بررسی قیر بهینه در مخلوط‌های آسفالت بازیافتی به روش سطح پاسخ

مقاله علمی – پژوهشی

بابک گلچین*، دانشیار، گروه مهندسی عمران، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران
محمد مسیب زاده، دانش آموخته کارشناسی ارشد، گروه مهندسی عمران، واحد اهر، دانشگاه آزاد اسلامی، اهر، ایران
رامین مشک آبادی، دانشیار، دانشکده فناوری‌های نوین، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران
*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: b.golchin@uma.ac.ir

دریافت: ۱٤۰۳/۰٤/۰۹– پذیرش: ۱٤۰۳/۱۱/۰۱
صفحه ۵۰۲-٤۸۹

چکیده

محدودیت در دسترسی به مصالح سنگی مرغوب، قیمت بالای قیر و دستیابی به اهداف زیست‌محیطی، بازیافت مخلوط‌های آسفالتی را در صنعت راه‌سازی توسعه داده است. بازیافت مخلوط‌های آسفالتی، یک روش مناسب برای ترمیم و نگهداری رویه‌های آسفالتی است. در این پژوهش، یک روش ساده برای طراحی اختلاط مخلوط‌های آسفالت بازیافتی به روش سطح پاسخ ارائه می شود. بدین منظور، اثر نوع خرده آسفالت بازیافتی (دو نوع خرده آسفالت با مقدار قیر و مصالح سنگی متفاوت) و مقدار آن (۰، ۲۵ و ۵۰ درصد) بر پارامترهای حجمی و مقاومتی مخلوط‌های آسفالتی با استفاده از روش‌های آماری ارزیابی شده و طرح اختلاط بهینه مخلوط آسفالتی شامل ترکیب مصالح سنگی جدید، مقدار خرده آسفالت بازیافتی و مقدار قیر بهینه جدید به دست می آید. نتایج به دست آمده از پژوهش حاضر نشان می‌دهد طرح اختلاط بهینه برای تولید مخلوط آسفالت بازیافتی با خرده آسفالت‌های مختلف، متفاوت است. از طرفی مقدار خرده آسفالت بازیافتی بر ترکیب بهینه مخلوط آسفالتی اثر می‌گذارد. همچنین نتایج نشان می‌دهد با افزایش درصد خرده آسفالت در ساخت نمونه‌های آزمایشگاهی، مقادیر استحکام، درصد فضای خالی آسفالت، روانی و درصد فضای خالی مصالح سنگی افزایش می‌یابد درحالی‌که مقادیر وزن مخصوص و درصد فضای خالی پرشده با قیر کاهش می‌یابد. این تحقیق نشان داد که روش سطح پاسخ تعداد ساخت نمونه‌های آزمایشگاهی را کاهش می‌دهد.

واژه‌های کلیدی: بازیافت، خرده آسفالت، روش سطح پاسخ، طرح اختلاط، قیر

۱- مقدمه

تهیه طرح اختلاط برای مخلوط‌های آسفالتی، اولین قدم در تولید این محصول است. در روش‌های رایج، مصالح سنگی منتخب با درصدهای مختلف قیر مخلوط شده و رفتار حجمی و مقاومتی آنها اندازه گیری می‌شود. سپس هر یک از نتایج آزمایشگاهی مذکور با معیارهای مندرج در آیین‌نامه‌ها کنترل می‌شود، تا مناسبترین مقدار قیر برای آن مصالح انتخاب شود. در روش‌های رایج، امکان بررسی همزمان اثر پارامترهای دیگر مانند مقدار خرده آسفالت و نوع آن به همراه مقدار قیر وجود ندارد، از طرفی بررسی اثر اندرکنش این پارامترها با درصدهای مختلف قیر مقدور نیست. همچنین در این روش‌ها، معادله ریاضی برای بیان رفتارهای حجمی و مقاومتی به ازای ترکیب پارامترهای مختلف ارائه نمی‌شود. برای حل این مشکل، روش سطح پاسخ به عنوان یک رویکرد نوآورانه، می‌تواند با ارائه یک طرح آزمایش ریاضی، پارامترهای مختلف را به همراه مقدار قیر در معادلات ریاضی وارد نموده و تحلیل‌های مختلف آماری را فراهم نماید. روش سطح پاسخ، یک رویکرد برای طراحی برنامه‌های آزمایشگاهی، تحلیل نتایج آزمایشگاهی و بهینه سازی است (Hamzah, Golchin, & Tye, 2013,). از طرفی در روش‌های رایج

طرح اختلاط، معیارهای تصمیم‌گیری برای پارامترهای حجمی و مقاومتی به صورت جداگانه بررسی می‌شوند. این معیارها گاهاً به صورت حداکثر یا دامنه‌ای از جواب تعریف می‌شوند. بنابراین شناسایی نقطه بهینه در این روش‌ها سخت به نظر می‌رسد. در روش سطح پاسخ امکان بررسی همزمان تمام معیارها برای تک تک پارامترهای حجمی و مقاومتی به ازای تغییر مقدار قیر و نیز تغییر پارامترهای دیگر مانند نوع خرده آسفالت و مقدار آن با روش‌های بهینه‌سازی و قابلیت‌های نرم‌افزارهای کامپیوتری فراهم است. از طرفی می‌توان پارامتر قیمت تمام شده محصول نهایی را در مساله وارد نمود. در روش‌های رایج، اگر پارامترهایی مانند تغییر نوع خرده آسفالت و مقدار آن نیز به مساله اضافه شود، تعداد تهیه نمونه‌های آزمایشگاهی بسیار زیاد خواهند بود. این موضوع، هزینه و زمان تهیه نمونه‌های آسفالتی را افزایش می‌دهد. روش سطح پاسخ با طراحی یک طرح آزمایشگاهی ساده بر اساس اصول ریاضی می‌تواند تعداد نمونه‌های آزمایشگاهی لازم را کاهش دهد. این امر موجب کاهش در زمان و هزینه‌های ساخت نمونه‌ها می‌گردد. روش سطح پاسخ در علوم مهندسی شیمی (Zaid, Al-sharify, Hamzah, & Rushdi, 2022) و مهندسی محیط زیست (Bashir, Amr, Aziz, Aun, & Sethupathi, 2015) بسیار مورد توجه قرار گرفته‌است. چنین به نظر می‌رسد که این روش می‌تواند در حل مسائل موجود در تکنولوژی آسفالت، علی‌الخصوص مخلوط‌های آسفالت بازیافتی موفق باشد. در این پژوهش، از روش سطح پاسخ برای شناسایی ترکیب مناسب از مقدار قیر، نوع خرده آسفالت و مقدار آن برای تهیه مخلوط‌های آسفالت بازیافتی استفاده می‌شود. امروزه فناوری بازیافت در اکثر شاخه‌های علوم مهندسی از جمله مهندسی راه گسترش یافته است (Shafabakhsh & Rezaeian, 2010). افزایش هزینه‌های ساخت و نگهداری رویه های آسفالتی راه‌ها، سبب توجه به استفاده از خرده آسفالت در صنعت راه‌سازی شده است. در سالهای اخیر پژوهش‌های مختلفی در خصوص امکان استفاده از خرده آسفالت در ساخت رویه‌های آسفالتی شده است. احمدی و همکاران (۱۳۹٦) به بررسی شیارافتادگی در مخلوط‌های آسفالتی ساخته شده با خرده آسفالت و سرباره فولاد پرداختند (Ahmadi, Fakhri, & Ameli, 2017). ایشان گزارش نمودند که استفاده از خرده آسفالت اثر قابل توجهی در بهبود مقاومت شیارافتادگی مخلوط‌های آسفالتی دارد. عامری و همکاران (۱۳۸٦)، تأثیر مدت و دمای حرارت‌دهی به خرده آسفالت را بر مقاومت مارشال و مقاومت کششی غیرمستقیم آسفالت بازیافت شده بررسی نمودند (Ameri, Jarrahi, & Mansourian, 2007). نتایج تحقیق ایشان نشان داد افزایش مدت زمان و دمای حرارت دهی به میزان زیادی باعث افزایش مقاومت مارشال و مقاومت کششی غیرمستقیم می‌شود. طولابی و منصوریان (۱۳۹۵) مقاومت شکست مخلوط‌های آسفالتی نیمه گرم حاوی خرده آسفالت را در دمای پایین بررسی کردند (Toulabi & Mansourian, 2016). در این تحقیق مقاومت شکست مخلوط‌های آسفالتی نیمه گرم حاوی ۱۵٪ خرده آسفالت، نسبت به بقیه نمونه‌ها نتایج بهتری ارائه کرد. مجیدی فرد و طباطبایی (۱۳۹٤) اثر استفاده از روان کننده‌ها را در خصوصیات عملکردی بتن آسفالتی حاوی خرده آسفالت بررسی نمودند (Majidifar & Tabatabaei, 2015). نتایج حاصل از این تحقیق نشان داد که استفاده از روان کننده‌ها، موجب بهبود کارایی و بازیابی خصوصیات قیر پیر شده خرده آسفالت‌ها می‌شود. در تحقیق دیگر، تأثیر افزودنی ساسوبیت بر روی ویژگی‌های رفتاری مخلوط‌های آسفالتی حاوی خرده آسفالت بررسی شد (Saffarzadeh & Tabatabaei, 2014). نتایج نشان داد که ساسوبیت می‌تواند در ساخت و اجرای مخلوط‌های آسفالتی حاوی ۲۵ درصد خرده آسفالت مناسب باشد. کی‌منش و همکاران (۱۳۹۵) آزمایش مارشال و خزش دینامیکی را بر روی مخلوط‌های آسفالتی دارای خرده آسفالت انجام دادند (Keymanesh, Omran, Khosravi, & Shahryari, 2016). نتایج آزمایش‌ها نشان داد که سختی مخلوط‌های آسفالتی با افزایش مقدار خرده آسفالت افزایش می‌یابد. ژانگ و همکاران (۲۰۱۹) از یک ماده جوان‌ساز در تولید مخلوط‌های آسفالتی حاوی خرده آسفالت استفاده کردند (Zhang et al., 2019). این ماده جوان‌ساز توانست مقاومت مخلوط آسفالتی دارای خرده آسفالت بازیافتی را در دماهای پایین بالا برده و مقاومت خستگی آن‌ها را در دمای میانی بهبود دهد. نوفرینی و همکاران (۲۰۱۷) اندرکنش قیر استخراج شده از خرده آسفالت بازیافتی و قیر جدید را از دیدگاه رفتار رئولوژیک بررسی نمودند (Noferini, Simone, Sangiorgi, & Mazzotta, 2017). ایشان نشان دادند که مقدار قیر بازیافتی رفتار رئولوژیک قیر غیر پیر شده را به صورت معناداری تغییر می‌دهد. استفاده از خرده آسفالت در مخلوط‌های آسفالتی، مزایایی مانند کاهش هزینه‌های ساخت، صرفه‌جویی در استفاده از منابع طبیعی، کاهش مصرف انرژی در تولید مصالح، کاهش

آلودگی‌های زیست‌محیطی دارد، لیکن مشخصات فنی مصالح سنگی بازیافتی، دانه‌بندی این مصالح، درصد قیر موجود در خرده آسفالت، درجه جذب و نفوذ قیر در مصالح سنگی بازیافتی، مشخصات فنی قیر بازیابی شده (درجه نرمی، خاصیت انگمی و ویسکوزیته) تأثیر بسیار مهمی در رفتار مخلوط‌های آسفالتی بازیافتی خواهد داشت. بنابراین می‌توان گفت نوع و محل استحصال خرده آسفالت بازیافتی به همراه مقدار آن، پارامترهای بسیار مهم در تولید مخلوط‌های بازیافتی خواهند بود. در این راستا، هدف از انجام این پژوهش، ارائه یک روش طرح اختلاط جدید برای مخلوط های آسفالتی به روش سطح پاسخ با در نظر گرفتن بررسی اثر مقدار و نوع خرده آسفالت بازیافتی است. در این تحقیق، نمونه‌های آزمایشگاهی با مقدار و نوع خرده آسفالت‌های مختلف ساخته شده و مشخصات فنی این نمونه‌ها با روش سطح پاسخ تحلیل می‌شود. بدین منظور، تحلیل آماری بر روی داده‌های استخراج شده آزمایشگاهی صورت گرفته و مدل‌های سه بعدی ریاضی برای نمایش رفتارهای مقاومتی و حجمی مخلوط‌های آسفالتی ارائه می‌گردد. سپس شرایط بهینه تولید با در نظر گرفتن معیارهای آیین‌نامه‌ای برای ساخت روسازی آسفالتی راه‌ها در کشور (نشریه شماره ۲۳٤) در فضای رفتارهای مقاومتی و حجمی شناسایی می‌شود.

۲-مواد و روش‌ها

۲-۱- مواد و مصالح مصرفی

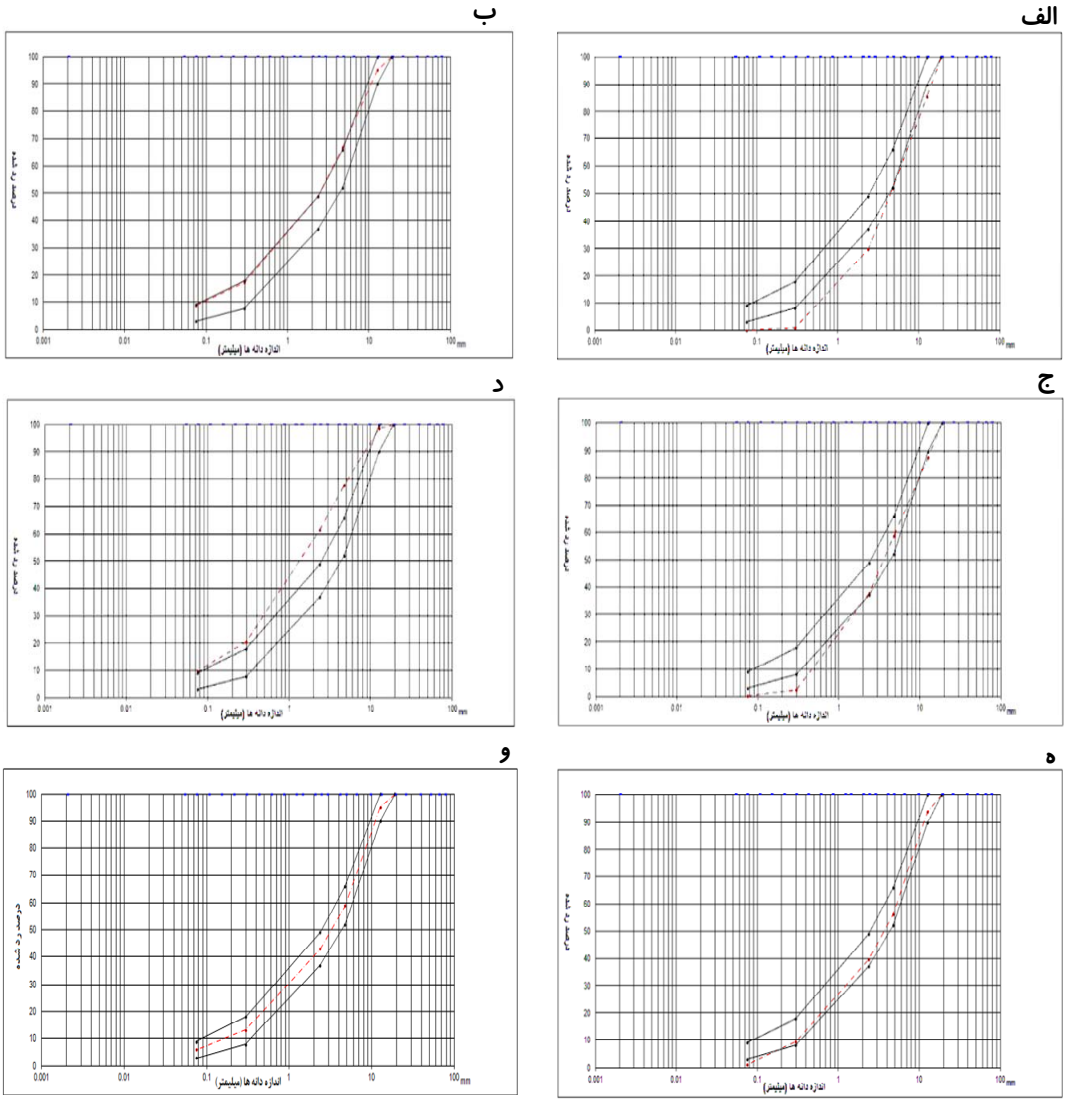
در این تحقیق از مصالح خرده آسفالت بازیافتی راه‌های برون‌شهری محور اهر- تبریز و محور اهر- مشکین‌شهر در استان‌های آذربایجان شرقی و اردبیل به عنوان دو منبع مختلف از خرده آسفالت در تهیه نمونه‌های آسفالتی استفاده شد. در گام نخست، درصد قیر مصالح خرده آسفالتی با انجام آزمایش جداسازی قیر تعیین شد. به‌طور متوسط درصد قیر مصالح خرده آسفالت مصرفی برای نمونه محور اهر – تبریز برابر ٤/۳ درصد و برای نمونه محور اهر – مشکین‌شهر ۵/۳ به دست آمد.

جدول ۱، مشخصات فنی قیرهای جداسازی شده از مصالح خرده آسفالتی مختلف را نشان می‌دهد. همان‌گونه که مشاهده می‌شود مشخصات فنی این قیرها با هم متفاوت است.

جدول ۱. مشخصات فنی قیرهای جداسازی شده از مصالح خرده آسفالتی

نوع مصالح	درجه نفوذ (دهم میلی‌متر)	شکل‌پذیری (سانتی‌متر)	نقطه نرمی (سانتی‌گراد)	خاصیت ویسکوزیته (سانتی‌استوکس)
استاندارد آزمایش	ASTM D5	ASTM D113	ASTM 2398	ASTM D2170
خرده آسفالت محور اهر- تبریز	۳۵	۵۷	۵۷/٦	۵۸٦
خرده آسفالت محور اهر-مشکین‌شهر	۳۱	٤٦	۷۰/۳	٦۸۹

پس از جداسازی قیر از مصالح سنگی موجود، این مصالح دانه‌بندی شدند. منحنی دانه‌بندی این مصالح قبل از جداسازی قیر و بعد از جداسازی قیر در شکل ۱ (الف-د) ارائه شده است. این دانه‌بندی‌ها با محدوده مجاز دانه‌بندی تیپ شماره ٤ آیین‌نامه روسازی آسفالتی راه‌های ایران مقایسه شدند. شکل ۱-الف و د نشان می‌دهد که دانه‌بندی مصالح سنگی استحصال شده از هر دو محور، ریزدانه‌تر بوده و خارج از محدوده مجاز آیین نامه‌ای هستند. این بدان معنی است که مصالح سنگی جدید درشت‌دانه‌تری لازم است تا منحنی دانه‌بندی مخلوط نهایی اصلاح شود. در این تحقیق، برای اصلاح دانه‌بندی از مصالح سنگی جدید آهکی از معدن قافلان‌کوه شهرستان میانه استفاده شد. دانه‌بندی مصالح سنگی جدید به گونه‌ای انتخاب شد تا ترکیب آن با دانه‌بندی خرده آسفالت‌های بازیابی در محدوده مجاز دانه‌بندی آیین‌نامه قرار گیرد. منحنی دانه‌بندی مصالح سنگی جدید برای اصلاح دانه‌بندی مخلوط بازیافتی و منحنی دانه‌بندی نهایی در شکل ۱-و و ه ارایه شده است. بدیهی است که منحنی دانه‌بندی مصالح سنگی جدید، درشت دانه‌تر انتخاب شده است تا در ترکیب آن با دانه‌بندی ریز مصالح خرده آسفالت بازیافتی، محدوده مجاز آیین‌نامه‌ای تأمین شود. خصوصیات فیزیکی مصالح سنگی بازیافت شده از خرده آسفالت در جدول ۲ و خصوصیات فیزیکی مصالح سنگی اصلاحی جدید در جدول ۳ آورده شده است.



شکل ۱. منحنی دانه‌بندی: الف) مصالح خرده آسفالتی قبل از جداسازی قیر برای خرده آسفالت محور اهر- تبریز، ب) سنگ‌دانه‌های حاصل از خرده آسفالت پس از جداسازی قیر برای خرده آسفالت محور اهر – تبریز، ج) مصالح خرده آسفالتی قبل از جداسازی قیر برای خرده آسفالت محور اهر- مشکین‌شهر، د) سنگ‌دانه‌های حاصل از خرده آسفالت پس از جداسازی قیر برای خرده آسفالت محور اهر - مشکین‌شهر، ه) مصالح سنگی جدید برای اصلاح دانه‌بندی خرده آسفالت بازیافتی برای دستیابی به دانه‌بندی هدف و و) منحنی دانه‌بندی هدف

جدول ۲. خصوصیات فیزیکی مصالح سنگی بازیافت شده از خرده آسفالت

نوع مصالح (قسمت درشت‌دانه)	درصد شکستگی در دو جبهه مصالح روی الک شماره (٤)	درصد تطویل و تورق	
		شاخص تطویل	شاخص تورق
اهر- تبریز	۹۵	۳/۵	۲۵/۹
اهر- مشکین‌شهر	۹۹	۱۱	۲۳/٦

جدول ۳. خصوصیات فیزیکی مصالح سنگی اصلاحی جدید

نوع مصالح (قسمت درشت‌دانه)	درصد شکستگی در دو جبهه مصالح روی الک شماره (٤)	درصد تطویل و تورق		درصد سایش لوس آنجلس
		شاخص تطویل	شاخص تورق	
مصالح جدید قافلانکوه میانه	۹۹	۰	۱٤	۲۰

با توجه به اینکه، احتمالاً قیر موجود در مصالح خرده آسفالت در تولید مخلوط آسفالتی نهایی کافی نیست، بنابراین از قیر جدید ۱۰۰-۸۵ استفاده شد. مشخصات فنی قیر جدید عبارتند از: نقطه نرمی ٤۷ درجه سانتی‌گراد، شکل‌پذیری بزرگ‌تر از ۱۰۰ سانتی‌متر و درجه نفوذ ۸٦ دسی‌متر.

۲-۲- تهیه نمونه‌های آسفالتی و آزمایش‌ها

در این پژوهش، نمونه‌های مختلف آسفالتی در درصدهای مختلف خرده آسفالت (۰٪، ۲۵٪، ۵۰٪) ساخته شدند. این نمونه‌های آسفالتی به گونه‌ای ساخته شدند که قیر موجود در آن‌ها (شامل قیر خرده آسفالت قدیمی و قیر جدید) در سه درصد مختلف (٤٪، ۵٪، ٦٪) تعریف شد. جدول ٤، طرح آزمایش به کار رفته را برای دو نوع خرده آسفالت نشان می‌دهد.

جدول ٤. طرح آزمایش بر استفاده از روش سطح پاسخ

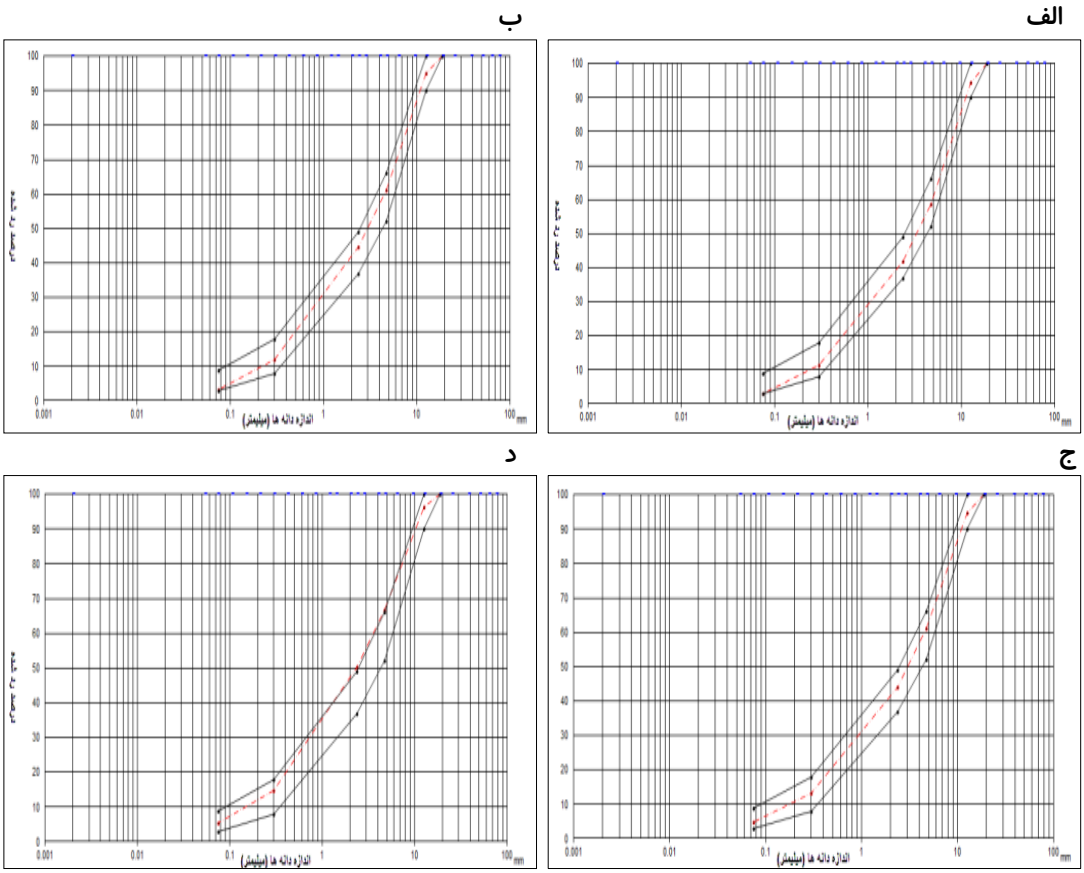
شماره نمونه	درصد خرده آسفالت	درصد قیر مخلوط	نوع خرده آسفالت
۱	۰	٤	محور اهر-تبریز
۲	۰	۵	محور اهر-تبریز
۳	۰	٦	محور اهر-تبریز
٤	۲۵	٤	محور اهر-تبریز
۵	۲۵	۵	محور اهر-تبریز
٦	۲۵	۵	محور اهر-تبریز
۷	۲۵	۵	محور اهر-تبریز
۸	۲۵	٦	محور اهر-تبریز
۹	۵۰	٤	محور اهر-تبریز
۱۰	۵۰	۵	محور اهر-تبریز
۱۱	۵۰	٦	محور اهر-تبریز
۱	۰	٤	محور اهر-مشکین‌شهر
۲	۰	۵	محور اهر-مشکین‌شهر
۳	۰	٦	محور اهر-مشکین‌شهر
٤	۲۵	٤	محور اهر-مشکین‌شهر
۵	۲۵	۵	محور اهر-مشکین‌شهر
٦	۲۵	۵	محور اهر-مشکین‌شهر
۷	۲۵	۵	محور اهر-مشکین‌شهر
۸	۲۵	٦	محور اهر-مشکین‌شهر
۹	۵۰	٤	محور اهر-مشکین‌شهر
۱۰	۵۰	۵	محور اهر-مشکین‌شهر
۱۱	۵۰	٦	محور اهر-مشکین‌شهر

این طرح آزمایش به روش سطح پاسخ (RSM)[1] طراحی شده است. پس از آماده‌سازی نمونه‌ها، آزمایش‌های مقاومتی و حجمی (استحکام، روانی، درصد فضای خالی، وزن مخصوص، درصد فضای خالی مصالح سنگی و درصد فضای خالی پر شده با قیر) بر روی نمونه‌ها صورت گرفت. این آزمایش‌ها به این دلیل استفاده شدند که عملکرد مخلوط‌ها و طرح اختلاط بهینه بر اساس آیین‌نامه روسازی راه‌های آسفالتی ایران بررسی شود. در تهیه نمونه‌های آسفالتی با درصدهای مختلف مصالح سنگی جدید، قیر جدید و خرده آسفالت از روابط طرح اختلاط انستیتو آسفالت استفاده شد. جدول ۵، مقادیر هر یک از موارد فوق را در تهیه نمونه‌های ۱۲۰۰ گرمی نشان می‌دهد. شکل ۲، تصاویر تهیه نمونه‌های آسفالتی را نشان می‌دهد. در این پژوهش، مصالح سنگی جدید و خرده آسفالت بازیافتی در آون به ترتیب در دمای ۱۸۵ و ۱۵۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ٤ و ۲ ساعت قرار گرفتند. بر اساس تحقیقات انجام گرفته توسط گروه NCHRP، حرارت‌دهی به خرده آسفالت‌ها در این مدت و در این دما باعث تغییر قابل توجه در مشخصات قیر خرده آسفالت نمی‌شود. در مرحله بعدی قیر ۱۰۰- ۸۵ به عنوان قیر جدید به مخلوط‌ها اضافه گردید. همان‌طور که پیش‌تر ذکر گردید بعد از جداسازی قیر از نمونه‌های خرده آسفالتی، آزمایش دانه‌بندی بر روی این مصالح انجام شد، به خاطر اینکه این مصالح به دلیل تراشیده شدن از سطح روسازی تبدیل به یک مخلوط ریزدانه گردیده و در صورت استفاده مجدد در ساخت مخلوط آسفالتی بازیافتی نیاز به اصلاح دانه‌بندی دارد، برای اصلاح دانه‌بندی آن از مصالح سنگی جدید با دانه‌بندی تعریف‌شده که در نمودار شکل ۱ و قابل مشاهده است، استفاده می‌شود. این کار باعث می‌شود تا دانه‌بندی مخلوط بازیافتی در محدوده مورد هدف مطابق شکل ۱-ه قرار گرفته و مشخصات دانه‌بندی تیپ ٤ آیین‌نامه روسازی راه‌های ایران (نشریه ۲۳٤) تأمین گردد. نتایج اصلاح دانه‌بندی مخلوط ترکیب بازیافتی با درصدهای مختلف خرده آسفالت در شکل ۳ دیده می‌شود.

جدول ۵. تعیین مقدار مصالح سنگی و قیر در مخلوط آسفالت بازیافتی

محل نمونه‌برداری		مقدار قیر طرح آزمایش	درصد قیر موردنیاز	وزن قیر (گرم)	وزن خرده آسفالت (گرم)	وزن مصالح سنگی جدید اصلاحی (گرم)
نمونه محور اهر – تبریز	RAP (٪۰)	٪٤	٤	٤۸	۰	۱۱۵۲
		٪۵	۵	٦۰	۰	۱۱٤۰
		٪٦	٦	۷۲	۰	۱۱۲۸
	RAP (٪۲۵)	٪٤	۲/۹۲	۳۵	۳۰۱	۸٦٤
		٪۵	۳/۹۳	٤۷	۲۹۸	۸۵۵
		٪٦	٤/۹٤	۵۹	۲۹۵	۸٤٦
	RAP (٪۵۰)	٪٤	۱/۸٤	۲۲	٦۰۲	۵۷٦
		٪۵	۲/۸۷	۳۵	۵۹۵	۵۷۰
		٪٦	۳/۸۹	٤۷	۵۸۹	۵٦٤
نمونه محور اهر– مشکین‌شهر	RAP (٪۰)	٪٤	٤	٤۸	۰	۱۱۵۲
		٪۵	۵	٦۰	۰	۱۱٤۰
		٪٦	٦	۷۲	۰	۱۱۲۸
	RAP (٪۲۵)	٪٤	۲/٦٦	۳۲	۳۰٤	۸٦٤
		٪۵	۳/٦۷	٤٤	۳۰۱	۸۵۵
		٪٦	٤/٦۸	۵٦	۲۹۸	۸٤٦
	RAP (٪۵۰)	٪٤	۱/۳۱	۱٦	٦۰۸	۵۷٦
		٪۵	۲/۳٤	۲۸	٦۰۲	۵۷۰
		٪٦	۳/۳۷	٤۰	۵۹٦	۵٦٤

شکل ۲. تصاویر تهیه نمونه‌های مخلوط آسفالت بازیافتی



شکل ۳. نمودار منحنی دانه‌بندی مورد استفاده در ساخت مخلوط آسفالت بازیافتی حاوی خرده آسفالت: الف) ۲۵٪ (اهر–تبریز)، ب) ۲۵٪ (اهر– مشکین‌شهر)، ج) ۵۰٪ (اهر– تبریز) و د) ۵۰٪ (اهر– مشکین‌شهر)

۲-۳- روش تحلیل داده‌ها

در این پژوهش، مشخصات مقاومتی و حجمی نمونه‌های آزمایشگاهی با روش سطح پاسخ و با نرم‌افزار دیزاین اکسپرت[۲] تحلیل شده و با دستورالعمل‌های مندرج در نشریه شماره ۲۳٤، آیین‌نامه روسازی آسفالتی راه‌های ایران، مورد مقایسه قرار گرفتند. روش سطح پاسخ شامل روش‌های آماری در طراحی آزمایش، ارزیابی اثر متغیرهای تحقیق، ارائه مدل‌های آماری و انجام فرایند بهینه‌سازی است. این روش در کارهای پژوهشی گوناگون در علوم مختلف از جمله قیر و مخلوط‌های آسفالتی استفاده می‌گردد (Abdullah, Hamzah, Golchin, & Hasan, 2018; Caner, 2017; Hamzah, Golchin, & Woodward, 2017; Lapian, Ramli, Pasra, & Arsyad, 2020; Golchin, Nori, & Meshkabadi, 2022).

۳- نتایج آزمایش‌ها

برای به دست آوردن اثر اصلی و متقابل متغیرهای تأثیرگذار (مقدار و نوع خرده آسفالت و نیز مقدار قیر) بر پارامترهای آزمایشگاهی، از روش سطح پاسخ استفاده شد. متغیرهای تأثیرگذار آزمایشگاهی را می‌توان ورودی‌های مدل و پارامترهای اندازه‌گیری شده آزمایشگاهی را می‌توان خروجی‌های مدل نامید.

جدول ٦. نتایج آزمایشگاهی مربوط به نمونه‌های بازیافتی

محل تهیه خرده آسفالت	درصد خرده آسفالت	درصد قیر	استحکام مارشال	روانی	فضای خالی پر شده با قیر	فضای خالی	وزن مخصوص	فضای خالی مصالح
محور اهر–تبریز	۰	٤	۱۱٤٥	۱/۹۰	۸۱/۱۳	۲/۲۲	۲/٥۳۱	۱۱/۷٥
محور اهر–تبریز	۰	٥	۱۱۰۸	۳/۱۰	۹۰/٥۷	۱/۲٥	۲/٥۱٦	۱۳/۲۰
محور اهر–تبریز	۰	٦	۸۸۷	۳/٤۰	۱۰۰/۰۰	۰/۰۰	۲/٥۰۸	۱٤/٤۰
محور اهر–تبریز	۲٥	٤	۱۰۷۱	۱/٦۰	٦۰/۹۱	٥/۷٥	۲/٤۱٦	۱٤/۷۱
محور اهر–تبریز	۲٥	٥	۱٤٤۲	۳/۰٥	۸۷/۰٦	۱/۷۳	۲/٤۸۰	۱۳/۳۸
محور اهر–تبریز	۲٥	٥	۱٤۲۱	۳/۱۰	۸۷/۱۷	۱/۷۲	۲/٤۸۰	۱۳/۳٦
محور اهر–تبریز	۲٥	٥	۱٤٥۹	۳/۱٥	۸۷/۲۸	۱/۷۰	۲/٤۸۱	۱۳/۳٥
محور اهر–تبریز	۲٥	٦	۹۸۸	۳/٦۰	۹۷/۹۲	۰/۳۰	۲/٤۷۷	۱٤/۳۸
محور اهر–تبریز	٥۰	٤	۱۳٤۲	۲/٥۰	٥۸/۸۷	٦/۱۰	۲/۳۸۳	۱٤/۸۲
محور اهر–تبریز	٥۰	٥	۱۹٤۳	۳/۱۰	۸۲/٥۰	۲/٤۱	۲/٤۳۹	۱۳/۷٥
محور اهر–تبریز	٥۰	٦	۱۲۰۱	٤/۱۰	۹۲/۰۸	۰/۱۳	۲/٤٥۸	۱۳/۹۹
محور اهر–مشکین‌شهر	۰	٤	۱۱٤٥	۱/۹۰	۸۱/۱۰	۲/۲۲	۲/٥۳۱	۱۱/۷٥
محور اهر–مشکین‌شهر	۰	٥	۱۱۰۸	۳/۱۰	۹۰/۹۰	۱/۲٥	۲/٥۱٦	۱۳/۲۰
محور اهر–مشکین‌شهر	۰	٦	۸۸۷	۳/٤۰	۱۰۰/۰۰	۰/۰۰	۲/٥۰۸	۱٤/٤۰
محور اهر–مشکین‌شهر	۲٥	٤	۱۳٤۲	۲/۱۰	٥۷/۱۰	٦/٦٦	۲/۳۹۳	۱٥/٥۳
محور اهر–مشکین‌شهر	۲٥	٥	۱۱٦۳	٤/۳۰	۷۱/۱۰	٤/٥۳	۲/٤۰۹	۱٥/۸٥
محور اهر–مشکین‌شهر	۲٥	٥	۱۱۸۰	٤/۳٥	۷۱/٤۰	٤/٥۳	۲/٤۰۹	۱٥/۸٤
محور اهر–مشکین‌شهر	۲٥	٥	۱۱۹۷	٤/٤۰	۷۱/۹۰	٤/٤۳	۲/٤۱۲	۱٥/۷٥
محور اهر–مشکین‌شهر	۲٥	٦	۱۲۹۳	۳/۰۰	۹٤/۷۰	۰/۷۸	۲/٤٦٥	۱٤/۸۰
محور اهر–مشکین‌شهر	٥۰	٤	۱٤۷۸	۳/۰۰	٤٦/٤۰	۹/٦۹	۲/۲۹٤	۱۸/۰۹
محور اهر–مشکین‌شهر	٥۰	٥	۱٦۲۰	۳/۹٥	٦٥/۰۰	٥/۸۹	۲/۳٥۳	۱٦/۸٤
محور اهر–مشکین‌شهر	٥۰	٦	۱٥۹۰	۳/٥۰	۹۰/۸۰	۱/۳۸	۲/٤۲۹	۱٥/۰۸

در این روش، تأثیر دو متغیر عددی شامل درصد خرده آسفالت (RAP)[۳] و درصد قیر (Binder)[٤] و یک متغیر کیفی به نام محل تهیه خرده آسفالت بر مقدار متغیرهای وابسته (استحکام مارشال، روانی، درصد فضای خالی، وزن مخصوص، درصد فضای خالی مصالح سنگی و درصد فضای خالی پر شده با قیر) مورد بررسی قرار گرفت. جدول ٦ نتایج حاصل آزمایشگاهی را نشان می‌دهد. نرم‌افزار دیزاین اکسپرت توانایی دارد تا روابط ریاضی را بین متغیرهای ورودی و خروجی برقرار نموده و این روابط را به صورت نمودارهای سه بعدی نمایش دهد. شکل ٤ اثر متغیرهای ورودی تحقیق را بر روی نتایج آزمایشگاهی نشان می‌دهد. همان‌طور که از نتایج آزمایش استحکام مارشال مشخص است، با افزایش مقدار خرده آسفالت، استحکام مخلوط‌ها افزایش می‌یابد. همچنین افزایش مقدار خرده آسفالت در مخلوط‌های بازیافتی موجب افزایش فضای خالی نمونه‌ها شده و منجر به کاهش وزن مخصوص آن‌ها می‌شود. چرا که با افزایش مقدار خرده آسفالت، فضای خالی مخلوط آسفالتی افزایش و در نتیجه وزن مخصوص آن کاهش می‌یابد. از طرفی، افزایش مقدار خرده آسفالت در مخلوط‌های بازیافتی موجب افزایش روانی یا همان نرمی نمونه‌های مارشال می‌شود. دلیل آن شاید ناشی از مصرف بیشتر درصد قیر (با افزایش مصالح سنگی خرده آسفالت) در مخلوط بازیافتی است. همچنین، افزایش مقدار خرده آسفالت موجب کاهش فضای خالی پرشده با قیر در نمونه‌های مارشال می‌شود.

٤- تعیین طرح اختلاط بهینه

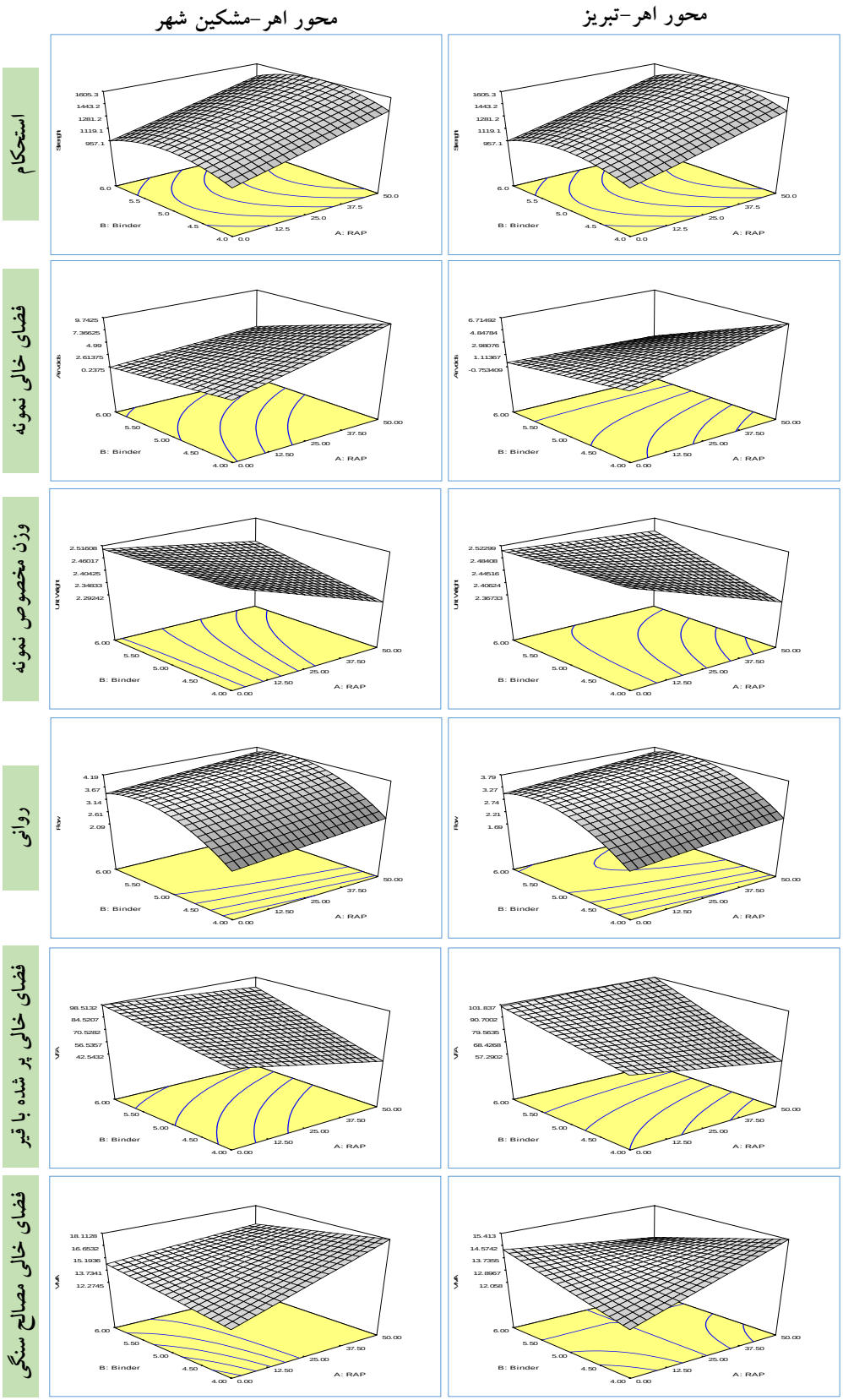
یکی از سؤالات مهمی که در طراحی مخلوط‌های بازیافتی مطرح می‌شود این است که چه ترکیبی از قیر و خرده آسفالت، یک نقطه بهینه در تولید مخلوط‌های بازیافتی است. بدیهی است که این ترکیب بایستی الزامات مندرج در آیین‌نامه روسازی را مطابق اطلاعات جدول ۷ تأمین کند. در این تحقیق، با استفاده از نرم‌افزار دیزاین اکسپرت، معیارهای مندرج در جدول ۷ بر روی نتایج اعمال شد و پارامتر ارجحیت[۵] برای تک‌تک معیارهای تصمیم‌گیری تعریف شد. به عنوان مثال مقدار ارجحیت برای فضای خالی نمونه‌های آسفالتی با درصد فضای خالی کمتر از ۳٪ و بیشتر از ۵٪ برابر صفر در نظر گرفته شد، درحالی‌که مقدار متناظر این پارامتر برای فضای خالی ٤٪، مقدار یک تعریف گردید. در این نرم‌افزار، عدد یک بالاترین مقدار ارجحیت و عدد صفر کمترین مقدار آن می‌باشد. در ادامه، بیشترین استحکام مارشال نمونه‌ها با عدد یک و کمترین استحکام مارشال با عدد صفر معرفی گردید. همین مورد برای سایر معیارها نیز در جدول ۷ تعریف شدند. معادله ۱ نحوه ترکیب و استفاده از پارامتر ارجحیت را برای تمام معیارها نشان می‌دهد. این پارامتر به شناسایی مناسب‌ترین نقطه در تهیه مخلوط آسفالتی بازیافتی کمک می‌کند.

$$D = \sqrt[n]{d_1 \times d_2 \times d_3 \times d_4 \times d_5 \times d_6} \qquad (۱)$$

در این معادله d_i، مقدار پارامتر ارجحیت برای معیار i ام و D نتیجه ترکیب پارامترهای ارجحیت است. این معادله در واقع بیانگر یک میانگین هندسی برای کلیه معیارهای مندرج در جدول ۷ است که به ازای کلیه درصدهای مختلف خرده آسفالت و قیر قابل تعریف است. شکل ۵ مقدار ارجحیت را به ازای درصدهای مختلف قیر و خرده آسفالت برای مصالح محور اهر- تبریز و اهر- مشکین‌شهر نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود بسیاری از نقاط دارای ارجحیت برابر صفر بوده و نمی‌توانند به عنوان یک ترکیب مناسب در طراحی مخلوط‌های بازیافتی مورد توجه قرار گیرند. نقطه بهینه، نقطه‌ای است که دارای بیشترین ارجحیت است. جدول ۸ نقطه بهینه پیشنهادی را برای تولید مخلوط آسفالت بازیافتی نشان می‌دهد. با توجه به این جدول، نمونه‌های به دست آمده از محور اهر–تبریز در قیر ٤/۷۳٪ و خرده آسفالت ۵۰٪ با مقدار ارجحیت ۰/٦۹ و نمونه‌های محور اهر–مشکین‌شهر در قیر ٤/۷۵٪ و خرده آسفالت ۲۱/۱۲٪ با مقدار ارجحیت ۰/٦۳ به عنوان یک نقطه بهینه تعریف می‌شوند.

۵- نتیجه‌گیری

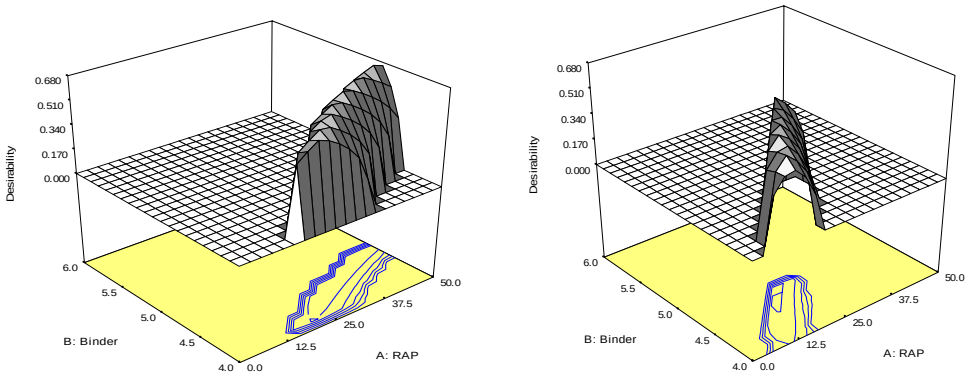
در این تحقیق، اثر نوع و مقدار خرده آسفالت بر پارامترهای طرح اختلاط آسفالت بازیافتی با استفاده از روش سطح پاسخ بررسی شد. سپس ترکیب بهینه در تولید مخلوط بازیافتی به ازای مقدار خرده آسفالت و مقدار قیر برای دو نوع خرده آسفالت مختلف با رعایت الزامات آیین‌نامه روسازی آسفالتی راه‌های ایران تعیین گردید. نتایج آزمایش‌ها نشان داد که مقدار خرده آسفالت، نوع خرده آسفالت و مقدار قیر بر رفتار مقاومتی و حجمی مخلوط‌های بازیافتی تأثیر دارند. افزایش درصد خرده آسفالت، مقادیر استحکام، درصد فضای خالی آسفالت، روانی و درصد فضای خالی مصالح سنگی را افزایش می‌دهد درحالی‌که مقادیر وزن مخصوص و درصد فضای خالی پرشده با قیر مخلوط‌های آسفالت بازیافتی را کاهش می‌دهد. همچنین تغییر مقدار قیر، شدیداً پارامترهای حجمی و مقاومتی را تغییر می‌دهد. فرایند بهینه‌سازی نشان داد که استفاده از یک درصد مشخص از خرده آسفالت، یک مقدار مناسب برای همه انواع مختلف خرده آسفالت‌ها نیست.



شکل ٤. اثر قیر و تراشه آسفالتی بر روی خواص نمونه مارشال: محور اهر- تبریز و اهر – مشکین‌شهر

جدول ۷. مشخصات فنی برای مخلوط‌های آسفالتی

مشخصات	الزامات آیین‌نامه روسازی	مقدار تعریف شده
مقاومتی	فضای خالی	۳ الی ۵ درصد ترجیحاً ٤ درصد
	استحکام مارشال	حداکثر
	وزن مخصوص	حداکثر
حجمی	روانی مارشال	۲ الی ۳/۵ سانتیمتر
	فضای خالی پر شده با قیر برای نمونه مارشال	٦۰ الی ۷۵ درصد
	فضای خالی مصالح سنگی در نمونه مارشال	۱۲ الی ۱۸ درصد



شکل ۵. مقدار ارجحیت به ازای درصدهای مختلف قیر و خرده آسفالت در محور اهر- تبریز و اهر- مشکین‌شهر

جدول ۸. ترکیب بهینه پیشنهادی برای مخلوط‌های بازیافتی محورهای اهر- تبریز و اهر– مشکین‌شهر

ارجحیت	فضای خالی مصالح	وزن مخصوص	فضای خالی	فضای خالی پر شده با قیر	روانی	استحکام مارشال	درصد قیر	درصد خرده آسفالت	نوع خرده آسفالت
۰/٦۸٦	۱٤/۵۸	۲/٤۱	٤	۷۳/٤۸	۳/٤	۱۵۹۲/۹	٤/۷۳	۵۰	اهر- تبریز
۰/٦۲۵	۱٤/۸۷	۲/٤٤	٤	۷٤/۲٤	۳/۵	۱۳۱٦/۰	٤/۷۵	۲۱/۱۲	اهر–مشکین‌شهر

٦- پی‌نوشت‌ها

1- Response Surface Method (RSM)
2- Design-Expert
3- Reclaimed Asphalt Pavement (RAP)
4- Binder
5- Desirability

۷- مراجع

-Abdullah, N. H., Hamzah, M. O., Golchin, B., & Hasan, M. R. M. (2018). An alternative protocol to artificially simulate short-term ageing of binders for selected regional condition. *Construction and Building Materials, 161* 654-664. **doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.11.045**

-Lapian, F., Ramli, M., Pasra, M., & Arsyad, A. (2020). Opportunity applying response surface methodology (RSM) for optimization of performing butonic asphalt mixture using plastic waste modifier: a preliminary study. *Paper presented at the IOP Conference Series: Earth and Environmental Science.*

-Majidifar, H., & Tabatabaei, N. (2015). Investigating the effect of using lubricant on the performance characteristics of asphalt concrete containing asphalt aggregates. *7th Iranian Bitumen and Asphalt Conference*, Tehran. December 15, [In Persian]

-Noferini, L., Simone, A., Sangiorgi, C., & Mazzotta, F. (2017). Investigation on performances of asphalt mixtures made with Reclaimed Asphalt Pavement: Effects of interaction between virgin and RAP bitumen. *International Journal of Pavement Research and Technology, 10*(4): 322-332.
doi.org/10.1016/j.ijprt.2017.03.011

-Saffarzadeh, F., & Tabatabaei, N. (2014). Evaluation of the effect of Sasobit on the behavior characteristics and performance of asphalt mixtures containing recycled asphalt aggregetes. *8th National Congress On Civil Engineering*, Babol.May 7, [In Persian].

-Shafabakhsh, G., & Rezaeian, M. (2010). Analysis of the effects of applying different quantities and types of additives on strength parameters of cold in-situ recycled mixtures made of bitumen foam. *Journal of Transportation Research, 7*(1): 53-66.
[In Persian]

-Toulabi, M., & Mansourian, A. (2016). Laboratory investigation of fracture toughness of semi-warm asphalt mixtures containing asphalt aggrigates. *8th Conference on Asphalt and Asphalt Mixes*, Tehran. November 1, [In Persian].

-Zaid, H., Al-sharify, Z., Hamzah, M. H., & Rushdi, S. (2022). Optimization of different chemical processes using response surface methodology-a review: response surface methodology. *Journal of Engineering and Sustainable Development, 26*(6): 1-12.
doi.org/10.31272/jeasd.26.6.1

-Zhang, J., Sun, H., Jiang, H., Xu, X., Liang, M., Hou, Y., & Yao, Z. (2019). Experimental assessment of reclaimed bitumen and RAP asphalt mixtures incorporating a developed rejuvenator. *Construction and Building Materials, 215* 660-669.
doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.04.202

-Ahmadi, A., Fakhri, M., & Ameli, A. R. (2017). The Comparison of Static and Dynamic Criteria in Characterizing Rutting Properties of Warm Mix Asphalt Containing Recycled Materials. *Journal of Transportation Research, 14*(4): 129-145. [In Persian]

-Ameri, M., Jarrahi, A., & Mansourian, A. (2007). The Comparison of Static and Dynamic Criteria in Characterizing Rutting Properties of Warm Mix Asphalt Containing Recycled Materials. *Journal of Transportation Research, 4*(3): 205-211. [In Persian]

-Bashir, M. J., Amr, S. S. A., Aziz, S. Q., Aun, N. C., & Sethupathi, S. (2015). Wastewater treatment processes optimization using response surface methodology (RSM) compared with conventional methods: review and comparative study. *Middle-East J. Sci. Res, 23*(2): 244-252.

-Caner, M. (2017). Comparison of Artifıcial Neural Networks and Response Surface Methodology in Stone Mastic Asphalt Using Waste Granite Filler. *International Journal of Intelligent Systems and Applications in Engineering, 5*(4): 185-188.
doi.org/10.18201/ijisae.2017533860

-Golchin, B., Nori, B., & Meshkabadi, R. (2022). Technical and Economical Evaluation of Cold Recycled Asphalt Using Emulsified Asphalt Binder through Response Surface Method and Developing an Optimized Mix Design. *Amirkabir Journal of Civil Engineering, 54*(6): 2151-2172.
doi.org/10.22060/ceej.2021.20403.7413

-Hamzah, M. O., Golchin, B., & Tye, C. T. (2013). Determination of the optimum binder content of warm mix asphalt incorporating Rediset using response surface method. *Construction and Building Materials, 47,* 1328-1336.
doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.06.023

-Hamzah, M. O., Golchin, B., & Woodward, D. (2017). A quick approach for rheological evaluation of warm asphalt binders using response surface method. *Journal of Civil Engineering and Management, 23*(4): 475-486.
doi.org/10.3846/13923730.2016.1210216

-Keymanesh, M., Omran, A. T., Khosravi, P., & Shahryari, N. (2016). *Evaluation of the effect of small asphalt aggregetes on the quality of hot asphalt mixtures*. 8th Conference on Asphalt and Asphalt Mixes, Tehran. November 1, [In Persian]

Investigating Optimum Bitumen Content in Recycled Asphalt Mixtures with Response Surface Method

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

Mohammad Moseyyebzadeh, M.Sc., Grad., Department of Civil Engineering, Ahar Branch, Islamic Azad University, Ahar, Iran.

Ramin Meshkabadi, Associate Professor, Department of Advanced Technologies, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran.

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

Received: November 2024- Accepted: February 2025

ABSTRACT

Limited access to high-quality aggregates, rising bitumen costs, and environmental considerations have driven the advancement of asphalt mixture recycling in the road construction industry. Recycling asphalt mixtures has proven to be an effective method for rehabilitation and maintenance of asphalt pavements. This study introduces a simple approach to mix design of recycled asphalt mixtures using response surface methodology. The research examines the influence of recycled asphalt pavement type (two variations with differing bitumen and aggregate content) and its proportion (0, 25 and 50%) on the volumetric and strength properties of asphalt mixtures through statistical analysis. An optimal mix design is established, incorporating the composition of new aggregates, the proportion of recycled asphalt pavement, and the quantity of newly optimized bitumen. The findings indicate that the optimal mix design varies depending on the type of recycled asphalt pavement used. Additionally, the proportion of recycled asphalt pavement significantly influences the mix design of the asphalt mixtures. Results reveal that as the percentage of recycled asphalt pavement increases in laboratory specimens, there is an increase in strength, asphalt air voids, flow, and VMA. Conversely, bulk specific gravity and VFA decrease. Furthermore, this research demonstrates that employing the response surface methodology effectively reduces the number of laboratory specimens required for testing.

Keywords: Recycling, Recycled Asphalt Pavement, Response Surface Method, Mix Design, Bitumen