

ارزیابی مشخصات فنی مخلوط‌های آسفالتی حاوی تراشه آسفالت

و افزودنی ساسویت

مقاله پژوهشی

بابک گلچین^{*}، استادیار، گروه مهندسی عمران، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران

مجتبی ربی، دانش آموخته کارشناسی ارشد، گروه مهندسی عمران، واحد اهر، دانشگاه آزاد اسلامی، اهر، ایران

^{*}پست الکترونیکی نویسنده مسئول: b.golchin@uma.ac.ir

دریافت: ۹۸/۱۱/۰۵ - پذیرش: ۹۹/۰۳/۲۰

صفحه ۱۹۸-۱۸۷

چکیده

امروزه تراشه‌های آسفالت در تولید مخلوط‌های آسفالتی استفاده می‌شوند. استفاده از این مواد، منافع اقتصادی و زیست محیطی قابل توجهی دارد. از طرفی، افزودنی‌های نیمه گرم، موادی هستند که دمای تولید مخلوط‌های آسفالتی را کاهش داده و کارایی این مخلوط‌ها را در پروژه‌های راهسازی بهبود می‌دهند. همیشه این سوال مطرح است که طرح اختلاط مخلوط‌های آسفالتی در حضور تراشه‌های آسفالتی و افزودنی‌های موجود چه تغییری می‌کند. در این تحقیق اثر استفاده توام تراشه‌های آسفالتی و یک افزودنی نیمه گرم به نام ساسویت بر مشخصات فنی مخلوط‌های آسفالتی ارزیابی می‌شود. بدین منظور یک طرح آزمایشگاهی بر اساس مقدار تراشه آسفالتی (صفر تا ۵۰ درصد)، مقدار قیر (۴ تا ۶ درصد) و مقدار ساسویت (۰ تا ۳ درصد) با استفاده از روش سطح پاسخ طراحی شد. آنگاه مشخصات حجمی و مقاومتی نمونه‌های آزمایشگاهی اندازه گیری و با معیارهای آیین نامه روسازی راه‌های ایران ارزیابی شد. نتایج به دست آمده، نشان می‌دهند نقطه بهینه برای تولید مخلوط آسفالت بازیافتی با مصالح به کار رفته، در قیر ۶/۴٪، تراشه آسفالت ۱۲٪ و ساسویت ۳٪ می‌باشد. همچنین، افزایش درصد ساسویت، مقدار استحکام مارشال و وزن مخصوص را افزایش و درصد فضای خالی را کاهش می‌دهد.

واژه‌های کلیدی: بازیافت گرم، تراشه آسفالت، ساسویت، قیر

۱-مقدمه

امروزه، مسائل زیستی محیطی به صورت گسترده مورد توجه مهندسين در طراحی و ساخت پروژه‌های عمرانی قرار گرفته است. استفاده مجدد از مصالح دور ریز یک از این موارد است. تراشه‌های آسفالتی مصالحی هستند که می‌توانند مجدداً در تولید مخلوط‌های آسفالتی استفاده شوند تا اثرات منفی زیست محیطی آنها کاهش یابد. با در نظر گرفتن این موضوع، پژوهشگران مختلف در صدد بررسی مشخصات فنی محصول زیست محیطی تولید شده هستند. عامری و تقی نژاد (۱۳۸۶)، خصوصیات قیر مخلوط های آسفالتی گرم حاوی درصد های

مختلف تراشه‌های آسفالت (۰، ۲۵، ۵۰، ۷۵ و ۱۰۰ درصد) را پس از عمل بازیابی با آزمایش‌هایی نظیر درجه نفوذ، نقطه نرمی، خاصیت انگمی و کندروانی مورد بررسی قرار دادند. همچنین ایشان از آزمایش‌هایی نظیر استحکام مارشال و مقاومت کششی غیر مستقیم جهت بررسی رفتار این مخلوط‌ها استفاده نمودند. نتایج آزمایش‌ها، نشان دادند که قیر موجود در تراشه‌های آسفالتی، نسبت به قیر اولیه‌ای که در تهیه مخلوط‌های آسفالتی به کار رفته است، به طور قابل ملاحظه‌ای سخت شده است [عامری و تقی نژاد (۱۳۸۶)]. کریمی و همکاران (۱۳۹۱)،

شد [بهبهانی، ایازی و شجاعی (۱۳۹۵)]. نتایج آزمایش ها نشان داد که زایکوترم علاوه بر کاهش دمای اختلاط و تراکم، باعث بهبود حساسیت رطوبتی مخلوط های آسفالتی نسبت به مخلوط آسفالتی گرم کتترلی و مخلوط ساسوبیتی می شود. از طرف دیگر ساسوبیت با افزایش سختی مخلوط آسفالتی باعث افزایش مدول برجهنگی و همچنین کاهش میزان شیار شدگی نسبت به دو مخلوط دیگر می گردد. قیر موجود در تراشه آسفالت به علت پیر شدگی دارای سختی بالایی است و کارایی مخلوط آسفالتی را از نقطه نظر اجرا تحت تأثیر قرار می دهد و بر مشخصات رفتاری مخلوط تأثیر می گذارد [صفازاده و طباطبایی (۱۳۹۴)]. به کار بردن یک افزودنی نیمه گرم می تواند راه حلی برای افزایش کارایی مخلوط های حاوی تراشه آسفالتی باشد. بنابراین می توان گفت ترکیب فناوری بازیافت با استفاده از تراشه های آسفالت و افزودنی های نیمه گرم، می تواند علاوه بر مسائل فنی، یک گزینه زیست محیطی مناسب باشد. در این راستا، صفازاده و همکاران (۱۳۹۴)، به بررسی تأثیر استفاده از ساسوبیت بر کاهش دمای تراکم، با اندازه گیری کندروانی قیر تراشه آسفالت در نرخ برش کم و کارایی مخلوط های حاوی تراشه آسفالت پرداختند. نتایج این تحقیق نشان داد، استفاده از ساسوبیت روشی امکان پذیر و اجرایی برای ساخت مخلوط های آسفالتی حاوی ۲۵ درصد تراشه آسفالتی است.

مالیک و همکاران (۲۰۰۷) در تحقیقات خود نشان دادند سفت بودن قیر تراشه آسفالتی و استفاده کمتر از قیر تازه در مخلوط آسفالت نسبت به مخلوط های متداول، کارایی این مخلوط ها را از نقطه نظر اجرایی تحت تأثیر قرار می دهد. ایشان نشان دادند افزودنی نیمه گرم ساسوبیت، علاوه بر کاهش دمای اختلاط، باعث روغنکاری داخلی مصالح شده و کارایی مخلوط ها را بهبود می بخشد [مالیک، بردلی و بردبری (۲۰۰۷)].

با توجه به مطالب فوق الذکر در تحقیق حاضر، ترکیب تراشه آسفالت با یک افزودنی نیمه گرم مانند ساسوبیت از یک نقطه نظر دیگر بررسی می شود. از آنجا که طرح اختلاط و درصد قیر در حضور تراشه آسفالت و احتمالاً افزودنی نیمه گرم ممکن است دچار تغییر شود، اثر متقابل مقادیر مختلف تراشه آسفالت، قیر و افزودنی بر رفتار حجمی و مقاومتی مخلوط های آسفالتی بررسی می شود تا با استفاده از نتایج آزمایشگاهی و مقایسه آن با معیارهای طرح اختلاط مخلوط های آسفالتی، ترکیب بهینه در تولید این محصول زیست محیطی تعریف گردد.

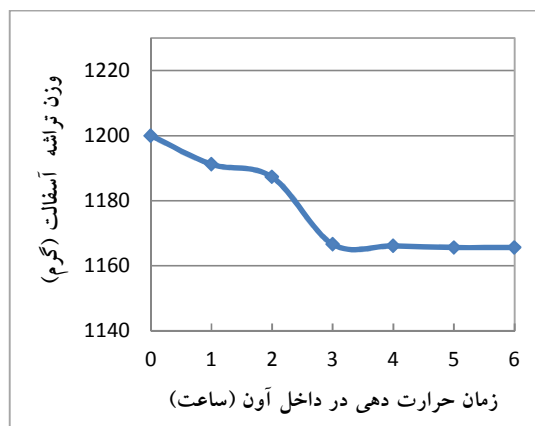
در تحقیقات خود از جایگزینی سنگدانه های تراشه آسفالت بازیافتی به عنوان بخشی از سنگدانه مخلوط بتن غلتکی در سه حالت جایگزینی در ریز دانه و درشت دانه، جایگزینی فقط در ریز دانه و جایگزینی فقط در درشت دانه و با درصدهای ۰، ۱۰، ۲۰، ۴۰ و ۸۰ استفاده نمودند. نتایج آزمایش ها نشان داد که استفاده از تراشه آسفالت بازیافتی به عنوان بخشی از سنگدانه بتن غلتکی روسازی تأثیری بر روانی، تراکم پذیری، مقادیر سیمان و آب مخلوط نداشته، اما مقاومت فشاری با افزایش هر چه بیشتر درصد استفاده از تراشه آسفالت بازیافتی کاهش می یابد [کریمی و همکاران (۱۳۹۱)]. در تحقیقی دیگر، پتانسیل شیارشدگی مخلوط های آسفالتی گرم حاوی خرده آسفالت و سرباره فولاد بررسی شد. این بررسی نشان داد که برخلاف سرباره فولاد، افزودن تراشه آسفالت، تأثیر قابل توجهی بر مقاومت شیارشدگی مخلوط های آسفالتی دارد [احمدی و همکاران (۱۳۹۶)].

از طرفی، کاهش دمای تولید مخلوط های آسفالتی با استفاده از افزودنی های نیمه گرم، نگرشی است که امروزه برای کاهش آلایندگی زیست محیطی کارخانه های آسفالتی مد نظر قرار گرفته است. کاووسی و همکاران (۱۳۹۰)، در تحقیقات خود آزمایش هایی برای ارزیابی تأثیر استفاده از یک افزودنی نیمه گرم به نام ساسوبیت برای کاهش دمای تراکم و اختلاط مخلوط های آسفالتی انجام دادند. ارزیابی شامل اندازه گیری خصوصیات اساسی مخلوط های آسفالتی شامل تراکم پذیری و عملکرد مخلوط های آسفالتی بود. یافته های این تحقیق نشان داد که ساسوبیت می تواند کارایی مخلوط های آسفالتی را افزایش دهد. همچنین مقاومت مخلوط های آسفالتی در برابر تغییر شکل دائمی و خستگی در حضور این ماده افزایش می یابد [کاووسی، عباسی و دیندار (۱۳۹۰)]. رجبی و نیازی (۱۳۹۴)، در تحقیقی تحت عنوان تأثیر کاهش دمای پخت بر عمر خستگی مخلوط های آسفالتی، اثر افزودنی گرم ساسوبیت و زئولیت را در سه دمای اختلاط مختلف بررسی کردند. نتایج آزمایش ها نشان داد که عمر خستگی مخلوط های حاوی این افزودنی ها بیشتر از مخلوط های آسفالتی متداول بوده و نمونه های حاوی ساسوبیت دارای عمر خستگی بیشتری از نمونه های حاوی زئولیت هستند [رجبی و نیازی (۱۳۹۴)]. در تحقیقی دیگر اثر دو افزودنی گرم ساسوبیت و زایکوترم بر روی حساسیت رطوبتی و شیارشدگی مخلوط های آسفالتی ارزیابی

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- تراشه آسفالت^۱

تراشه آسفالت بازیافتی به مصالحی اطلاق می‌شود که با و یا بدون حرارت دادن، توسط دستگاه‌هایی به نام آسفالت تراش از روسازی آسفالت‌های اضمحلال شده تراشیده و جدا می‌شوند. این مصالح شامل درصدی از مصالح سنگی و قیر سفت (پیر شده) می‌باشند. مصالح تراشه آسفالتی استفاده شده در ساخت نمونه‌های آزمایشگاهی در این پژوهش از پروژه بهسازی و اصلاح روسازی آسفالتی و بهبود سطح سواره رو محور اهر- تبریز کیلومتر ۱۵ واقع در استان آذربایجان شرقی، شهرستان اهر تهیه شدند. شکل ۱ میزان افت وزنی تراشه آسفالت ۱۲۰۰ گرمی را بر اثر حرارت در داخل آون نمایش می‌دهد.



شکل ۱. افت وزنی تراشه آسفالت بر اثر حرارت در داخل آون

جدول ۱. دانه‌بندی تراشه آسفالتی حاوی سنگدانه‌هایی با پوشش قیر

مشخصات دانه بندی هدف	وزن تراشه مورد آزمایش: (۱۲۰۶/۷) گرم		الک
	درصد وزنی باقی مانده روی هر الک	درصد وزنی رد شده از هر الک	
۱۰۰	۰	۱۰۰	اینچ (۳/۴)
۹۰ - ۱۰۰	۱۷۵/۵	۸۵/۵	* اینچ (۱/۲)
-----	۸۶/۳	۷۸/۳	اینچ (۳/۸)
۴۴ - ۷۴	۳۱۹/۷	۵۱/۸	شماره (۴)
۲۸ - ۵۸	۲۶۶/۴	۲۹/۷	شماره (۸)
-----	۲۳۱/۴	۱۰/۶	شماره (۱۶)
-----	۹۲/۷	۲/۹	شماره (۳۰)
۵ - ۲۱	۲۵/۲	۰/۸	** شماره (۵۰)
-----	۷/۰	۰/۲	شماره (۱۰۰)
۲ - ۱۰	۱/۶	۰/۰۷	*** شماره (۲۰۰)
	۰/۹		Pin
نکته: ملاحظه می‌شود که دانه بندی تراشه در نقاط *، **، *** نمی‌تواند، دانه بندی هدف را تأمین نماید.			

به منظور جداسازی و تعیین درصد قیر موجود در مصالح تراشه آسفالتی از دستگاه سانتریفیوژ استفاده شد. این فرایند در آزمایشگاه مکانیک خاک نمایندگی شهرستان اهر انجام گرفت و درصد قیر تراشه آسفالتی برابر ۴٫۳ درصد تعیین شد. برای شناخت خصوصیات قیر استحصال شده از مصالح تراشه از روش آزمایش تقطیر مطابق دستورالعمل ASTM-D1856 استفاده شد تا قیر اصلی بازیابی شود. قیر استحصال شده کاملاً سفت بوده و دارای درجه نفوذ ۳۵ دهم میلی‌متر، نقطه نرمی ۵۸ درجه سانتی‌گراد و خاصیت انگمی ۵۷ سانتی‌متر بود. در ادامه کار، مقدار مناسبی از این سنگدانه‌ها که فاقد هر گونه پوشش قیری بود، انتخاب شده و دانه بندی و مشخصات فنی آن بدست آمد. جدول ۲ نتیجه دانه‌بندی تراشه‌های آسفالت فاقد قیر را نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود دانه‌بندی مذکور ریزتر از دانه بندی هدف بوده و نیازمند اصلاح با یک دانه بندی جدید از مصالح دیگر است. درصد شکستگی این مصالح در دو جبهه (مصالح روی الک شماره ۴) برابر ۹۵ درصد، شاخص تطویل برابر ۳/۵ درصد و شاخص تورق برابر ۲۹/۵ درصد بود.

جدول ۱، دانه‌بندی تراشه آسفالت منتخب را به همراه دانه‌بندی پیوسته شماره ۴ مخلوط‌های آسفالت گرم آیین‌نامه روسازی راه‌های ایران (نشریه ۲۳۴) نشان می‌دهد. برای دانه بندی تراشه آسفالت، ابتدا سنگدانه‌های به هم چسبیده در حرارت ۱۲۰ درجه سانتی‌گراد آون (گرم خانه) در مدت ۳۰ دقیقه قرار گرفتند. سپس با استفاده از یک سری الک و دستگاه شیکر، تراشه‌ها سرنند شدند. دانه‌بندی تراشه آسفالتی حاوی سنگدانه‌هایی با پوشش قیر و دانه‌بندی پیوسته شماره ۴ در جدول ۱ نمایش داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود دانه‌بندی تراشه آسفالت خارج از محدوده دانه‌بندی هدف می‌باشد.

جدول ۲. دانه بندی تراشه آسفالت با سنگدانه های فاقد پوشش

قیری

مشخصات	وزن نمونه آزمایش: (۱۱۴۸/۵) گرم		الک
	درصد وزنی	درصد وزنی	
دانه بندی هدف	باقی مانده روی هر الک	رد شده از هر الک	
۱۰۰	۰	۱۰۰	اینچ (۳/۴)
۹۰ - ۱۰۰	۵۴/۵	۹۵/۳	اینچ (۱/۲)
-----	۸۷/۹	۸۷/۶	اینچ (۳/۸)
۷۴ - ۴۴	۲۴۰/۰	۶۶/۷	شماره (۴)
۵۸ - ۲۸	۲۰۳/۹	۴۹	شماره (۸)
-----	۱۸۵/۱	۳۲/۸	شماره (۱۶)
-----	۱۰۳/۱	۲۳/۸	شماره (۳۰)
۲۱ - ۵	۷۶/۸	۱۷/۲	شماره (۵۰)
-----	۶۷/۸	۱۱/۳	شماره (۱۰۰)
۱۰ - ۲	۲۹/۶	۸/۷	شماره (۲۰۰)
	۹۹/۸		Pin



شکل ۲. قیر خالص مصرفی در این تحقیق (۱۰۰-۸۵)

۲-۴- ساسوبیت

در این تحقیق از افزودنی نیمه گرم ساسوبیت استفاده شده است. ساسوبیت به عنوان یک ماده بهبوددهنده روانی قیر توصیف شده است که به صورت پودر ریز در بازار موجود می باشد. ساسوبیت یک هیدروکربن بلوری ریز با زنجیره طولانی است که از تبدیل زغال سنگ به گاز طی فرایندهای خاص، تولید می شود [جمشیدی، حمزه، یو (۲۰۱۳)]. شکل ۳ نمونه ای از ساسوبیت استفاده شده در این تحقیق را نشان می دهد.



شکل ۳. تصویر ساسوبیت استفاده شده در این تحقیق

۲-۲- مصالح سنگی جدید

سنگدانه های جدید به کار رفته در ساخت نمونه های آسفالتی از کارخانه آسفالت آذرپنار واقع در شهرستان میانه تهیه شد. آزمایش سایش (لوس آنجلس)، آزمایشات تطویل، تورق و شکستگی سنگدانه ها بر روی این مصالح طبق استانداردهای مشخص شده، صورت گرفت. این مصالح دارای درصد سایش ۲۰ درصد، مقدار شکستگی در دو جبهه (مصالح روی الک شماره ۴) برابر ۹۹ درصد، شاخص تطویل برابر صفر درصد و شاخص تورق برابر ۱۴ درصد بودند.

۲-۳- قیر خالص مصرفی

در فرایند بازیافت، برای تهیه مخلوط های آسفالتی علاوه بر قیر موجود در مصالح تراشه آسفالت، قیر جدید نیز مورد استفاده قرار می گیرد. قیر جدید برای ساخت نمونه ها از شرکت پاسارگاد واقع در تبریز و با درجه نفوذ (۱۰۰-۸۵) تهیه شد. این قیر دارای درجه نفوذ ۸۶ دهم میلیمتر، نقطه نرمی ۴۷ درجه سانتی گراد و خاصیت انگمی بیشتر از ۱۰۰ سانتی متر بود. شکل ۲ تصویری از نمونه قیر مصرفی در پژوهش را نشان می دهد.

۲-۵- طرح آزمایش

طرح آزمایش بر اساس روش سطح پاسخ^۲ با استفاده از نرم افزار Design-Expert 7.0.0 برای نمونه‌های آسفالتی حاوی تراشه‌های محور اهر- تبریز استخراج شد. طرح آزمایش مذکور در جدول ۳ برای متغیرهای مستقل تحقیق، آمده است.

جدول ۳. طرح آزمایش بر اساس روش سطح پاسخ

شماره نمونه	تراشه (درصد)	قیر (قیر)	ساسویت (درصد)
۱	۲۵/۰۰	۴/۰۰	۱/۵۰
۲	۰/۰۰	۴/۰۰	۰/۰۰
۳	۰/۰۰	۶/۰۰	۳/۰۰
۴	۵۰/۰۰	۶/۰۰	۰۰/۰۰
۵	۲۵/۰۰	۵/۰۰	۳/۰۰
۶	۵۰/۰۰	۶/۰۰	۳/۰۰
۷	۲۵/۰۰	۵/۰۰	۱/۵۰
۸	۰/۰۰	۴/۰۰	۳/۰۰
۹	۲۵/۰۰	۵/۰۰	۱/۵۰
۱۰	۰/۰۰	۶/۰۰	۰/۰۰
۱۱	۲۵/۰۰	۵/۰۰	۱/۵۰
۱۲	۵۰/۰۰	۴/۰۰	۰/۰۰
۱۳	۲۵/۰۰	۶/۰۰	۱/۵۰
۱۴	۵۰/۰۰	۴/۰۰	۳/۰۰
۱۵	۲۵/۰۰	۵/۰۰	۰/۰۰
۱۶	۰/۰۰	۵/۰۰	۱/۵۰
۱۷	۵۰/۰۰	۵/۰۰	۱/۵۰

۲-۶- تهیه نمونه های آزمایشگاهی

جهت تهیه نمونه‌های آسفالتی حاوی مقادیر مختلف تراشه آسفالتی، مصالح سنگی و قیر خالص از روابط طرح اختلاط انیستیتو آسفالت استفاده گردید. درصد و مقادیر هر کدام به تفکیک برای نمونه های ۱۲۰۰ گرمی در جدول ۴ مشخص شده است. درصدهای مختلف ساسویت نیز با توجه به طرح آزمایش مندرج در جدول ۳، در تهیه نمونه های آسفالتی و در اختلاط با قیر خالص لحاظ گردید. در مرحله اول مصالح سنگی جدید به مدت ۴ ساعت در آونی با دمای ۱۴۰ درجه سانتی گراد حرارت داده شدند. در مرحله دوم، تراشه‌های آسفالتی به طور جداگانه و طبق توصیه های NCHRP، به مدت ۲ ساعت در آونی با دمای ۱۴۰ درجه سانتی گراد قرار گرفتند. حرارت دهی تراشه های خرده آسفالت به مدت ۲ ساعت در دمای بین ۱۱۰ تا ۱۵۰ درجه سانتی گراد، تغییرات قابل ملاحظه‌ای در خصوصیات قیر موجود در آن ایجاد نمی‌کند [خانی سانج و شیخ سندیانی (۱۳۹۰)]. در مرحله بعد، قیر (۸۵/۱۰۰) که با ساسویت مخلوط شده بود، به عنوان قیر جدید به مخلوط‌ها اضافه گردید. ساسویت با درصدهای مختلف در قیر خالص به مدت ۱۰ دقیقه توسط میله پره‌دار متصل به دریل در دمای ۱۴۰ درجه سانتی گراد اختلاط داده شد بود. سپس نمونه ها بلافاصله متراکم شدند. لازم به ذکر است که تراشه های آسفالتی بطور جداگانه حرارت داده شده بودند.

جدول ۴. تعیین درصد مختلف مصالح سنگی و قیر مورد استفاده در مخلوط بازیافتی

مقدار RAP	وزن نمونه ها (g)	%P _b	%P _{nb}	وزن قیر (g)	%P _{sm}	وزن تراشه آسفالت (g)	%P _{ns}	وزن مصالح سنگی جدید اصلاحی (g)
RAP (۰/۰)	۱۲۰۰	٪۴	۴	۴۸	۰	۰	۹۶	۱۱۵۲
	۱۲۰۰	٪۵	۵	۶۰	۰	۰	۹۵	۱۱۴۰
	۱۲۰۰	٪۶	۶	۷۲	۰	۰	۹۴	۱۱۲۸
RAP (۲۵/۰)	۱۲۰۰	٪۴	۲/۹۲	۳۵	۲۵/۰۸	۳۰۱	۷۲	۸۶۴
	۱۲۰۰	٪۵	۳/۹۳	۴۷	۲۴/۸۲	۲۹۸	۷۱/۲۵	۸۵۵
	۱۲۰۰	٪۶	۴/۹۴	۵۹	۲۴/۵۶	۲۹۵	۷۰/۵	۸۴۶
RAP (۵۰/۰)	۱۲۰۰	٪۴	۱/۸۴	۲۲	۵۰/۱۵	۶۰۲	۴۸	۵۷۶
	۱۲۰۰	٪۵	۲/۸۷	۳۵	۴۹/۶۳	۵۹۵	۴۷/۵	۵۷۰
	۱۲۰۰	٪۶	۳/۸۹	۴۷	۴۹/۱۱	۵۸۹	۴۷	۵۶۴

وزن قیر جدید مورد نیاز = وزن نمونه (۱۲۰۰) × %P_{nb}

وزن تراشه آسفالت = وزن نمونه (۱۲۰۰) × %P_{sm}

وزن مصالح سنگی جدید مورد نیاز = وزن نمونه (۱۲۰۰) × %P_{ns}

*درصد ساسویت با توجه به طرح آزمایش ۰/۱۵٪ یا ۰/۳٪ وزن قیر برای نمونه آزمایش انتخاب شده و اختلاط می گردد.

۷-۲- تست نمونه‌های آزمایشگاهی

بعد از اینکه نمونه‌ها آماده شدند، تست‌های آزمایشگاهی صورت گرفت (شکل ۴). این تست‌ها عبارت بودند از:

الف - وزن مخصوص

ب - استحکام مارشال

ج - روانی آسفالت

د - درصد فضای خالی آسفالت

ه - درصد فضای خالی مصالح سنگی آسفالت (VMA)

ح - درصد فضای خالی پر شده با قیر (VFA)

نتایج تست‌های فوق به عنوان متغیر وابسته تحقیق تعریف شدند.

۳- نتایج و بحث

نتایج آزمایشگاهی مربوط به طرح آزمایش در جدول ۵ نشان داده شده است. تحلیل داده‌های آزمایشگاهی با نرم افزار مذکور نشان می‌دهد که رابطه بین وزن مخصوص، درصد فضای خالی، VMA و VFA با مقدار تراشه آسفالتی، درصد قیر و درصد ساسوبیت یک رابطه خطی (Linear) است. لیکن رابطه بین استحکام و روانی مارشال با مقدار تراشه آسفالتی، درصد قیر و درصد ساسوبیت یک رابطه غیر خطی درجه ۲ (Quadratic) است.



شکل ۴. تست و ارزیابی نمونه‌های آسفالتی به روش مارشال

۳-۱- استحکام مارشال (Strength)

از تحلیل واریانس برای استحکام نمونه مارشال مشاهده می‌شود که A، B، AC، BC، B^2 و C^2 پارامترهای اثر گذار در پیش‌بینی مقدار استحکام مارشال هستند، لیکن C و A^2 پارامترهای اثر گذاری در این پیش‌بینی هستند. مقدار $Prob > F$ کمتر از ۰/۰۵، مقدار اثرگذاری پارامتر (Significant) را نشان می‌دهد. شکل ۵ اثر مقدار تراشه آسفالت و درصد ساسوبیت را بر روی استحکام مارشال نشان می‌دهد. همان طور که ملاحظه می‌شود با افزایش مقدار تراشه آسفالت از ۰٪ به ۲۵٪ مقدار استحکام نمونه مارشال افزایش داشته ولی با افزایش تراشه آسفالت از ۲۵٪ به ۵۰٪ استحکام نمونه مارشال کاهش می‌یابد. از طرفی استحکام مارشال، با افزایش درصد ساسوبیت از ۰٪ به ۱/۵٪ مقدار ناچیزی کاهش داشته و از ۱/۵٪ به ۳٪ افزایش چشمگیری رخ می‌دهد.

۲-۸- روش تحلیل داده‌ها

در این تحقیق، نتایج آزمایشگاهی با روش سطح پاسخ مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفتند، روش سطح پاسخ شامل مجموعه‌ای از روش‌های آماری برای طراحی آزمایش، ارزیابی میزان تأثیر پارامترهای آزمایش، توسعه مدل‌های ریاضی و بهینه سازی است. بدین منظور از نرم افزار Design - Expert 7.0.0 استفاده شد. در این نرم افزار، ضمن تحلیل آنالیز واریانس، مدل ریاضی مناسب بین متغیرهای مستقل و وابسته تحقیق برازش داده می‌شود. سپس می‌توان محدوده مورد قبول برای هر یک از متغیرهای وابسته را با توجه به معیارهای آیین نامه روسازی آسفالتی راه‌های ایران (نشریه شماره ۲۳۴) تعریف نمود تا مناسب‌ترین ترکیب برای متغیرهای مستقل ایجاد شود. در روش سطح پاسخ، تأثیر ۳ متغیر شامل، درصد تراشه‌های خرده آسفالت (RAP)، درصد قیر (Binder) و درصد

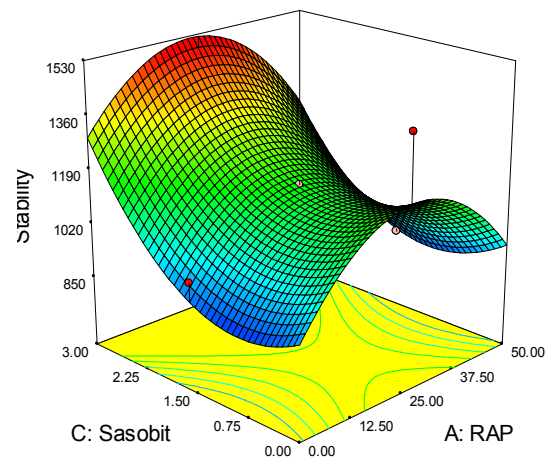
جدول ۵. نتایج آزمایشگاهی

شماره	تراشه (درصد)	قیر (قیر)	ساسوبیت (درصد)	استحکام (کیلوگرم)	روانی (میلیمتر)	VFA	درصد فضای خالی	وزن مخصوص	VMA
۱	۲۵/۰۰	۴/۰۰	۱/۵۰	۱۲۴۸	۱/۸	۶۲/۸۹	۵/۳۱	۲/۴۲۷	۱۴/۳۱
۲	۰/۰۰	۴/۰۰	۰/۰۰	۸۱۳	۲	۶۲/۵۱	۵/۵۲	۲/۴۴۶	۱۴/۷۳
۳	۰/۰۰	۶/۰۰	۳/۰۰	۱۲۵۶	۱/۴	۹۹/۹۱	۰/۰۱	۲/۵۰۷	۱۴/۴۱
۴	۵۰/۰۰	۶/۰۰	۰/۰۰	۸۹۳	۲	۷۸	۳/۷۷	۲/۳۶۸	۱۷/۱۲
۵	۲۵/۰۰	۵/۰۰	۳/۰۰	۱۳۶۰	۲	۸۲/۱۲	۲/۵۲	۲/۴۶۰	۱۴/۰۷
۶	۵۰/۰۰	۶/۰۰	۳/۰۰	۱۴۲۶	۲/۷۵	۸۴/۳۵	۲/۵۳	۲/۳۹۹	۱۶/۰۶
۷	۲۵/۰۰	۵/۰۰	۱/۵۰	۱۱۳۰	۲/۴	۷۸/۱۷	۳/۲	۲/۴۴۳	۱۴/۶۸
۸	۰/۰۰	۴/۰۰	۳/۰۰	۱۴۷۸	۱/۹۵	۷۲/۰۶	۳/۶۴	۲/۴۹۵	۱۳/۰۳
۹	۲۵/۰۰	۵/۰۰	۱/۵۰	۱۰۹۵	۲/۷	۷۶/۳۲	۳/۵۵	۲/۴۳۴	۱۴/۹۸
۱۰	۰/۰۰	۶/۰۰	۰/۰۰	۹۷۹	۲	۹۳/۷۲	۰/۹۶	۲/۴۸۴	۱۵/۲۲
۱۱	۲۵/۰۰	۵/۰۰	۱/۵۰	۱۱۴۶	۱/۷	۶۹/۲۷	۵	۲/۳۹۷	۱۶/۲۶
۱۲	۵۰/۰۰	۴/۰۰	۰/۰۰	۱۰۰۵	۱	۴۶/۵۸	۹/۶۳	۲/۲۹۳	۱۸/۰۳
۱۳	۲۵/۰۰	۶/۰۰	۱/۵۰	۱۲۰۱	۲	۹۴/۶۲	۰/۸	۲/۴۶۵	۱۴/۸۱
۱۴	۵۰/۰۰	۴/۰۰	۳/۰۰	۱۱۹۹	۱/۷	۴۶/۳۷	۹/۷۴	۲/۲۹۱	۱۸/۱۳
۱۵	۲۵/۰۰	۵/۰۰	۰/۰۰	۱۴۱۳	۳/۶	۸۱/۰۷	۲/۶۹	۲/۴۵۵	۱۴/۲۳
۱۶	۰/۰۰	۵/۰۰	۱/۵۰	۹۶۱	۲	۸۷/۷۸	۱/۶۶	۲/۵۰۵	۱۳/۵۷
۱۷	۵۰/۰۰	۵/۰۰	۱/۵۰	۸۷۶	۰/۷	۷۱/۱۱	۴/۵۱	۲/۳۸۶	۱۵/۶

نمونه مارشال کاهش ناچیزی داشته ولی با افزایش درصد ساسوبیت از ۰/۷۵٪ به ۳٪ استحکام نمونه مارشال افزایش می‌یابد. با افزایش درصد قیر از ۴٪ به ۶٪ تغییری در استحکام نمونه مارشال انجام نگرفته و ثابت می‌ماند.

۳-۲- فضای خالی (Air Voids)

از تحلیل واریانس برای فضای خالی نمونه مارشال مشاهده می‌شود که همه پارامترهای A، B و C پارامترهای اثر گذاری در این پیش‌بینی هستند. مقدار $Prob > F$ کمتر از ۰/۰۵، مقدار اثر گذاری پارامتر (Significant) را نشان می‌دهد. شکل ۷، اثر درصد قیر و درصد ساسوبیت را بر روی فضای خالی نمونه مارشال نشان می‌دهد. همان طور که ملاحظه می‌شود با افزایش درصد قیر از ۴٪ به ۶٪ و درصد ساسوبیت از ۰٪ به ۳٪، فضای خالی نمونه مارشال کاهش می‌یابد. شکل ۸، اثر مقدار تراشه آسفالت و درصد ساسوبیت را بر روی فضای خالی نشان می‌دهد. همان طور که ملاحظه می‌شود با افزایش مقدار تراشه آسفالت از ۰٪ به ۵۰٪، مقدار

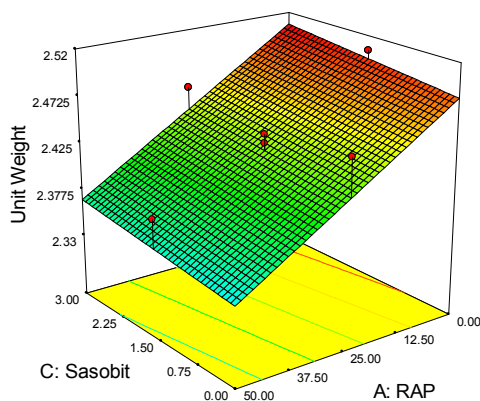


شکل ۵. اثر ساسوبیت و تراشه آسفالت بر روی استحکام مارشال

شکل ۶ اثر درصد قیر و درصد ساسوبیت را بر روی استحکام مارشال می‌دهد. همان طور که ملاحظه می‌شود با افزایش درصد ساسوبیت از ۰٪ به ۰/۷۵٪، مقدار استحکام

۳-۳ وزن مخصوص آسفالت (Unit Weight)

تحلیل واریانس برای وزن مخصوص نمونه‌ها نشان می‌دهد که همه پارامترهای A، B و C پارامترهای اثر گذار در این پیش بینی وزن مخصوص هستند. شکل ۹، اثر مقدار تراشه آسفالت و درصد ساسوبیت را بر روی وزن مخصوص آسفالت نشان می‌دهد. همان طور که ملاحظه می‌شود با افزایش مقدار تراشه آسفالت از ۰٪ به ۵۰٪، مقدار وزن مخصوص آسفالت نمونه کاهش داشته ولی با افزایش درصد ساسوبیت از ۰٪ به ۳٪ وزن مخصوص آسفالت نمونه مارشال به صورت جزئی افزایش می‌یابد.



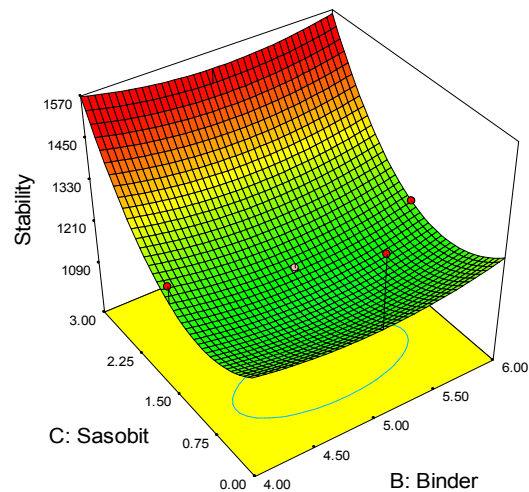
شکل ۹. اثر ساسوبیت و تراشه آسفالتی بر روی وزن مخصوص

شکل ۱۰، اثر درصد ساسوبیت و درصد قیر را بر روی وزن مخصوص آسفالت نمونه‌ها نشان می‌دهد. همان طور که ملاحظه می‌شود با افزایش درصد ساسوبیت از ۰٪ به ۳٪ مقدار وزن مخصوص آسفالت نمونه افزایش داشته و نیز با افزایش درصد قیر از ۴٪ به ۶٪ وزن مخصوص آسفالت نمونه مارشال افزایش می‌یابد.

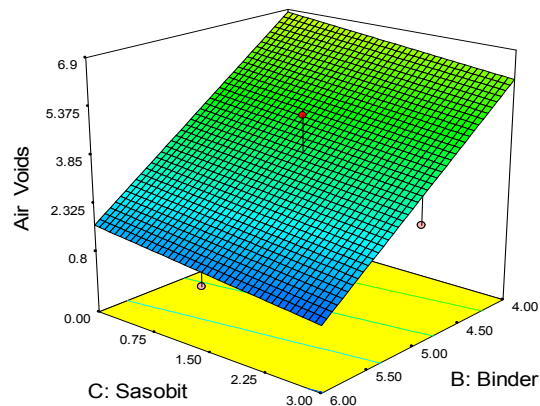
۳-۴ سایر پارامترهای مقاومتی و حجمی

به طریق مشابه می‌توان آنالیز واریانس را برای روانی، فضای خالی پر شده با قیر و فضای خالی مصالح سنگی انجام داد و نمودارهای سه بعدی را برای آنها ترسیم کرد.

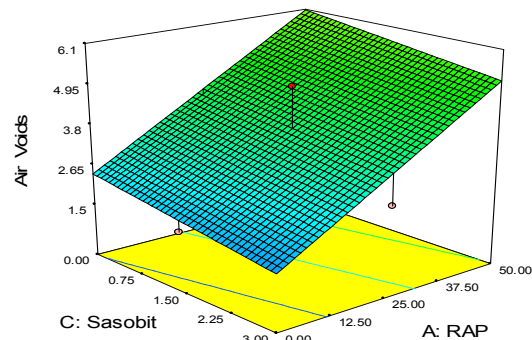
فضای خالی نمونه افزایش داشته ولی با افزایش درصد ساسوبیت از ۰٪ به ۳٪، فضای خالی نمونه مارشال کاهش می‌یابد.



شکل ۶. اثر قیر و ساسوبیت بر روی استحکام مارشال



شکل ۷. اثر قیر و ساسوبیت بر روی فضای خالی



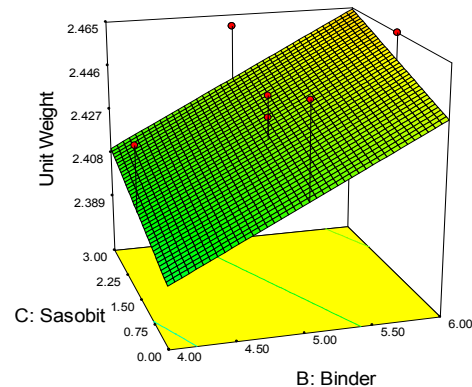
شکل ۸. اثر ساسوبیت و تراشه آسفالتی بر روی فضای خالی

ارجحیت فضای خالی ۳ تا ۴ درصد و ۵ تا ۴ درصد بین صفر و یک درون یابی می‌شود. برای روانی مارشال از جدول ۷، محدوده ۲ تا ۳/۵ مورد قبول است. بنابراین ارجحیت یک به این محدوده اختصاص داده می‌شود و سایر نقاط دارای ارجحیت صفر خواهند بود. همین کار را می‌توان برای وزن مخصوص، فضای خالی پر شده با قیر و فضای خالی مصالح سنگی انجام داد. بنابراین هر ترکیب مشخص از تراشه آسفالت، درصد قیر و ساسویت دارای مقادیر ارجحیت متناظر با درصد فضای خالی، استحکام، وزن مخصوص، روانی، فضای خالی پر شده با قیر و فضای خالی مصالح سنگی خود هستند. از این ارجحیت ها می‌توان یک میانگین هندسی به دست آورد. ارجحیت تعریف شده در شکل ۱۲ تا ۱۴ برای هر ترکیب مشخص از تراشه آسفالت، درصد قیر و ساسویت نمایش داده شده است. بدیهی است که تعدادی از نقاط دارای ارجحیت صفر خواهند بود و نقطه‌ای وجود خواهد داشت که دارای ارجحیت ماکزیمم است. این نقطه، یک ترکیب بهینه برای مخلوط آسفالت بازیافتی است.

جدول ۶. الزامات آیین نامه در تعیین قیر بهینه

نوع آزمایش	الزامات آیین نامه
فضای خالی (Air Voids)	۳ الی ۵ (نظیر ۴)
استحکام	ماکزیمم
وزن مخصوص	ماکزیمم
روانی (Flow)	۲ الی ۳/۵
فضای خالی پر شده با قیر	۶۰ الی ۷۵
فضای خالی مصالح سنگی	۱۲ الی ۱۸

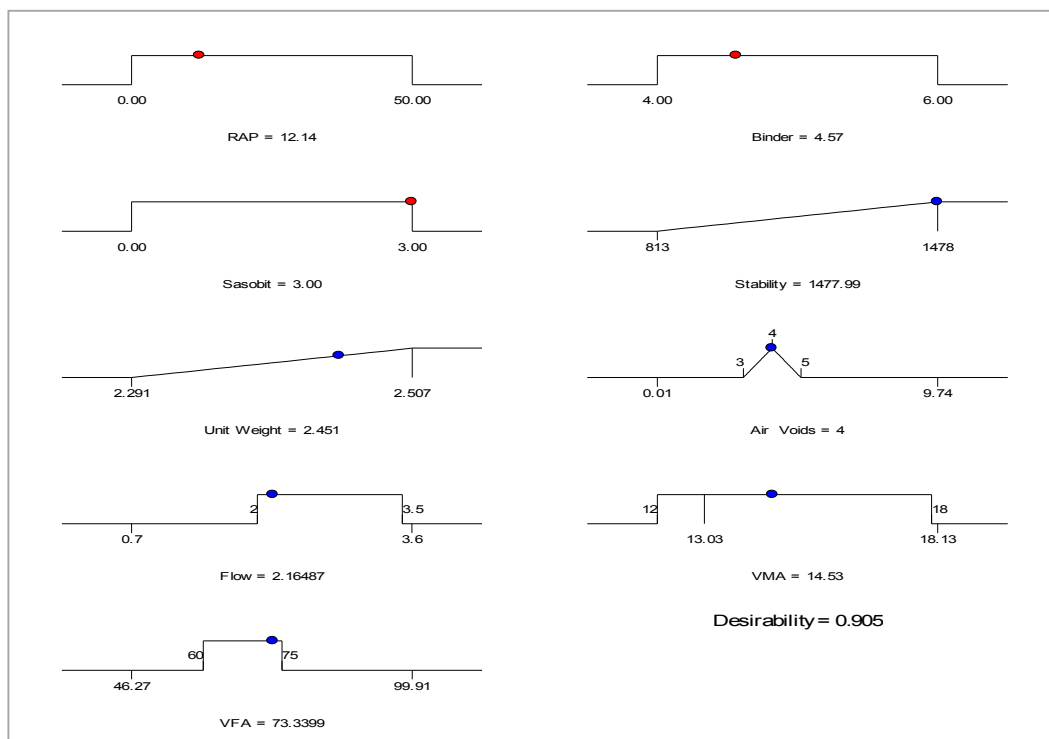
در نهایت نرم افزار، نقطه بهینه را برای تهیه مخلوط آسفالت بازیافتی حاوی افزودنی ساسویت مطابق با الزامات آیین نامه روسازی آسفالتی راه‌های ایران، در قیر ۴/۶ درصد، تراشه آسفالت ۱۲ درصد و ساسویت ۳ درصد با ارجحیت ۰/۹۰۵ تعیین می‌نماید. این نقطه دارای ارجحیت ماکزیمم است.



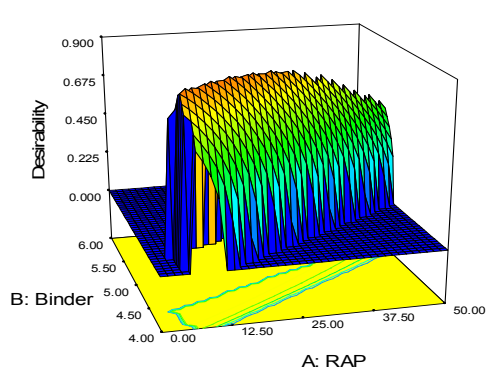
شکل ۱۰. اثر ساسویت و قیر بر روی وزن مخصوص

۴- تعیین نقطه بهینه برای ارائه طرح تولید مخلوط آسفالت بازیافتی

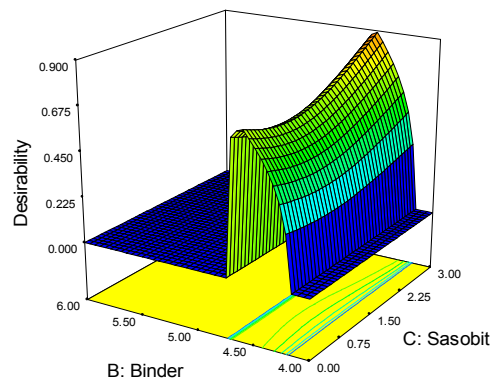
سؤال مهم در طراحی مخلوط‌های آسفالت بازیافتی حاوی تراشه آسفالت و یک افزودنی نیمه گرم، شاید این باشد که با چه ترکیبی از افزودنی، قیر و تراشه آسفالتی می‌توان به یک نقطه بهینه برای تولید مخلوط آسفالت بازیافتی دست یافت. بدین منظور با لحاظ شرایط و محدودیت‌های آیین‌نامه روسازی آسفالتی راه‌های ایران، نشریه شماره ۲۳۴، و قابلیت‌های نرم افزار مذکور می‌توان نقطه بهینه را بدست آورد. شرایط و الزامات آیین نامه روسازی آسفالتی راه‌های ایران در جدول ۶ آورده شده است. نحوه تعریف این شرایط در شکل ۱۱ بیان شده است. به عنوان مثال، کسب حداکثر استحکام یکی از معیارهای آیین نامه روسازی است. بنابراین، در شکل ۱۱، بیشترین ارجحیت^۳ (یعنی عدد یک) به بیشترین استحکام تخصیص داده شده است در حالی که کمترین ارجحیت (یعنی صفر) به کمترین مقدار استحکام اختصاص داده شده است. مقدار مجاز آیین نامه برای درصد فضای خالی، عدد ۳ تا ۵ درصد بوده، لیکن عدد ۴ درصد یک مقدار مطلوب است. بنابراین محدوده خارج از ۳ و ۵ درصد فضای خالی، دارای ارجحیت صفر بوده و محدوده بین ۳ تا ۵ درصد دارای ارجحیت بیشتر از صفر می‌باشد. ارجحیت یک به فضای خالی ۴ درصد اختصاص می‌یابد و



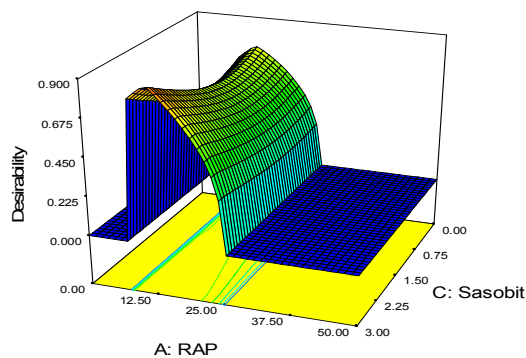
شکل ۱۱. نحوه تعریف الزامات آیین نامه روسازی راه‌های ایران



شکل ۱۲. مقدار ارجحیت به ازای قیر و ساسوبیت



شکل ۱۳. مقدار ارجحیت به ازای تراشه آسفالت و قیر



شکل ۱۴. مقدار ارجحیت به ازای تراشه آسفالت و ساسوبیت

۵- نتیجه گیری

- ۱- در این مقاله، یک روش بهینه سازی برای پیدا کردن مقدار درصد تراشه، درصد قیر و درصد افزودنی نیمه گرم در مخلوطهای آسفالتی بازیافتی به روش سطح پاسخ ارائه شد. در این روش، تأثیر توأم سه پارامتر مقدار تراشه، مقدار قیر و مقدار افزودنی با هم در نظر گرفته شد.
- ۲- افزایش مقدار ساسوبیت در مخلوطهای آسفالتی بازیافتی حاوی افزودنی ساسوبیت موجب افزایش استحکام مارشال شد. همچنین افزایش مقدار ساسوبیت، وزن مخصوص را به مقدار اندک افزایش داد.
- ۳- افزایش تراشه آسفالت تا ۲۵٪ موجب افزایش استحکام مارشال شد. همچنین افزایش تراشه آسفالت، موجب افزایش وزن مخصوص مخلوط بازیافتی گردید.
- ۴- پیشنهاد می شود اثر نوع تراشه آسفالتی نیز در تحقیقات آتی مورد بررسی قرار گیرد، همچنین هزینه مواد اولیه نیز در فرایند بهینه سازی وارد گردد.

۶- پی نوشت ها

- 1-Reclaimed Asphalt Pavement
- 2-Response Surface Method
- 3-Desirability

۷- مراجع

- احمدی، ا.، فخری، م.، عاملی، ع. و آدرسی، م.، (۱۳۹۶)، "بررسی آزمایشگاهی عملکرد بلندمدت مخلوطهای آسفالتی گرم حاوی سرباره فولاد و تراشه آسفالتی"، پژوهشنامه حمل و نقل، شماره ۱۴، ص. ۲۳.

- خانی سانیچ، ح. و شیخ سندیانی، ش.، (۱۳۹۰)، "ارزیابی روشهای بهسازی راه از منظر گرمایش جهانی"، ششمین کنگره ملی مهندسی عمران، ۶ و ۷ اردیبهشت، دانشگاه سمنان.

- رجبی، م. و نیازی، ی.، (۱۳۹۴)، "تأثیر کاستن از دمای پخت بر عمر خستگی مخلوطهای آسفالتی"، پژوهشنامه

حمل و نقل، سال دوازدهم، شماره دوم، تابستان ۱۳۹۴، ص. ۱۳۸.

- سازمان مدیریت و برنامه ریزی کشور، (۱۳۹۰)، "آیین نامه روسازی آسفالت راههای ایران و مشخصات فنی عمومی راه"، معاونت نظارت راهبردی نظام فنی اجرایی، (نشریه شماره ۲۳۴) تجدید نظر اول.

- صفارزاده، ف. و طباطبائی، ن.، (۱۳۹۴)، "ارزیابی تأثیر ساسوبیت بر مشخصات رفتاری و کارایی مخلوط های آسفالتی حاوی تراشه های آسفالتی"، نشریه علمی پژوهش های تجربی در مهندسی عمران، جلد ۲، شماره ۱، ص. ۱۵.

- عامری، م. و تقی نژاد عمران، ع.، (۱۳۸۶)، "بررسی آزمایشگاهی تأثیر تراشه های خرد آسفالت بر روی خصوصیات قیر و مخلوط های آسفالتی گرم"، پژوهشنامه حمل و نقل، سال پنجم، شماره دوم، ص. ۱۵۷.

- کاووسی، الف.، عباسی، ع. الف. و دیندار، م.، (۱۳۹۰)، "بررسی آزمایشگاهی مخلوط آسفالتی نیمه گرم (WMA) با استفاده از ساسوبیت"، ششمین کنگره ملی مهندسی عمران، اردیبهشت ۱۳۹۰، ص. ۶.

- کریمی، م.، حسینی، الف.، احمدی، الف. و عامری، ح.، (۱۳۹۱)، "امکان سنجی آزمایشگاهی استفاده از خرد آسفالت بازیافتی به عنوان جایگزین سنگدانه در مخلوط بتن غلتکی روسازی"، مهندسی حمل و نقل، سال سوم، شماره اول، پاییز ۱۳۹۰، ص. ۶۹.

- Jamshidi, A., M.O. Hamzah, and Z. You, (2013), "Performance of Warm Mix Asphalt containing Sasobit: State-of-the-art. Construction and Building Materials", 2013, 38, pp.530-553

- Mallick, R., E. Bradley, and F.L. Bradbury. (2007), "An Evaluation of Heated Reclaimed Asphalt Pavement (RAP) Material and Wax Modified Asphalt for Use in Recycled Hot Mix Asphalt (HMA)", Transportation Research Record, No. 1998.

Evaluation of the Technical Properties of Asphalt Mixtures Containing Reclaimed Asphalt Pavement and Sasobit

Babak Golchin, Assistant Professor, Department of Civil Engineering, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran.

Mojtaba Rabbi, MSc, Department of Civil Engineering, Ahar Branch, Islamic Azad University, Ahar, Iran.

E-mail: b.golchin@uma.ac.ir

Received: February 2020-Accepted: July 2020

ABSTRACT

Now days, reclaimed asphalt pavements are used in the production of asphalt mixtures. The use of this material has too many economic and environmental benefits. Beside, warm mix additives are materials that they reduce production temperature of asphalt mixtures and improve their workability in the constructed pavements. There is always a question that “what are the effects of reclaimed asphalt pavement and warm additive on the mix design parameters of asphalt mixtures?” In this research, the simultaneous effects of reclaimed asphalt pavement and a warm additive named Sasobit on the technical properties of asphalt mixtures were evaluated. For this purpose, an experimental plan was designed based on the response surface method for reclaimed asphalt pavement (from 0 to 50%), asphalt binder content (from 4 to 6%) and Sasobit content (from 0 to 3%). Then, the volumetric and strength properties of these mixtures were determined and compared with the Iranian pavement code criteria. Obtained laboratory results showed that an optimum point for fabrication of asphalt mixtures containing reclaimed asphalt pavement is a mixture with 4.6% asphalt binder, 12% reclaimed asphalt pavement and 3% Sasobit additive. Also, increasing the amount of the Sasobit showed that it increases the value of the Marshal strength, asphalt unit weight of mixtures and it reduces its air voids.

Keywords: Hot Recycling, Reclaimed Asphalt Pavement, Sasobit, Asphalt Binder