های دارای قیر پلیمری نسبتاً اندک است؛ زیرا اثر تقویت‌کنندگی پلیمر بر چسبندگی قیر و قفل‌وبست سنگدانه‌ها، اثر تغییر اندازه مصالح را تحت‌الشعاع قرار داده است. این رفتار نشانگر آن است که در حضور قیر اصلاح‌شده، پارامترهای مرتبط با ساختار میکروسکوپی قیر نقش غالب‌تری نسبت به ویژگی‌های ماکروسکوپی دانه‌بندی در تعیین پایداری مخلوط ایفا می‌کنند.

نماید؛ همچنین حداقل مقدار VMA (درصد فضای خالی بین مصالح سنگی) را تأمین نماید. این مقدار حداقل برابر با ۱۵٪ می‌باشد. با توجه به منحنی‌های ترسیم شده در شکل ۱۵ مقدار قیر بهینه برای آسفالت ۱۲/۵-۰ با مصالح سنگی انتخابی برابر با ۶٪ نسبت به مخلوط آسفالت می‌باشد. این مقدار قیر باید فضای خالی نظیر ۲/۵٪ طبق ۱۰H را برای آسفالت فراهم نماید؛ همچنین حداقل مقدار VMA (درصد فضای خالی بین مصالح سنگی) را تأمین نماید. این مقدار حداقل برابر با ۱۶٪ می‌باشد تا بتواند مقدار قیر مناسب جهت پوشش لازم بر روی مصالح سنگی را فراهم نماید.

نتایج آزمایش مقاومت مارشال

نتایج حاصل نشان می‌دهد که افزایش مقاومت مارشال در مخلوط‌های حاوی قیر پلیمری، بیش از آنکه ناشی از تغییرات دانه‌بندی باشد، مستقیماً از تغییر ماهیت رئولوژیکی و چسبندگی قیر ناشی می‌شود. افزودن پلیمر SBS با ایجاد ساختار شبکه‌ای در فاز مالتن قیر، موجب افزایش مدول برشی، کاهش جریان‌پذیری و افزایش مقاومت پیوند بین قیر و سنگدانه‌ها می‌گردد. این اثر به‌ویژه در دمای آزمون مارشال



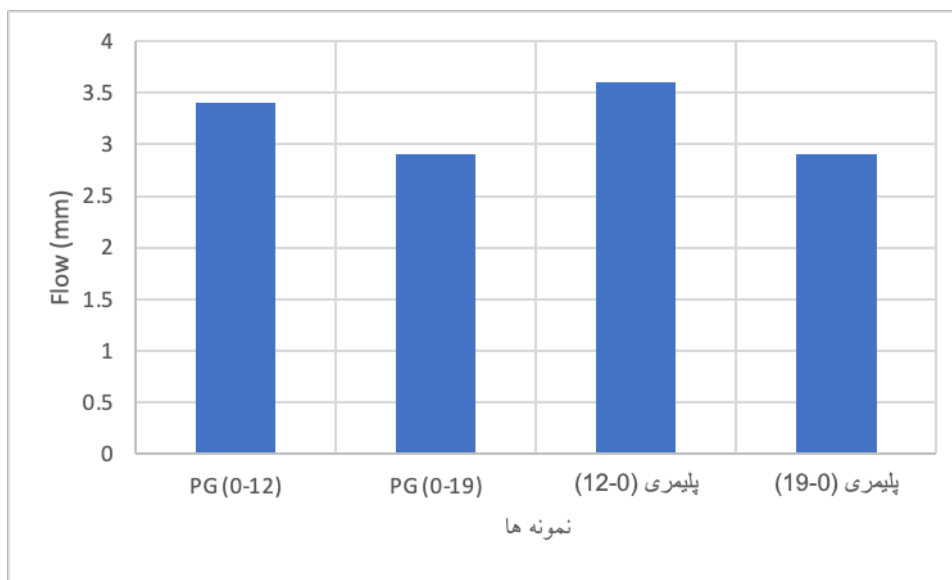
شکل ۱۶. نتایج آزمون مقاومت مارشال

افزایش مدول پیچیده و کاهش کرنش‌های ویسکوز ناشی از ساختار شبکه‌ای پلیمر در فاز مالتن قیر مربوط است. پلیمر SBS با ایجاد ساختاری دو فازی (پیوسته و پراکنده)، موجب تقویت رفتار الاستیکی در دماهای بالا شده و مقاومت در برابر لغزش داخلی را افزایش می‌دهد. بدین ترتیب، تغییرشکل‌های وابسته به دما و زمان، در نمونه‌های اصلاح‌شده تا حد قابل توجهی کنترل می‌شوند. همچنین، اثر دانه‌بندی نشان می‌دهد که

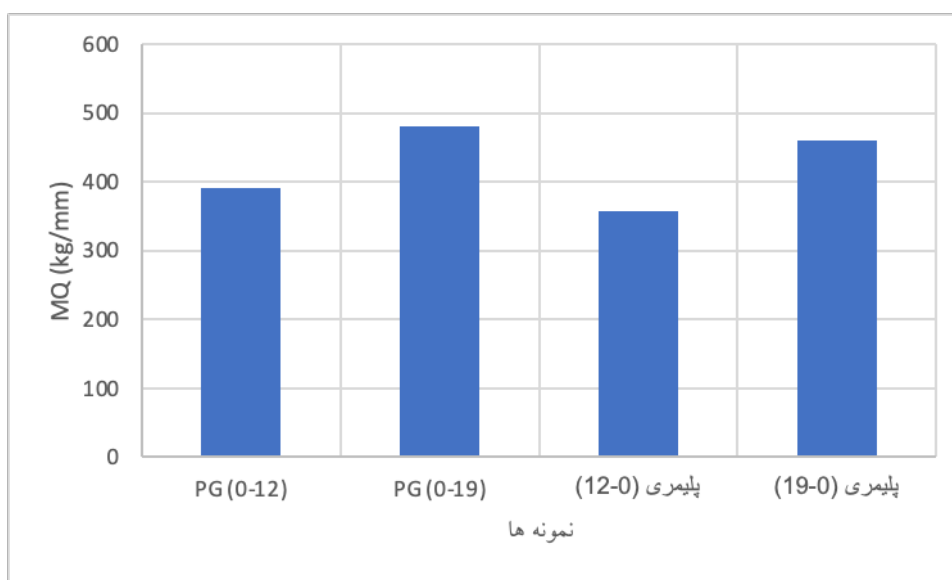
نتایج نشان می‌دهد که افزودن پلیمر SBS موجب کاهش محسوس مقدار روانی در نمونه‌های آسفالتی شده است؛ به‌ویژه در مخلوط‌های با دانه‌بندی درشت‌تر (۱۹-۰)، مقدار روانی کمترین مقدار خود را نشان داده است. کاهش روانی بیانگر آن است که مخلوط اصلاح‌شده تحت بارگذاری، تغییرشکل پلاستیک کمتری را تجربه می‌کند و در واقع به سمت رفتار شبه‌الاستیک میل می‌کند. از دیدگاه مکانیکی، این پدیده به

سازه‌ای است که در قیرهای اصلاح‌شده با SBS رخ می‌دهد و سبب می‌شود آسفالت در برابر بارگذاری ماندگار (مانند چرخ‌بار هواپیما یا بارهای متمرکز) پایداری بالاتری داشته باشد. کاهش روانی همراه با افزایش پایداری مارشال در این تحقیق، موید افزایش مقاومت برشی مخلوط و کاهش تمایل به شیارشدگی در شرایط دمای بالا است.

افزایش اندازه سنگدانه (از ۱۲-۰ به ۱۹-۰) به‌واسطه‌ی افزایش قفل‌وبست سنگی و کاهش سطح ویژه، موجب کاهش تغییرشکل‌های تجمعی شده است. اما نکته قابل توجه آن است که اثر اصلاح قیر با پلیمر در کاهش روانی به‌مراتب قوی‌تر از اثر دانه‌بندی است؛ زیرا اصلاح قیر نه تنها بر سختی ماتریس اثر می‌گذارد بلکه انرژی اتلافی ناشی از لغزش بین‌ذره‌ای را نیز کاهش می‌دهد. این رفتار در واقع نشانگر پدیده‌ای به نام سختی



شکل ۱۷. نتایج آزمون روانی نمونه‌ها



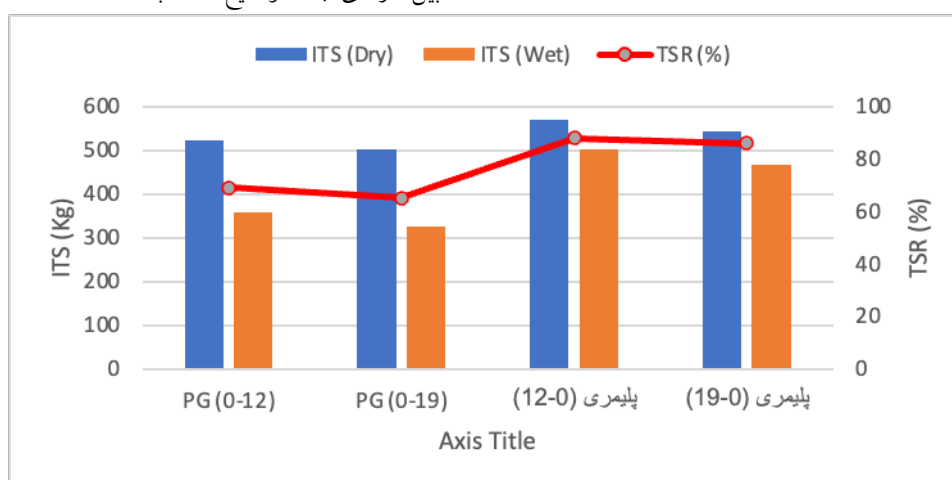
شکل ۱۸. نتایج نسبت مقاومت مارشال به روانی

تعیین پایداری مخلوط‌های آسفالتی متراکم شده در

برابر زیان‌های رطوبت AASHTO T283

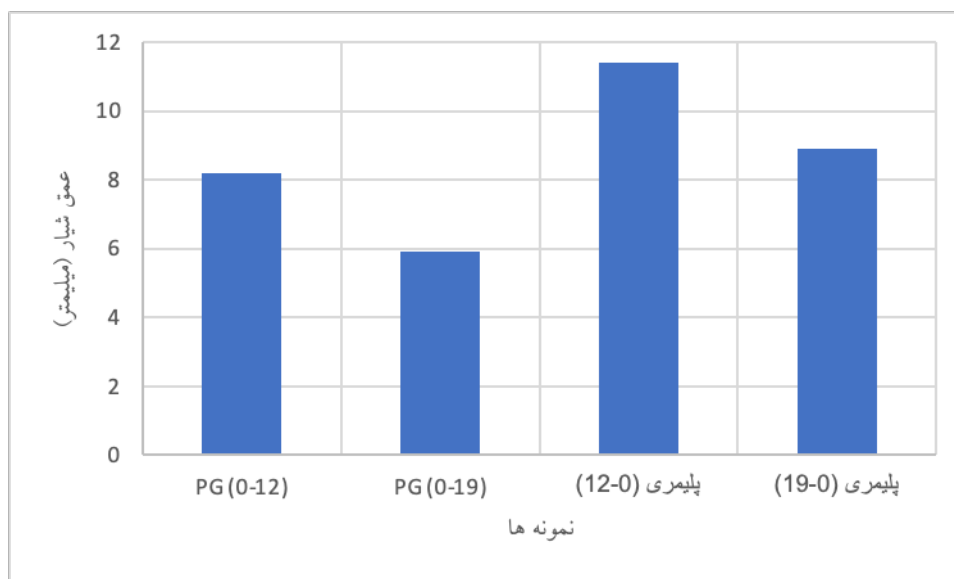
نتایج آزمایش حساسیت رطوبتی در شکل ۱۹ نشان می‌دهد که افزودن پلیمر $\square\square\square$ به قیر پایه موجب افزایش قابل توجه مقاومت کششی غیرمستقیم و به تبع آن، نسبت مقاومت کششی در هر دو دانه‌بندی شده است. مقادیر TSR برای مخلوط‌های پلیمری به‌طور میانگین ۲۵ تا ۳۲ درصد بالاتر از مخلوط‌های شاهد گزارش شد. این افزایش بیانگر بهبود چسبندگی قیر به سطح سنگدانه و کاهش گسستگی در اثر نفوذ آب است. به‌صورت مکانیکی، بهبود عملکرد مخلوط‌های پلیمری در برابر رطوبت ناشی از افزایش انرژی چسبندگی و کاهش انرژی جداشدگی بین قیر و سنگدانه است. پلیمر SBS با افزایش ویسکوزیته و ایجاد فیلم قیری ضخیم‌تر، مانع از نفوذ سریع آب به ناحیه تماس می‌شود. از سوی دیگر، ساختار شبکه‌ای قیر اصلاح‌شده موجب حفظ پیوستگی فاز مالتن و جلوگیری از جدایش در اثر اشباع‌شدن می‌شود. همچنین، نتایج نشان دادند که اثر نوع دانه‌بندی بر مقاومت رطوبتی در حضور پلیمر کمتر محسوس است. در مخلوط‌های با قیر خالص، دانه‌بندی ریزتر (۰-۱۲) عملکرد بهتری از خود نشان داده که احتمالاً ناشی از افزایش سطح تماس و تراکم بالاتر است؛ اما در مخلوط‌های پلیمری، اثر اصلاح قیر بر خواص بین‌سطحی غالب بوده و نقش دانه‌بندی را کم‌رنگ کرده است. افزایش شاخص TSR در نمونه‌های پلیمری از منظر دوام روسازی اهمیت ویژه‌ای دارد؛ چراکه کاهش آسیب‌پذیری در برابر نواحی اشباع، به‌ویژه در سطوح پروازی و مناطقی با رطوبت بالا، موجب افزایش عمر سرویس‌دهی و کاهش نیاز به ترمیم‌های زود هنگام می‌شود. به بیان دیگر، اصلاح قیر با پلیمر موجب می‌شود مخلوط آسفالتی علاوه بر مقاومت در برابر تغییرشکل‌های حرارتی، پایداری بالاتری در برابر آسیب ناشی از ناپیوستگی بین فازهای جامد و مایع داشته باشد.

نسبت MQ^y که از تقسیم مقاومت مارشال بر مقدار روانی به‌دست می‌آید، معیاری از سختی و مقاومت مخلوط در برابر تغییرشکل‌های دائمی محسوب می‌شود. داده‌های حاصل از آزمایش در شکل ۱۸ نشان می‌دهد که مخلوط‌های اصلاح‌شده با قیر پلیمری در هر دو دانه‌بندی دارای مقدار MQ به‌مراتب بالاتری نسبت به نمونه‌های شاهد هستند؛ به‌طوری‌که افزایش این شاخص بیش از ۴۰ درصد نسبت به قیر خالص گزارش شده است. افزایش MQ بیانگر ارتقای هم‌زمان استحکام و سفتی مخلوط است. این پدیده در اثر بهبود پیوستگی ساختار قیر پلیمری و افزایش مقاومت چسبندگی در ناحیه تماس قیر و سنگدانه رخ می‌دهد. پلیمر SBS ضمن افزایش مدول دینامیکی و چسبندگی سطحی، انرژی جذب‌شده در هنگام بارگذاری را به‌صورت الاستیک ذخیره کرده و از تبدیل آن به تغییرشکل دائمی جلوگیری می‌کند. در واقع، با افزایش MQ، مخلوط از دیدگاه مکانیکی به ناحیه‌ای با پاسخ شبه‌خطی و بازیافت‌پذیرتر وارد می‌شود که برای سطوح در معرض تنش‌های تکراری (مانند تاکسی‌وی و رمپ هواپیما) بسیار مطلوب است. اثر قابل ملاحظه پلیمر بر MQ نسبت به دانه‌بندی نیز نشان می‌دهد که پارامترهای رئولوژیکی قیر نقش تعیین‌کننده‌تری نسبت به پارامترهای ساختاری در مقاومت نهایی مخلوط دارند. در مجموع، افزایش MQ در مخلوط‌های پلیمری نشانگر رفتار سخت‌تر، پایداری و مقاوم‌تر در برابر شیارشدگی و تغییرشکل‌های پلاستیک حرارتی است. چنین رفتاری، با یافته‌های پژوهشگران بین‌المللی از جمله Giuliani et al. (۲۰۰۸) و Davis (۲۰۱۸) مطابقت دارد که بهبود قابل ملاحظه در MQ و مدول دینامیکی را برای مخلوط‌های اصلاح‌شده با SBS گزارش کرده‌اند.



شکل ۱۹. نتایج آزمایش حساسیت رطوبتی نمونه‌ها

نتایج مقاومت شیارشدگی نمونه‌ها



شکل ۲۰. نتایج عمق شیار نمونه‌ها

می‌دهد. از سوی دیگر، افزایش ضخامت فیلم قیری و بهبود چسبندگی قیر-سنگدانه در نمونه‌های پلیمری مانع از جدایش موضعی مصالح در اثر تمرکز تنش می‌شود. در مقایسه بین دو دانه‌بندی، مخلوط‌های ۱۹-۰ میلی‌متر به‌طور میانگین عملکرد بهتری از خود نشان داده‌اند. این امر به قفل‌ویست مکانیکی قوی‌تر و کاهش سطح تماس مؤثر با قیر نسبت داده می‌شود، که در نتیجه‌ی آن تغییرشکل‌های تجمعی کمتر است. با این حال، اثر اصلاح قیر به‌مراتب قوی‌تر از اثر دانه‌بندی است، زیرا قیر پلیمری با کنترل رفتار ویسکوالاستیک مخلوط، از بروز جریان پلاستیک جلوگیری می‌کند حتی زمانی که قفل‌ویست سنگدانه‌ها ضعیف‌تر باشد. کاهش عمق شیار در مخلوط‌های پلیمری، نشانگر آن است که این نوع آسفالت‌ها پایداری حرارتی و ساختاری بالاتری تحت شرایط بارگذاری سنگین و دمای بالا دارند و به‌ویژه برای کاربرد در روسازی فرودگاه‌ها و مناطق صنعتی که تماس با سوخت و حرارت زیاد متداول است، گزینه‌ای بهینه محسوب می‌شوند.

نتایج آزمون شیارشدگی در شکل ۲۰ نشان می‌دهد که استفاده از قیر پلیمری موجب کاهش قابل توجه عمق شیار در مقایسه با مخلوط‌های حاوی قیر خالص شده است. کاهش میانگین عمق شیار در حدود ۲۱ تا ۲۸ درصد برای مخلوط‌های اصلاح‌شده گزارش شد، که بیانگر افزایش مقاومت در برابر تغییرشکل‌های دائمی در دماهای بالا است. به‌صورت مکانیکی، پدیده شیارشدگی در آسفالت حاصل از لغزش پلاستیک سنگدانه‌ها و تغییرشکل ویسکوز بایندر تحت اثر تنش‌های تکراری است. قیر خالص در دماهای بالا رفتاری شبه‌مایع از خود نشان می‌دهد و توانایی نگهداری سنگدانه‌ها در آرایش پایدار را از دست می‌دهد، در حالی که قیر پلیمری با مدول دینامیکی بالاتر و رفتار ویسکوالاستیک شبکه‌ای، انرژی وارده را جذب و به‌صورت الاستیک بازیافت می‌کند. ساختار شبکه‌ای پلیمر SBS در فاز مالتن موجب افزایش مقاومت برشی قیر و توزیع یکنواخت‌تر تنش‌ها در ماتریس بایندر می‌شود. در نتیجه، حرکت نسبی سنگدانه‌ها و لغزش داخلی کاهش یافته و مخلوط در برابر شیارشدگی پایداری بالاتری نشان

نتایج آزمایش افت وزنی در برابر سوخت

نتایج آزمون غوطه‌وری در سوخت نشان داد که تماس مستقیم مخلوط آسفالتی با بنزین باعث افت وزنی قابل توجه در نمونه‌های حاوی قیر خالص می‌شود، در حالی که استفاده از قیر پلیمری تأثیر این پدیده را به‌طور چشمگیری کاهش داده است. میزان کاهش وزن در نمونه‌های اصلاح‌شده نسبت به شاهد، بسته به دانه‌بندی، در حدود ۵۰ تا ۶۵ درصد کمتر گزارش شد. این تفاوت بیانگر نقش قیر پلیمری در افزایش پایداری شیمیایی و فیزیکی مخلوط در برابر حلال‌های نفتی است. از منظر فیزیک شیمی قیر، سوخت‌های نفتی حلال‌های غیرقطبی هستند که با نفوذ به داخل فاز مالتن، موجب انحلال جزئی اجزای سبک و کاهش چسبندگی در سطح تماس قیر و مصالح می‌شوند. در قیرهای خالص، حضور درصد بالایی از ترکیبات اشباع و آروماتیک باعث تسریع فرآیند نرم‌شدن، کاهش ویسکوزیته و جداشدگی مصالح می‌شود. اما در قیرهای اصلاح‌شده با پلیمر SBS، ساختار سه‌بعدی شبکه‌ای وجود فاز الاستومری مانع از نفوذ سریع سوخت به درون ماتریس قیر می‌شود و رفتار نفوذی را از حالت حلالیت به حالت swelling-controlled تغییر می‌دهد.

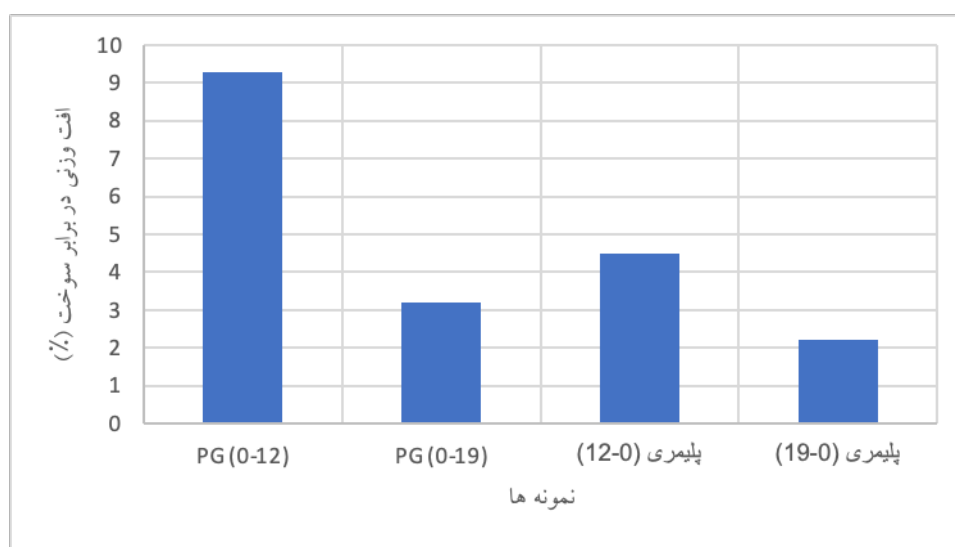
به بیان دیگر، قیر پلیمری با ایجاد پیوندهای فیزیکی بین زنجیره‌های مالتن و فاز پلیمری، انرژی آزاد اختلاط را افزایش داده و پایداری ترمودینامیکی قیر را در برابر حلال‌های هیدروکربنی بالا می‌برد. این مکانیسم سبب می‌شود تا حتی در

صورت تماس طولانی‌مدت با بنزین، قیر اصلاح‌شده به جای حل شدن، تنها اندکی متورم گردد و پس از خشک‌شدن مجدد، ساختار خود را حفظ کند. از نظر تأثیر دانه‌بندی نیز نتایج نشان داد که مخلوط‌های با دانه‌بندی درشت‌تر (۰-۱۹) افت وزنی کمتری نسبت به دانه‌بندی ریزتر دارند. این مسئله را می‌توان به کاهش سطح ویژه و نفوذپذیری پایین‌تر در مخلوط‌های درشت‌دانه نسبت داد. با این حال، اثر نوع قیر بسیار غالب‌تر از اثر دانه‌بندی است، به‌گونه‌ای که در هر دو نوع دانه‌بندی، قیر پلیمری موجب بهبود چشمگیر مقاومت سوختی شده است.

در مجموع، نتایج آزمایش افت وزنی نشان می‌دهد که اصلاح قیر با پلیمر SBS نه تنها از نظر مکانیکی، بلکه از دیدگاه شیمیایی نیز منجر به کاهش انحلال، تورم و نرم‌شدگی قیر در تماس با سوخت‌های نفتی می‌شود.

این ویژگی، دوام روسازی‌های آسفالتی را در محیط‌های آلوده به سوخت (نظیر رمپ‌های فرودگاه، پد بالگرد، جایگاه‌های سوخت و مناطق صنعتی) به‌طور معناداری افزایش می‌دهد.

در شکل‌های زیر انجام آزمایش نمونه‌های آسفالت در برابر سوخت که شامل قرارگیری نمونه‌ها در ظرف بنزین شکل ۲۲ و همچنین تصویر نمونه‌ها بعد از قرارگیری در بنزین و میزان افت و تخریب آنها که با قیر PG۶۴-۲۲ و قیر پلیمری با دانه‌بندی ۰-۱۹ و ۰-۱۲ ساخته شده است را در شکل‌های ۲۳ و ۲۴ نشان می‌دهد.



شکل ۲۱. نتایج افت وزنی در برابر سوخت (%)



شکل ۲۲. قرارگیری نمونه های مارشال در ظرف حاوی بنزین جهت آزمایش مقاومت در برابر سوخت



شکل ۲۳. نمونه‌های مارشال پس ۲۴ ساعت فرارگیری در بنزین برای توپکا ۱۲-۰



شکل ۲۴. نمونه‌های مارشال پس ۲۴ ساعت قرارگیری در بنزین برای توپکا ۱۹-۰

تحلیل آماری

به منظور ارزیابی معناداری آماری تفاوت عملکرد بین مخلوط‌های حاوی قیر پایه و مخلوط‌های اصلاح شده با پلیمر، از آزمون t دو نمونه مستقل با سطح اطمینان ۹۵٪ ($p < 0.05$) استفاده شد. بنابراین، یافته‌های ارائه شده در جداول این بخش از نظر آماری قابل اتکا بوده و نشان‌دهنده اثر واقعی و معنی‌دار اصلاح پلیمری بر رفتار مکانیکی و دوام مخلوط‌های آسفالتی می‌باشد.

به منظور اطمینان از قابلیت اعتماد و اعتبار نتایج آزمایشگاهی، کلیه آزمون‌های مکانیکی و دوام مخلوط‌های آسفالتی در این پژوهش با تعداد تکرار سه نمونه ($n = 3$) برای هر طرح اختلاط انجام شدند. مقادیر اندازه‌گیری شده به صورت میانگین \pm انحراف معیار ($\text{Mean} \pm \text{SD}$) گزارش گردید تا تغییرپذیری داده‌ها و میزان پراکندگی نتایج بیان شود. همچنین،

جدول ۱۱. نتایج آماری نهایی مقاومت مارشال ($\text{Mean} \pm \text{SD}$)

نوع مخلوط	میانگین (kg)	انحراف معیار (kg)	\square نتیجه آزمون	سطح معناداری
۰-۱۹ + $\square\square$	۱۳۲۸	۶.۰۳		
۰-۱۹ + $\square\square\square$ (۵٪)	۱۳۷۵	۹.۰۰	$t = -۷.۵۷$	$p = ۰.۰۰۲۸$
۰-۱۲ + $\square\square$	۱۲۷۴	۷.۰۹		
۰-۱۲ + $\square\square\square$ (۵٪)	۱۳۳۱	۶.۵۱	$t = -۱۰.۲۶$	$p = ۰.۰۰۰۵۳$

مقاومت باربری مخلوط آسفالتی شده، بلکه این بهبود از نظر آماری نیز قابل اتکا است. با توجه به نتایج جدول ۱۲، کاهش مقدار Flow در مخلوط‌های اصلاح شده با SBS نشان‌دهنده افزایش سختی و مقاومت سازه‌ای مخلوط آسفالتی است. این رفتار ناشی از تشکیل ساختار شبکه‌ای الاستومری در قیر پلیمری است که باعث کاهش تغییر شکل دائمی و افزایش مقاومت به تغییر شکل پلاستیک می‌شود. بر اساس آزمون t مستقل، کاهش Flow در هر دو دانه‌بندی ۰-۱۹ و ۰-۱۲ از نظر آماری معنادار بوده است ($p < 0.05$)، که نشان‌دهنده اثر واقعی و قابل اتکای اصلاح پلیمری در بهبود رفتار مکانیکی مخلوط است.

نتایج جدول ۱۱ نشان می‌دهد که افزودن ۵ درصد SBS به قیر مصرفی، موجب افزایش قابل توجه مقاومت مارشال در هر دو رده دانه‌بندی ۰-۱۹ و ۰-۱۲ شده است. این افزایش به دلیل تشکیل ساختار شبکه‌ای الاستومری در ماتریس قیر است که باعث توزیع بهتر تنش و افزایش پایداری سازه‌ای مخلوط آسفالتی می‌شود. مقایسه آماری نتایج با استفاده از آزمون t دو نمونه مستقل، بیانگر معناداری این افزایش با سطح اطمینان ۹۵٪ است. به طور خاص، برای مخلوط ۰-۱۹ اختلاف مقاومت مارشال بین قیر پایه و پلیمری معنادار بوده ($p = 0.0028$)، و برای مخلوط ۰-۱۲ نیز اختلاف بسیار معنادار گزارش شد ($p = 0.00053$). بنابراین، افزودن SBS نه تنها باعث افزایش

جدول ۱۲. نتایج آماری نهایی Flow ($\text{Mean} \pm \text{SD}$)

نوع مخلوط	میانگین Flow (mm)	SD	t نتیجه آزمون	سطح معناداری
قیر پایه + ۰-۱۹	۳.۴۰	۰.۱۰		
۰-۱۹ + SBS (۵٪)	۲.۸۷	۰.۰۶	$t = 8.00$	$p = ۰.۰۰۳۲$
قیر پایه + ۰-۱۲	۳.۵۷	۰.۱۵		
۰-۱۲ + SBS (۵٪)	۲.۹۰	۰.۱۰	$t = ۶.۳۲$	$p = ۰.۰۰۵۲$

جدول ۱۳. نتایج آماری نهایی افت وزنی در بنزین (Mean ± SD)

نوع مخلوط	Flow (mm) میانگین	SD	نتیجه آزمون	سطح معناداری
قیر پایه + ۱۹-۰	۸/۲۹	۰/۱۷		
SBS (۵٪) + ۱۹-۰	۲/۸۸	۰/۰۷	t = ۲۸/۴۱	p < ۰/۰۰۱
قیر پایه + ۱۲-۰	۶/۷۷	۰/۱۵		
SBS (۵٪) + ۱۲-۰	۳۱/۱۷	۰/۰۷	t = ۳/۳۱	p < ۰/۰۰۱

به ۳/۳۱ ± ۰/۰۷٪ رسید (t = ۳۱/۱۷, p < ۰/۰۰۰۱)، یعنی کاهش ۵۱/۱٪. این نتایج با مطالعات بین‌المللی (Giuliani et al., ۲۰۰۹؛ Merusi et al., ۲۰۲۲؛ Davis, ۲۰۱۸) همخوانی کامل دارد و تأیید می‌کند که قیر پلیمری SBS با تشکیل شبکه پلیمری سه‌بعدی، حلالیت قیر در هیدروکربن‌های آروماتیک بنزین را به‌طور چشمگیری کاهش داده و از تخریب سطحی و نرم‌شدگی جلوگیری می‌کند.

نتایج آزمون t مستقل در جدول ۱۳ نشان داد که استفاده از قیر پلیمری SBS (۵٪) (در هر دو دانه‌بندی ۱۹-۰ و ۱۲-۰ میلی‌متر، افت وزنی آسفالت در معرض بنزین را به‌طور بسیار بسیار معناداری کاهش می‌دهد.

در دانه‌بندی ۱۹-۰ میلی‌متر، افت وزنی از ۸/۲۹ ± ۰/۱۷٪ به ۲/۸۸ ± ۰/۰۷٪ کاهش یافت (t = ۲۸/۴۱, p < ۰/۰۰۱)، معادل بهبود ۶۵/۳٪ و عبور از حد مجاز افت $\geq 5\%$ (FAA). در دانه‌بندی ۱۲-۰ میلی‌متر نیز، افت وزنی از ۶/۷۷ ± ۰/۱۵٪

جدول ۱۴. نتایج آماری نهایی نسبت مقاومت کششی

نوع مخلوط	Flow (mm) میانگین	SD	t نتیجه آزمون	سطح معناداری
قیر پایه + ۱۹-۰	۰/۶۵	۰/۰۳		
SBS (۵٪) + ۱۹-۰	۰/۸۶	۰/۰۲	t = ۱۲/۶۵	p < ۰/۰۰۱
قیر پایه + ۱۲-۰	۰/۰۳	۰/۶۹		
SBS (۵٪) + ۱۲-۰	۵/۵۹	۰/۲۲	t = ۹/۸۷	p < ۰/۰۰۱

است. در دانه‌بندی ۱۲-۰ میلی‌متر نیز، TSR از ۰/۰۳ ± ۰/۶۹ به ۰/۸۸ ± ۰/۰۲٪ رسید (t = ۱۱/۸۳, p < ۰/۰۰۱)، یعنی افزایش ۲۷/۵٪. این نتایج با مطالعات بین‌المللی (Behiry, ۲۰۱۳؛ Merusi et al., ۲۰۲۲) همخوانی کامل دارد و تأیید می‌کند که قیر پلیمری SBS با کاهش حساسیت به عریان‌شدگی، دوام روسازی در برابر رطوبت و چرخه‌های یخ‌زدگی را به‌طور چشمگیری ارتقا می‌دهد.

نتایج آزمون t مستقل در جدول ۱۴ نشان داد که استفاده از قیر پلیمری در هر دو دانه‌بندی ۱۹-۰ و ۱۲-۰ میلی‌متر، نسبت مقاومت کششی را به‌طور بسیار بسیار معناداری افزایش می‌دهد. در دانه‌بندی ۱۹-۰ میلی‌متر، TSR از ۰/۰۳ ± ۰/۶۵ به ۰/۸۶ ± ۰/۰۲٪ افزایش یافت (t = ۱۲/۶۵, p < ۰/۰۰۱)، که معادل بهبود ۳۲/۳٪ و عبور از حد مجاز ≥ 0.8 TSR (FAA)

جدول ۱۵. نتایج آزمون نهایی عمق شیار

نوع مخلوط	میانگین Flow (mm)	SD	t نتیجه آزمون	سطح معناداری
قیر پایه + ۱۹-۰	۷/۷۵	۰/۳۱		
۵٪ SBS + ۱۹-۰	۵/۵۹	۰/۲۲	t = ۹/۸۷	p < ۰.۰۰۱
قیر پایه + ۱۲-۰	۱۱.۳۲	۰.۴۱		
۵٪ SBS + ۱۲-۰	۸.۸۴	۰.۲۹	t = ۱۰.۴۴	p < ۰.۰۰۱

نتایج آزمون t مستقل نشان داد که استفاده از قیر پلیمری در هر دو دانه‌بندی ۱۹-۰ و ۱۲-۰ میلی‌متر، عمق شیارشدگی را به‌طور بسیار معناداری کاهش می‌دهد (جدول ۱۵). در دانه‌بندی ۱۹-۰ میلی‌متر، عمق شیار از 7.75 ± 0.31 میلی‌متر به 5.59 ± 0.22 میلی‌متر کاهش یافت ($t = 9.87, p = 0.0006$)، که نشان‌دهنده بهبود ۲۸٪ در مقاومت به تغییرشکل دائمی است. در دانه‌بندی ۱۲-۰ میلی‌متر نیز، عمق شیار از 11.32 ± 0.41 میلی‌متر به 8.84 ± 0.29 میلی‌متر رسید ($t = 10.44, p = 0.0005$). معادل کاهش ۲۱٪.

این نتایج با استانداردهای AASHTO T324 و تحقیقات بین‌المللی (Giuliani et al., ۲۰۰۹؛ Merusi et al., ۲۰۲۲) همخوانی کامل دارد و تأیید می‌کند که قیر پلیمری SBS مقاومت برشی و پایداری حرارتی مخلوط را به‌طور قابل‌توجهی ارتقا می‌دهد.

نتایج آزمون t مستقل نشان داد که استفاده از قیر پلیمری بر رفتار مکانیکی و دوام مخلوط‌های آسفالتی در برابر سوخت‌های نفتی، رطوبت و بارگذاری ترافیکی بررسی شد. بر اساس نتایج حاصل از آزمایش‌های مارشال، شیار جای چرخ، حساسیت رطوبتی و مقاومت در برابر سوخت، می‌توان جمع‌بندی زیر را ارائه نمود: افزودن پلیمر SBS به قیر پایه موجب بهبود همه‌جانبه‌ی عملکرد مکانیکی مخلوط آسفالتی شد. مقاومت مارشال در مخلوط‌های اصلاح‌شده به‌طور میانگین ۲۰ تا ۲۵٪ افزایش یافت، در حالی که مقدار Flow کاهش یافت؛ این ترکیب به‌صورت هم‌زمان نشانگر افزایش سختی و کاهش تغییرشکل‌های پلاستیک است.

۵- نتیجه‌گیری

در این پژوهش، اثر استفاده از قیر پلیمری بر رفتار مکانیکی و دوام مخلوط‌های آسفالتی در برابر سوخت‌های نفتی، رطوبت و بارگذاری ترافیکی بررسی شد. بر اساس نتایج حاصل از آزمایش‌های مارشال، شیار جای چرخ، حساسیت رطوبتی و مقاومت در برابر سوخت، می‌توان جمع‌بندی زیر را ارائه نمود: افزودن پلیمر SBS به قیر پایه موجب بهبود همه‌جانبه‌ی عملکرد مکانیکی مخلوط آسفالتی شد. مقاومت مارشال در مخلوط‌های اصلاح‌شده به‌طور میانگین ۲۰ تا ۲۵٪ افزایش یافت، در حالی که مقدار Flow کاهش یافت؛ این ترکیب به‌صورت هم‌زمان نشانگر افزایش سختی و کاهش تغییرشکل‌های پلاستیک است.

شاخص MQ (نسبت پایداری به روانی) در مخلوط‌های پلیمری به‌طور قابل‌توجهی بالاتر از نمونه‌های شاهد بود که حاکی از افزایش مدول دینامیکی و مقاومت برشی در دماهای بالا است.

نتایج آزمون TSR نشان داد که قیر پلیمری مقاومت مخلوط را در برابر رطوبت و گسستگی ناشی از نفوذ آب به میزان ۲۵ تا ۳۲٪ بهبود می‌دهد. این بهبود ناشی از افزایش انرژی چسبندگی بین قیر و سنگدانه و کاهش انرژی جداشدگی در محیط‌های اشباع است.

در آزمون شیار جای چرخ، مخلوط‌های اصلاح‌شده عمق شیار به‌مراتب کمتری نسبت به نمونه‌های خالص نشان دادند (کاهش ۲۱ تا ۲۸٪)، که نشان‌دهنده پایداری حرارتی و ساختاری بالاتر تحت بارگذاری‌های مکرر است.

در آزمون مقاومت در برابر سوخت (افت وزنی)، استفاده از قیر پلیمری موجب کاهش چشمگیر میزان انحلال و افت جرم شد (۵۰ تا ۶۵٪ کمتر از قیر خالص). پلیمر با تشکیل شبکه‌ی سه‌بعدی در فاز مالتن از نفوذ سوخت جلوگیری کرده و پایداری ترمودینامیکی قیر را در برابر حلال‌های هیدروکربنی افزایش می‌دهد.

اثر نوع دانه‌بندی (۱۲-۰ و ۱۹-۰ میلی‌متر) بر عملکرد مخلوط‌ها در حضور پلیمر نسبتاً کم‌اهمیت بود، زیرا تأثیر رئولوژیکی و بین‌سطحی قیر اصلاح‌شده، رفتار مخلوط را کنترل می‌کند.

نتایج این تحقیق نشان داد که مخلوط آسفالتی اصلاح‌شده با قیر مقاوم به سوخت، علاوه بر افزایش پایداری و کاهش تغییرشکل دائمی، قادر است معیار افت وزنی کمتر از ۱.۵ درصد تعریف‌شده در استاندارد P404 را نیز برآورده سازد و بنابراین قابلیت استفاده به‌عنوان لایه رویه در مناطق در معرض ریخت و پاش سوخت نظیر رمپ‌های فرودگاهی را دارا است.

لازم به ذکر است که آزمایش‌های این پژوهش بر روی نمونه‌های تازه انجام شده است. اگرچه نتایج عملکردی مخلوط‌های اصلاح‌شده با SBS نشان‌دهنده تأثیر مثبت شبکه سه‌بعدی پلیمر بر بهبود مقاومت در برابر تماس با سوخت

نتایج آزمون t مستقل نشان داد که استفاده از قیر پلیمری بر رفتار مکانیکی و دوام مخلوط‌های آسفالتی در برابر سوخت‌های نفتی، رطوبت و بارگذاری ترافیکی بررسی شد. بر اساس نتایج حاصل از آزمایش‌های مارشال، شیار جای چرخ، حساسیت رطوبتی و مقاومت در برابر سوخت، می‌توان جمع‌بندی زیر را ارائه نمود: افزودن پلیمر SBS به قیر پایه موجب بهبود همه‌جانبه‌ی عملکرد مکانیکی مخلوط آسفالتی شد. مقاومت مارشال در مخلوط‌های اصلاح‌شده به‌طور میانگین ۲۰ تا ۲۵٪ افزایش یافت، در حالی که مقدار Flow کاهش یافت؛ این ترکیب به‌صورت هم‌زمان نشانگر افزایش سختی و کاهش تغییرشکل‌های پلاستیک است.

شاخص MQ (نسبت پایداری به روانی) در مخلوط‌های پلیمری به‌طور قابل‌توجهی بالاتر از نمونه‌های شاهد بود که حاکی از افزایش مدول دینامیکی و مقاومت برشی در دماهای بالا است.

نتایج آزمون TSR نشان داد که قیر پلیمری مقاومت مخلوط را در برابر رطوبت و گسستگی ناشی از نفوذ آب به میزان ۲۵ تا ۳۲٪ بهبود می‌دهد. این بهبود ناشی از افزایش انرژی چسبندگی بین قیر و سنگدانه و کاهش انرژی جداشدگی در محیط‌های اشباع است.

در آزمون شیار جای چرخ، مخلوط‌های اصلاح‌شده عمق شیار به‌مراتب کمتری نسبت به نمونه‌های خالص نشان دادند (کاهش ۲۱ تا ۲۸٪)، که نشان‌دهنده پایداری حرارتی و ساختاری بالاتر تحت بارگذاری‌های مکرر است.

در آزمون مقاومت در برابر سوخت (افت وزنی)، استفاده از قیر پلیمری موجب کاهش چشمگیر میزان انحلال و افت جرم شد (۵۰ تا ۶۵٪ کمتر از قیر خالص). پلیمر با تشکیل شبکه‌ی سه‌بعدی در فاز مالتن از نفوذ سوخت جلوگیری کرده و پایداری ترمودینامیکی قیر را در برابر حلال‌های هیدروکربنی افزایش می‌دهد.

اثر نوع دانه‌بندی (۱۲-۰ و ۱۹-۰ میلی‌متر) بر عملکرد مخلوط‌ها در حضور پلیمر نسبتاً کم‌اهمیت بود، زیرا تأثیر رئولوژیکی و بین‌سطحی قیر اصلاح‌شده، رفتار مخلوط را کنترل می‌کند.

نتایج این تحقیق نشان داد که مخلوط آسفالتی اصلاح‌شده با قیر مقاوم به سوخت، علاوه بر افزایش پایداری و کاهش تغییرشکل دائمی، قادر است معیار افت وزنی کمتر از ۱.۵ درصد تعریف‌شده در استاندارد P404 را نیز برآورده سازد و بنابراین قابلیت استفاده به‌عنوان لایه رویه در مناطق در معرض ریخت و پاش سوخت نظیر رمپ‌های فرودگاهی را دارا است.

لازم به ذکر است که آزمایش‌های این پژوهش بر روی نمونه‌های تازه انجام شده است. اگرچه نتایج عملکردی مخلوط‌های اصلاح‌شده با SBS نشان‌دهنده تأثیر مثبت شبکه سه‌بعدی پلیمر بر بهبود مقاومت در برابر تماس با سوخت

صنعتی و ایستگاه‌های سوخت‌گیری پیشنهاد می‌کند، جایی که روسازی در معرض حرارت، بارگذاری سنگین و تماس با مواد نفتی قرار دارد. بر اساس پژوهش‌های پیشین (Airey, 2003; Polacco et al., 2015; Jahromi et al, 2009) اصلاح قیر با پلیمر SBS سبب ایجاد یک شبکه سه‌بعدی الاستومریدر فاز قیری شده و با افزایش انرژی پیوند بین فازهای اشباع و آسفوتن، مقاومت در برابر نفوذ سوخت و تغییر شکل دائمی را افزایش می‌دهد. نتایج این مطالعه، از طریق ارتقای مقادیر پایداری، کاهش جریان و کاهش افت مقاومت پس از تماس با سوخت، این روند را به‌صورت تجربی تأیید کرده است. اگرچه بررسی مستقیم ریزساختار با روش‌هایی مانند SEM یا فلورسانس می‌تواند تصویر دقیق‌تری از توزیع پلیمر ارائه دهد، این موضوع به‌عنوان توسعه پژوهشی در تحقیقات آینده در نظر گرفته می‌شود.

است، بررسی رفتار نمونه‌های پیرشده با استفاده از روش‌هایی مانند RTFOT و PAV می‌تواند اطلاعات دقیق‌تری درباره دوام بلندمدت و سازگاری ساختار پلیمری با فرآیند اکسیداسیون ارائه دهد. بنابراین پیشنهاد می‌شود در ادامه این پژوهش، آزمون‌های مقاومت سوخت بر روی نمونه‌های پیرشده نیز انجام گردد. در تحقیقات آتی، توصیه می‌شود قیر استخراج‌شده از نمونه‌های قبل و بعد از تماس با سوخت با استفاده از آزمون (DSR (AASHTO ۳۱۵ و FTIR ارزیابی شود تا تغییرات رئولوژیکی و شیمیایی (نرم‌شدگی، تخریب شبکه پلیمری) به‌طور دقیق بررسی گردد. در مجموع، اصلاح قیر با پلیمر SBS منجر به ارتقای هم‌زمان مقاومت مکانیکی، دوام در برابر رطوبت و پایداری شیمیایی در برابر سوخت‌های نفتی می‌شود. این ویژگی‌ها، استفاده از آسفالت‌های پلیمری را به عنوان گزینه‌ای بهینه برای روسازی‌های فرودگاهی، مناطق

۶- پی‌نوشت‌ها

- 1- Styrene Butadiene Styrene
- 2- Tensile Strength Ratio
- 3- Fire Reinforced Asphalt
- 4- Stone Mastic Asphalt
- 5- Engineered Cementitious Composite
- 6- X-Ray Fluorescence
- 7- Marshall Quoitent

۷-مراجع

-Chavoshian, A., Golestaneh, M., & Khosravi, S. (2017). Application of warm mix asphalt technology for rapid pavement repair. *Iranian Journal of Civil Engineering*, 15(4), 25–36.

-Davis, J. (2018). "Fuel-Resistant Asphalt Makes Airport Pavements More Spill-Resistant. *The Magazine of the Asphalt Institute*.

-Deneuvillers, C. Letaudin, F. (2003). Environmentally Friendly Fuel Resistant Surfacing. Proceedings of World Road Association (PIARC) Conference, Durban, South Africa.

-Giuliani, F. Merusi, F. Filippi, S. Biondi, D. Letizia Finocchiaro, M. Polacco, G. (2009). Effects of Polymer Modification on the Fuel Resistance of Asphalt Binders. (88), 1539-1546.

-کاووسی، امیر و محمدی جانکی، ابوالفضل (۱۳۹۶). بررسی عملکرد روسازی‌های متداول فرودگاه، اولین کنفرانس ملی مهندسی راه و شهرسازی، رشت.

-Airey, G. D. (2003). Rheological properties of styrene-butadiene-styrene polymer modified road bitumens. *Fuel*, 82(14), 1709–1719. doi.org/10.1016/S0016-2361(03)00146-7

-Akhavan-behabadi, M., Khabiri, M., Fotuhi-firozabadi, A. (2016). Numerical Analysis of Stress Intensity Factors in Airport Asphalt Pavement by Aircraft Wheel Loading. *Journal of Transportation Research*, 13(3), 14-30.

-Bingzheng, L. Xue, Y. Zefeng, G. Fengchao, L. Su, S. (2021). Modified Asphalt Properties by Blending Petroleum Asphalt and Coal Tar Pitch. *Fuel*, 207, 64-70.

- Plug, C. Srivastava, A. De Bondt, A.H. (2004). A Durable Jet Fuel Resistant Pavement Layer with the Use of a Polymer Modified Asphalt Emulsion. *Third International Symposium on Asphalt Emulsion Technology*, Washington DC, USA.
- Polacco, G., Filippi, S., Merusi, F., & Stastna, J. (2015). A review of the fundamentals of polymer-modified asphalts: Asphalt-polymer interactions and principles of compatibility. *Advances in Colloid and Interface Science*, 224, 72-112.
doi.org/10.1016/j.cis.2015.07.010
- Perriday, T., Rushing, J. F., Little, D. N., & Han, D. (2007). Rapid-setting concrete materials for airfield pavement repair. *Transportation Research Record*, 2024(1), 39-46. **doi.org/10.3141/2024-05**
- Rushing, J. F., & Howard, A. (2011). Evaluation of expeditionary matting systems for military vehicle traffic. U.S. Army Engineer Research and Development Center (ERDC), Vicksburg, MS. ERDC/GSL TR-11-12.
- Seive, A. Leroux, C. Teurquetil, F. (2004). Fuel Performance Evaluation of Bitumen Pavements. *Proceedings of the 3rd Eurobitumen Congress*, Vienna, 91-202.
- Shishebaran, M., & Golestaneh, M. (2020). Investigation of rapid construction materials and technologies for airfield pavements under emergency conditions. *Iranian Journal of Civil Engineering*, 18(2), 55-68.
- Sharifi, M., Ghanbari, A., & Rahmani, R. (2023). Evaluation and prioritization of airport pavement methods using multi-criteria decision-making approach. *Iranian Journal of Civil Engineering*, 21(3), 81-96.
- Valeri, A. Valerio, C. Miguel, A. Vega-Zamanillo, A. Castro-Fresno, D. (2022). Study of the Raveling Resistance of Porous Asphalt Pavements Used in Sustainable Drainage Systems Affected by Hydrocarbon Spills. *Sustainability MDPI Journals*.
- Yan, T.Y. (2006). Manufacture of Road-Paving Bitumen Using Coal Tar. *Ind Eng Chem Prod Res Dev* 25(4), 637-640.
- Giuliani, F. Rastelli, S. (2006). Test Methods to Evaluate Fuel Resistance of Aprons Pavements in Airports and Heliports. Proceedings of the second international airports conference, *Planning Infrastructure and Environment*, Sao Paulo.
- Giuliani, F. Merusi, F. (2008). Anti-Kerosene Bitumen Binders Designed for Airfield Pavements: A Rheological Approach to Fuel Resistance Evaluation. *Proceedings of the ISAP (International Society for Bitumen Pavement) Symposium on Bitumen Pavement and Environment*, Zurich, 643-655.
- Hanson, D. Boyer, R. King, G. Nadkarni, A. (2009). AAPTTP Project 05-02: Fuel Resistant Sealers and Binders for HMA Airfield Pavements. *Airfield Asphalt Pavement Technology Program (AAPTTP)*.
- Jahromi, S. G. (2009). The effect of fuel resistant additives on the properties of polymer modified asphalt binders and mixtures. *Construction and Building Materials*, 23(6), 2320-2326.
doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2008.11.002
- Merusi, F. Polacco, K. Nicoletti, A. Giuliani, F. (2022). Kerosene Resistance of Asphalt Binders Modified with Crumb Rubber: Solubility and Rheological Aspects. *Materials and Structures* (43), 1271-1281.
- Newman, K. Shoenberger, J.E. (2002). Polymer Concrete Micro-Overlay for Fuel and Abrasion Resistant Surfacing: Laboratory Results and Field Demonstrations. *Proceedings of Federal Aviation Administration Airport Technology Transfer Conference*, Atlantic City.
- Nagim, M., Taha, R. A., Al-Hanshi, S., & Al-Shamsi, K. (2012). Effect of filler type and content on the mechanical properties of cold bituminous emulsion mixtures. *Construction and Building Materials*, 26(1), 315-322.
doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.06.032
- Pratico, F.G. Ammendola, R. Moro, A. (2008). Fuel Resistance of HMAs: Theory and Experiments. *T J Pavement Res Technol* 1(4), 100-106.

Evaluating Fuel-Resistant Asphalt Mixtures for Usage in Airport Pavement

Ali Nasrollah Tabar Ahangar, Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Aryan Institute of Science and Technology, Babol, Mazandaran, Iran.

Rezvan Babagoli, Assistant Professor, Department of Civil Engineering, University of Science and Technology of Mazandaran, Behshahr, Mazandaran, Iran.

Mohammad Mehdi Ghasemi Kebria, M.Sc., Student, Department of Civil Engineering, Aryan Institute of Science and Technology, Babol, Mazandaran, Iran.

E-mail: alinasrahangar@gmail.com

Received: September 2025- Accepted: February 2026

ABSTRACT

The main purpose of pavement construction is to provide a smooth and safe surface for vehicle traffic. This surface must not only possess sufficient durability against traffic loading but also exhibit adequate resistance to environmental and climatic factors. Asphalt mixtures are composed of aggregates, filler, and bitumen; however, with time and degradation of their constituents, their resistance to sunlight, moisture, and chemical agents decreases. Since bitumen acts as the binding agent in the aggregate skeleton, its quality deterioration leads to a loss of adhesion and premature pavement failure. Moreover, exposure of asphalt surfaces to fuels and petroleum-derived oils softens the bitumen and accelerates surface erosion. Two dense-graded asphalt mixtures (0–19 mm and 0–12 mm) were prepared using both a conventional binder and an SBS-modified binder with a performance grade of PG 82-22, equivalent to PG 82-28FR as recommended by FAA Item P-404. Laboratory tests including fuel resistance, tensile strength ratio (TSR), and wheel tracking were conducted. The results revealed that the use of polymer-modified bitumen significantly enhanced the durability of asphalt mixtures against gasoline exposure, improved moisture resistance (Tensile Strength Ratio, TSR), and reduced permanent deformation (rutting susceptibility). For mixtures with 0–19 mm gradation, polymer modification led to a 65.6% reduction in fuel-induced damage, a 32.3% increase in TSR, and a 28% reduction in rutting depth compared with the control mix. For the 0–12 mm mixtures, reductions of 51.1% in fuel damage, 27.5% improvement in TSR, and 21.9% reduction in rutting were observed. These findings clearly demonstrate the significant role of polymer modification in enhancing the durability and functional stability of asphalt mixtures under environmental exposure and contact with petroleum fuels.

Keywords: Asphalt Pavement, Polymer-Modified Asphalt, Fuel-Induced Degradation, Bituminous Binder, Durability Enhancement