

## بررسی اثر الیاف پارافیبر بر مشخصات فنی مخلوط‌های آسفالت بازیافتی گرم کارخانه‌ای و انتخاب یک ترکیب مناسب

### مقاله علمی - پژوهشی

بابک گلچین، گروه مهندسی عمران، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران  
محمد علیان، گروه مهندسی عمران، واحد اهر، دانشگاه آزاد اسلامی، اهر، ایران  
رامین مشک‌آبادی\*، دانشکده فناوری‌های نوین، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران  
\*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: r\_meshkabadi@uma.ac.ir

دریافت: ۱۴۰۱/۰۸/۲۰ - پذیرش: ۱۴۰۲/۰۴/۲۸

صفحه ۸۵-۱۰۲

### چکیده

امروزه در ساخت رویه‌های آسفالتی به دلیل افزایش شدید قیمت قیر و مشکلات زیست‌محیطی به موضوع بازیافت گرم توجه شده است. از نکته نظر فنی، الیاف مصالحی هستند که تعدادی از رفتارهای مخلوط‌های آسفالتی را بهبود می‌دهند. هدف این پژوهش، بررسی رفتار فنی مخلوط‌های آسفالتی گرم حاوی تراشه آسفالت در حضور الیاف پارافیبر به منظور تعیین مقدار مناسب این الیاف و تراشه آسفالتی در تهیه مخلوط‌های آسفالتی گرم بازیافتی است. بدین منظور از یک رویکرد جدید برای طراحی آزمایش، تحلیل نتایج و انتخاب ترکیب مناسب آسفالتی استفاده شد. این رویکرد، از یک روش طراحی عاملی دو سطحی در محیط نرم‌افزار دیزاین اکسپرت بر اساس توابع مطلوبیت استفاده می‌کند. نتایج تهیه نمونه‌های آزمایشگاهی و تست آنها نشان داد که در مخلوط حاوی ۵۰ درصد تراشه و ۶ درصد قیر، افزایش الیاف از صفر به ۰/۲ درصد، مقدار استقامت مارشال را ۱۷/۴ درصد افزایش و مقدار روانی را ۳/۸ درصد کاهش می‌دهد. در همین مخلوط با مقدار قیر ۴ درصد، با افزایش الیاف از صفر به ۰/۲ درصد، مقدار استقامت و روانی مارشال به ترتیب ۱/۸ و ۲۱/۵ افزایش پیدا می‌کند. بیشترین فضای خالی مربوط به مخلوط آسفالتی، حاوی ۵۰ درصد تراشه، ۴ درصد قیر و ۰/۲ درصد الیاف است. تحلیل نتایج نشان می‌دهد که ترکیب مناسب برای تولید مخلوط آسفالت بازیافتی با توجه به معیارهای طراحی در آیین‌نامه روسازی راه‌های آسفالتی ایران برای مصالح منتخب در این تحقیق، ۶ درصد قیر، ۵۰ درصد تراشه آسفالت و ۰/۲ درصد الیاف پارافیبر است.

واژه‌های کلیدی: بازیافت آسفالت، طراحی عاملی دو سطحی، الیاف پارافیبر، قیر، طراحی آزمایش

### ۱- مقدمه

گرفته است. حمزه و همکاران از یک افزودنی وکس برای تولید نمونه‌های آزمایشگاهی با تراشه آسفالت در دماهای پایین استفاده کردند (Hamzah, Gungat, and Golchin, 2017). این مخلوط آسفالتی توانست مشخصات مقاومتی و حجمی قابل قبولی را مطابق با استانداردهای تعریف‌شده تأمین

بازیافت گرم مخلوط‌های آسفالتی، یک روش مناسب برای ترمیم و نگهداری روسازی راه‌ها است. قیر و مصالح سنگی به‌کار رفته در تراشه‌های آسفالتی، موجب کاهش هزینه‌های تولید مخلوط‌های آسفالتی بازیافتی می‌شوند. تحقیقات زیادی با افزودنی‌های مختلف برای بهبود رفتار این مخلوط‌ها صورت

کنند. ژانگ و همکاران از یک ماده جوان‌ساز برای بهبود رفتار پیرشدگی قیر در تراشه‌های آسفالتی استفاده کردند (Zhang et al, 2019). نتایج آزمایشگاهی، بهبود رفتار خستگی مخلوط‌های بازیافتی را در حضور این افزودنی نشان داد. میرحسینی و همکاران اثر ماده جوان‌ساز بایوآیل را بر روی نمونه‌های آسفالتی با مقدار تراشه زیاد بررسی کردند (Mirhosseini et al, 2019). این ماده حساسیت رطوبتی مخلوط‌های آسفالت بازیافتی را بهبود داد. فخری و متحد نانو رس را در ساخت مخلوط‌های بازیافتی به کار بردند (Fakhri and Mottahed, 2021). این ترکیب توانست مقاومت رطوبتی مخلوط حاصل را ۱۳ درصد افزایش دهد. گلچین و ربی از ساسوبیت به عنوان افزودنی گرم برای کاهش ویسکوزیته قیر در فرآیند اختلاط با تراشه آسفالتی استفاده کردند (Golchin and Rabbi, 2020). ایشان تلاش کردند یک ترکیب بهینه را برای مقدار ساسوبیت و قیر در آسفالت بازیافتی ارائه نمایند. در تحقیق حاضر از الیاف در ساخت مخلوط‌های بازیافتی استفاده شده است. استفاده از الیاف یک روش شناخته شده برای تغییر و بهبود خواص مخلوط‌های آسفالتی است. نام‌آور جهرمی و همکاران نشان دادند که الیاف فورتا باعث افزایش مدول برجهندگی مخلوط آسفالتی می‌شود (Namavar Jahromi and Aboutalebi Esfahani, 2017). معتمدی و همکاران با انجام آزمایش‌های مقاومت شکست بر روی نمونه‌های نیم‌دایره خمشی در دمای میانی نشان دادند که الیاف مرکب آرامید پلی اولفین با مقدار مصرف ۰/۸ درصد وزن مخلوط آسفالتی، بیشترین مقاومت کشش غیرمستقیم را دارد (Motamedi, Zaker and Hosseini, 2017). کفاش زاده در تحقیقات خود نشان داد که الیاف شیشه و پت، رفتار خستگی مخلوط آسفالتی را بهبود می‌دهند (Kaffashzadeh, 2017). جهرمی و خدایی ویژگی‌های مخلوط‌های مسلح شده با الیاف کربن را بررسی کرده و نشان دادند که الیاف کربن باعث افزایش استقامت مارشال، کاهش روانی مارشال و افزایش فضای خالی آسفالت شده و عمر خستگی و مقاومت در برابر تغییر شکل دائمی را افزایش می‌دهد (Jahromi and Khodaei, 2008). جاسکولا و همکاران در تحقیقات خود از الیاف آرامید پلی آلپالوفین استفاده کردند و نتیجه گرفتند که استفاده از این الیاف می‌تواند عملکرد مخلوط آسفالتی را در دمای پائین بهبود بخشد (Jaskula, 2016). آراویند و همکاران (Stienss and Szydłowski, 2016). تحقیقات خود از سه نوع الیاف سلولز، الیاف پلی‌استر و مینرال با درصدهای مختلف به عنوان اصلاح‌کننده برای مخلوط آسفالتی استفاده کردند. نتایج نشان داد که مشخصات خستگی می‌تواند توسط الیاف بهبود یابد (Aravind, Shaopeng and Ning, 2009). پنگ و همکاران مخلوط‌های آسفالتی مسلح شده با الیاف کربن را در معرض آزمایش‌های مکانیکی شامل مدول برجهندگی، بارگذاری خزشی، خستگی تیرچه خمشی و مقاومت کششی غیرمستقیم قرار دادند. مطابق نتایج ایشان، مخلوط‌های حاوی الیاف کربن، مقاومت بیشتری را در برابر تغییر شکل‌های دائمی از خود نشان دادند (Pang et al, 2014). فخری و حسینی به بررسی آزمایشگاهی مقاومت شیارشدگی و حساسیت رطوبتی آسفالت‌های گرم اصلاح‌شده با الیاف شیشه‌ای حاوی تراشه آسفالتی پرداختند. نتایج نشان داد که افزودن الیاف شیشه‌ای به آسفالت گرم بدون تراشه، اگرچه مقاومت شیارشدگی مخلوط را بالا می‌برد ولی باعث بهبود حساسیت رطوبتی آسفالت نمی‌گردد، اما افزودن الیاف شیشه‌ای به آسفالت بازیافتی می‌تواند باعث بهبود شیارشدگی و حساسیت رطوبتی مخلوط آسفالتی گردد (Fakhri and Hosseini, 2017). در تحقیق حاضر از الیاف پارافیر برای تسلیح مخلوط آسفالتی حاوی تراشه آسفالت استفاده شده است. پارافیر یک افزودنی تجاری از نوع الاستو پلاستومر و قابل استفاده در مخلوط‌های آسفالتی است که مرکب از رشته‌های الیاف ویژه با دمای ذوب نسبتاً بالا و نیز مواد پودری سفید رنگ است. این الیاف، محصول فرآیندهای شیمیایی در مجتمع‌های پتروشیمی است. پارافیر در تحقیقات گذشته در مخلوط‌های آسفالتی استفاده شده است. شفابخش و همکاران اثر الیاف پارافیر را در بهبود مدول برجهندگی و رفتار شیارشدگی مخلوط‌های آسفالتی لاستیکی گزارش نمودند (Shafabakhsh, Asadi and Mohammadi Janaki, 2021). در تحقیقی دیگر، مقاومت خزش دینامیکی برای مخلوط‌های آسفالتی توسط الیاف پارافیر بهتر از الیاف پلی‌اتیلن گزارش شده است (Namavar, Sisakhti and Gizil Beyglou, 2017). نام‌آور جهرمی و ابوطالبی اصفهانی، افزایش استقامت مارشال و مدول برجهندگی نمونه‌های آسفالتی مسلح شده با الیاف پارافیر را گزارش نمودند (Namavar Jahromi and Aboutalebi Esfahani, 2018). به صورت کلی می‌توان گفت پژوهش‌های زیادی در خصوص

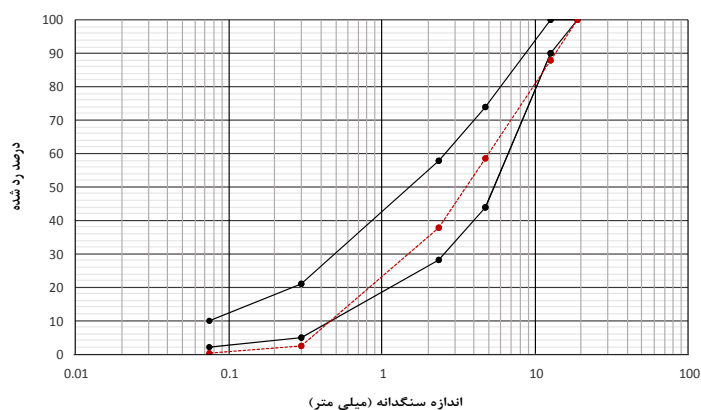
۸۶

## ۲- مواد و روش‌ها

### ۲-۱ مواد و مصالح مصرفی

برای ساخت نمونه‌های آزمایشگاهی در این پژوهش از تراشه‌های آسفالتی به دست آمده از روسازی‌های قدیمی، مصالح سنگی جدید از جنس سنگ‌آهک، قیر جدید از نوع ۱۰۰-۸۵ و الیاف پارافینر استفاده شد. تراشه آسفالتی در ساخت نمونه‌های آزمایشگاهی از پروژه بهسازی و اصلاح روسازی آسفالتی در محور اهر- مشگین‌شهر، کیلومتر ۱۱ واقع در استان آذربایجان شرقی تهیه شد. شکل ۱ منحنی دانه‌بندی این مصالح را نشان می‌دهد. در این منحنی همچنین حد بالا و پایین دانه‌بندی را مطابق با آیین‌نامه روسازی راه‌های ایران نمایش داده شده است. جدول ۱ مقدار حد بالا و پایین را نمایش می‌دهد. برای جداسازی و تعیین درصد قیر موجود در تراشه آسفالتی از دستگاه سانتریفیوژ استفاده شد. این فرآیند در آزمایشگاه مکانیک خاک (نمایندگی شهرستان اهر) انجام گرفت. مصالح بازیافت شده دارای ۹۹ درصد شکستگی در دو جبهه و شاخص تطویل ۱۱ درصد بود. شکل ۲ دانه‌بندی تراشه آسفالت بدون پوشش قیر را نشان می‌دهد. همان‌طور که از شکل مشخص است این دانه‌بندی نیاز به اصلاح دارد تا ضوابط آیین‌نامه روسازی آسفالتی راه‌های ایران تأمین گردد. بدین منظور از مصالح درشت‌دانه‌تر جدید برای ترکیب با تراشه آسفالت استفاده شد. این مصالح جدید از معدن شن و ماسه نقدوز در شهرستان اهر تهیه شد. شکل ۳ دانه‌بندی نهایی به کار رفته برای ساخت نمونه‌های آسفالت گرم بازیافتی را در آزمایشگاه نشان می‌دهد.

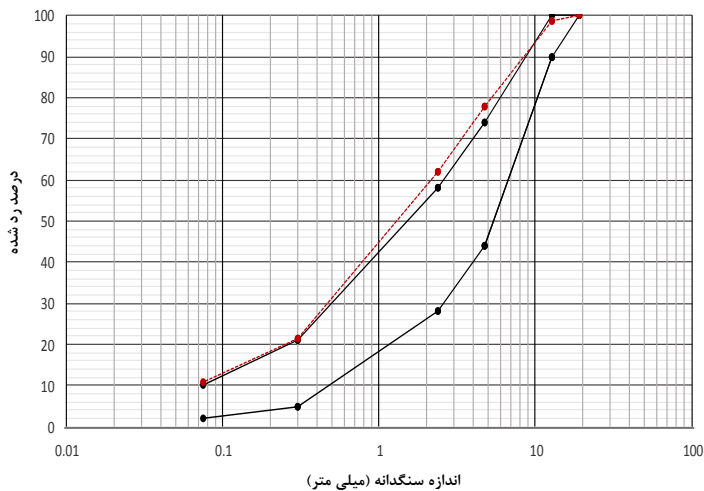
نقش الیاف مختلف در مخلوط‌های آسفالتی صورت گرفته‌است، لیکن دانش اندکی در خصوص فناوری پارافینر وجود دارد. در این تحقیق از الیاف پارافینر در مقدارهای ۰/۱ و ۰/۲ درصد وزنی مخلوط آسفالت بازیافتی استفاده شد. هدف این پژوهش بررسی تأثیر الیاف پارافینر حاوی تراشه آسفالتی بر متغیرهای مقاومتی (استقامت و روانی مارشال) و متغیرهای حجمی (درصد فضای خالی پرشده با قیر ۱، درصد فضای خالی نمونه، درصد فضای خالی سنگدانه ۲ و وزن مخصوص) مخلوط آسفالتی به منظور تعیین مقدار مناسب الیاف، قیر و تراشه آسفالتی است. نیل به این هدف نیازمند تهیه نمونه‌های آزمایشگاهی مختلف و انجام آزمایش‌های متعدد با هزینه‌های بسیار زیاد در شرایط کنونی کشور است. هزینه‌های بالای آزمایشگاهی پژوهشگران را به سمت کاهش تعداد نمونه‌های آزمایشگاهی سوق می‌دهد (Hamzah, Golchin and Woodward, 2017). بدین منظور و برای کاهش هزینه‌ها اخیراً پژوهشگران آزمایشگاهی در مطالعه رفتار مواد آسفالتی از روش سطح پاسخ که یک روش آماری است استفاده کرده‌اند. در بررسی رفتار مخلوط‌های آسفالتی دارای تراشه آسفالت، رفیک و همکاران، طاهرخانی و نوریان و نیز منصوریان و گلچین روش سطح پاسخ را به کار بردند (Rafiq et al, 2021; Taherkhani and Noorian, 2021; Golchin and Mansourian, 2107). در این تحقیق از یک روش طرح آزمایش به نام طراحی عاملی دو سطحی ۳ برای کاهش تعداد نمونه‌های آزمایشگاهی استفاده شده است. در این روش پس از طراحی و انجام آزمایش‌ها، تحلیل آماری بر روی داده صورت گرفته تا ترکیب مناسب برای تهیه مخلوط آسفالت بازیافتی بدست آید.



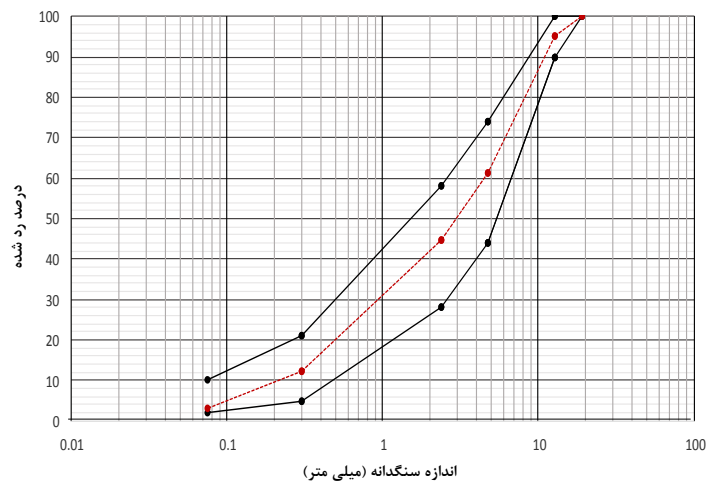
شکل ۱. دانه‌بندی تراشه آسفالت حاوی سنگدانه‌های با پوشش قیری

جدول ۱. حد بالا و پایین دانه بندی مطابق با آیین نامه روسازی راه های ایران

اندازه الک	۱۹ میلی متر	۱۲/۵ میلی متر	شماره ۴	شماره ۸	شماره ۵۰	شماره ۲۰۰
درصد وزنی رد شده از الک	۱۰۰	۱۰۰-۹۰	۷۴-۴۴	۵۸-۲۸	۲۱-۵	۱۰-۲



شکل ۲. دانه بندی تراشه آسفالت بدون پوشش قیری



شکل ۳. دانه بندی نهایی برای ساخت مخلوط آسفالت گرم بازیافتی بدون پوشش قیری

خاصیت انگمی بیشتر از ۱۰۰ سانتی متر است. در این تحقیق از الیاف پارافینر برای مسلح کردن مخلوط آسفالتی استفاده شد. شکل ۴ نمونه ای از الیاف استفاده شده در این تحقیق را نشان می دهد. مشخصات این الیاف در جدول ۲ نمایش داده شده است.

قیر لازم به کار رفته در این پژوهش شامل قیر موجود در مصالح تراشه آسفالت و مقداری قیر جدید از نوع ۸۵-۱۰۰ است. قیر موجود در تراشه آسفالت دارای درجه نفوذ ۳۵ دهم میلی متر، نقطه نرمی ۵۸ درجه سانتی گراد و خاصیت انگمی ۵۷ سانتی متر است. این در حالی است که قیر جدید دارای درجه نفوذ ۸۶ دهم میلی متر، نقطه نرمی ۴۷ درجه سانتی گراد و



شکل ۴. تصویر الیاف استفاده شده در این تحقیق

جدول ۲. مشخصات الیاف پارافیر

ویژگی	مقدار
رنگ	سفید
بو	بدون بو
وزن مخصوص ( $\frac{gf}{cm^3}$ )	۱/۱۸
نقطه ذوب پودر (درجه سانتی گراد)	۱۰۰-۱۱۰
نقطه ذوب الیاف (درجه سانتی گراد)	۲۳۰
ساختار شیمیایی	الیاف آرامید
جذب آب	ندارد
طول الیاف	۱۲-۱۸
قطر الیاف (میلی متر)	۰/۱۳
مدول الاستیسیته (GPa)	۷۰

## ۲-۲- طرح آزمایش

شامل شناسایی متغیرهای مستقل و وابسته، گسترش یک طرح آزمایش (با حداقل تعداد تست‌های آزمایشگاهی)، ساخت نمونه‌های آزمایشگاهی، انجام تست‌های آزمایشگاهی، ورود داده‌های آزمایشگاهی در نرم‌افزار مربوطه، برازش مدل‌های ریاضی مختلف مانند رگرسیون خطی درجه یک، غیرخطی درجه دو و ... بین متغیرهای وابسته و مستقل، کنترل اثر معنادار تک‌تک متغیرهای مستقل و اندرکنش آن‌ها در پیش‌بینی متغیرهای وابسته با استفاده از تحلیل واریانس، گسترش معادلات ریاضی بین متغیرهای مستقل و وابسته، ترسیم منحنی‌های سه بعدی برای بررسی اثر متغیرها و ارائه ترکیب مناسب صورت گرفت. لازم به ذکر است که در این روش، فرایند بهینه‌سازی مشابه آن چیزی که در روش‌های تحقیق در عملیات مانند روش سیمپلکس که بر مبنای توابع هدف و محدودیت‌های متغیرهای مستقل می‌باشند صورت نگرفته است. این روش، صرفاً یک ترکیب مناسب از سطوح پارامترهای ورودی است که مشخصات فنی مناسبی را بر اساس تابع مطلوبیت ارائه می‌دهند. جدول ۳ طرح آزمایش به کار رفته در این تحقیق را نشان می‌دهد. در این طرح آزمایش، سه متغیر

در این تحقیق با توجه به هزینه بالای تهیه نمونه‌ها و انجام آزمایش‌ها، از روش طرح آزمایش طراحی عاملی دو سطحی در محیط نرم‌افزار دیزاین اکسپرت ۴ استفاده شد. دلیل استفاده از مدل‌های آماری طرح عاملی این است که هنگام استفاده از طرح فاکتوریل، فاکتورهای اضافی را می‌توان بدون متحمل شدن هزینه‌های اضافی بررسی کرد. در این تحقیق با توجه به مطالعات پیشین، پارامترهای مستقل موثر بر مشخصات فنی مخلوط‌های آسفالت گرم بازیافتی شناسایی شده و با توجه به بازه مجاز هر کدام از پارامترها از طرح عاملی دو سطحی به عنوان روشی مناسب به منظور کاهش تعداد آزمایش‌های لازم استفاده شده است. در مراجع علمی برای انجام طراحی عاملی استفاده از دو نرم‌افزار Minitab و Design expert متداول است که در این تحقیق از نرم‌افزار دیزاین اکسپرت به دلیل داشتن ابزار سه بعدی ساز قدرتمند و سایر امکانات پیشرفته استفاده شده است. این نرم‌افزار شامل مجموعه‌ای از روش‌های آماری برای طراحی آزمایش، ارزیابی میزان تأثیر متغیرهای تحقیق، توسعه مدل‌های ریاضی و انتخاب ترکیب مناسب است. بدین منظور در این پژوهش اقدامات مختلف

بر این نمونه‌ها، حد وسط متغیرها نیز برای انجام آزمایش تعریف می‌گردد. حد وسط، نمونه‌ای با ۲۵ درصد تراشه، ۰/۲ درصد الیاف و ۵ درصد قیر است. برای حد وسط تکرار آزمایش نیز در نظر گرفته می‌شود تا میزان تغییرات نتایج آزمایشگاهی شناسایی گردد. شماره‌های ۵ الی ۸ در جدول ۳ تکرار آزمایش در نقطه مرکزی را نشان می‌دهد.

شامل درصد تراشه، درصد الیاف و درصد قیر به‌عنوان ورودی مدل تعریف شدند. مقدار تراشه بین صفر تا ۵۰ درصد، مقدار الیاف بین ۰ تا ۰/۲ درصد و مقدار قیر بین ۴ تا ۶ درصد انتخاب گردید. در روش طراحی عاملی دو سطحی حد بالا و پایین متغیرها برای ساخت نمونه‌ها پیشنهاد می‌شود. شماره‌های ۱ تا ۴ و نیز ۹ تا ۱۲ در جدول ۳ نمونه‌هایی هستند که بر اساس این تعریف در آزمایشگاه ساخته می‌شوند. علاوه

جدول ۳. طرح آزمایش به کار رفته در این تحقیق

شماره آزمایش	تراشه (درصد)	قیر (درصد)	الیاف (درصد)
۱	۰	۴	۰
۲	۰	۴	۰/۲
۳	۰	۶	۰
۴	۰	۶	۰/۲
۵	۲۵	۵	۰/۱
۶	۲۵	۵	۰/۱
۷	۲۵	۵	۰/۱
۸	۲۵	۵	۰/۱
۹	۵۰	۴	۰
۱۰	۵۰	۴	۰/۲
۱۱	۵۰	۶	۰
۱۲	۵۰	۶	۰/۲

### ۳-۲- تهیه نمونه‌ها و تست‌های آزمایشگاهی

دمای اختلاط قیر، مصالح سنگی جدید و تراشه آسفالت ۱۶۰ درجه سانتی‌گراد در نظر گرفته شد. بدین منظور مصالح تراشه آسفالتی به‌طور جداگانه و به مدت دو ساعت حرارت داده شد. اختلاط الیاف، مصالح سنگی و قیر جدید با تراشه آسفالت، در دمای ۱۵۰ درجه سانتی‌گراد صورت گرفت. مصالح در داخل قالب استاندارد مارشال با قطر ۱۰ سانتی‌متر ریخته شده و توسط چکش مارشال کوبیده و تراکم شدند.

از ۷۵ ضربه در هر دو طرف قالب برای تراکم نمونه‌ها استفاده شد. پس از آماده‌سازی نمونه‌ها، تست‌های آزمایشگاهی شامل وزن مخصوص واقعی، استقامت مارشال، روانی مارشال، درصد حجمی فضای خالی آسفالت و درصد حجمی فضای خالی مصالح سنگی آسفالت متراکم شده انجام گردید.

### ۲-۴- روش تحلیل داده‌ها

در این تحقیق، نتایج آزمایشگاهی با روش طراحی عاملی دو سطحی تجزیه و تحلیل شد و مقادیر به دست آمده با معیارهای آیین‌نامه روسازی آسفالتی راه‌های ایران (نشریه شماره ۲۳۴) مورد مقایسه قرار گرفت.

### ۳-نتایج و بحث

برای به دست آوردن آثار اصلی و متقابل متغیرها از روش طراحی عاملی دو سطحی استفاده شد. در این روش، تأثیر درصدهای متغیر تراشه آسفالت، قیر و الیاف پارافین بر مقدار پاسخ (استقامت مارشال، روانی، فضای خالی، وزن مخصوص، فضای خالی پر شده با قیر، فضای خالی مصالح سنگی) مورد بررسی قرار گرفت. از علائم اختصاری A برای درصد تراشه آسفالت، B برای درصد قیر و C برای درصد الیاف مصرفی استفاده شد. نتایج آزمایشگاهی مربوط به طرح آزمایش در جدول ۴ برای تراشه‌های محور اهر - مشگین شهر نشان داده شده است.

جدول ۴. آزمایش‌های طراحی شده و نتایج آزمایشگاهی به روش طراحی عاملی دو سطحی

شماره آزمایش	تراشه (درصد)	قیر (درصد)	الیاف (درصد)	استقامت (کیلو متر مکعب)	روانی (بلی متر)	وزن مخصوص (کیلو بر سانتی متر مکعب)	فضای خالی (درصد)	VFA (درصد)	VMA (درصد)
۱	۲۵	۵	۰/۱	۶۷۸/۹۶	۲	۲/۳۰	۷/۳۸	۵۳/۴۵	۱۵/۸۵
۲	۰	۴	۰/۲	۷۹۲/۱۲	۱/۸	۲/۳۰	۷/۷۲	۵۲/۲۱	۱۶/۱۶
۳	۲۵	۵	۰/۱	۸۲۹/۸۴	۲/۳	۲/۳۲	۳/۹۵	۷۶/۸۸	۱۷/۰۸
۴	۰	۴	۰	۶۷۸/۹۶	۱/۲	۲/۳۰	۴/۸۷	۷۲/۷۵	۱۷/۸۸
۵	۲۵	۵	۰/۱	۹۸۰/۷۲	۲/۴	۲/۲۹	۶/۲۹	۶۲/۷۵	۱۶/۸۸
۶	۵۰	۴	۰	۱۰۱۸/۴۴	۲/۵۵	۲/۳۱	۵/۵۹	۶۵/۶۴	۱۶/۲۶
۷	۵۰	۶	۰	۸۶۷/۵۶	۲/۶	۲/۳۱	۵/۶۹	۶۵/۲۱	۱۶/۳۵
۸	۵۰	۶	۰/۲	۱۰۱۸/۴۴	۲/۵	۲/۲۹	۶/۱۶	۶۳/۲۴	۱۶/۷۷
۹	۵۰	۴	۰/۲	۱۰۳۷/۳	۳/۱	۲/۳۰	۷/۵۴	۵۲/۳۳	۱۵/۸۲
۱۰	۲۵	۵	۰/۱	۱۰۹۳/۸۸	۲/۸	۲/۳۰	۷/۲۵	۵۳/۳۸	۱۵/۵۵
۱۱	۰	۶	۰	۱۱۵۰/۴۶	۳/۸	۲/۳۲	۳/۸۳	۷۷/۱۵	۱۶/۷۸
۱۲	۰	۶	۰/۲	۹۶۱/۸۶	۳/۳	۲/۳۱	۴/۲۶	۷۵/۱۶	۱۷/۱۵

### ۳-۱- استقامت مارشال

جدول ۵، نتایج تحلیل واریانس را برای استقامت مارشال نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود متغیرهای  $C$ ،  $B$ ،  $AC$ ،  $AB$  و  $BC$  متغیرهای تأثیرگذار در پیش‌بینی مقدار استقامت مارشال نیستند درحالی‌که  $A$  متغیر تأثیرگذاری در این بخش هست. معیار تأثیرگذاری متغیر مقدار  $P$ -value کمتر از  $0/05$  می‌باشد.

شکل (۵-الف) اثر درصد تراشه آسفالت و درصد قیر بر روی استقامت مارشال را نشان می‌دهد. همان‌طور که ملاحظه می‌شود با افزایش مقدار تراشه آسفالت از صفر به  $50$  درصد مقدار استقامت نمونه مارشال افزایش می‌یابد در صورتی‌که با افزایش درصد قیر از  $4$  به  $6$  درصد، افزایش اندکی در استقامت مارشال انجام گرفته است. شکل (۵-ب) اثر درصد قیر و درصد الیاف بر روی استقامت مارشال را نشان می‌دهد. همان‌طور که ملاحظه می‌شود با افزایش مقدار الیاف از صفر به  $0/2$  درصد با قیر  $4$  درصد مقدار استقامت مارشال افزایش داشته است. دلیل این امر نقش مسلح کننده الیاف با ایجاد یک شبکه سه بعدی در افزایش استقامت مارشال است. الیاف به هنگام ترک خوردگی مخلوط‌های آسفالتی، نقشی

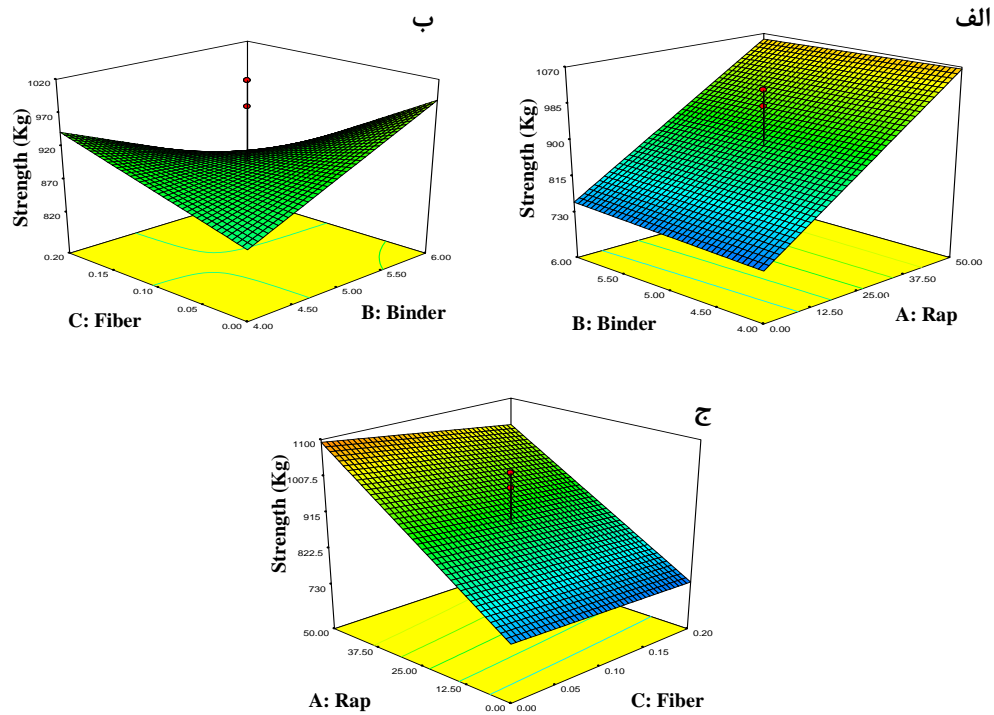
مشابه یک پل را ایفا می‌کنند و از گسترش ترک‌ها جلوگیری می‌کنند. لیکن افزایش بیشتر الیاف، اثر معکوسی را می‌تواند ایجاد کند. جالب این است که در مخلوط آسفالتی در قیر  $6$  درصد، با افزایش درصد الیاف از صفر به  $0/2$  درصد استقامت نمونه مارشال کاهش می‌یابد. شاید دلیل این پدیده، اندرکنش بین الیاف و قیر است. به طوری که با افزایش مقدار قیر، اتصال الیاف بین سنگدانه‌ها برای فراهم نمودن شرایط لازم برای ایجاد مقاومت کششی در الیاف ایجاد نشده است و استقامت مارشال افزایش پیدا نکرده است. شکل (۵-ج) اثر درصد تراشه آسفالتی و درصد الیاف بر استقامت مارشال را نشان می‌دهد. همان‌طور که ملاحظه می‌شود با افزایش درصد الیاف از صفر به  $0/2$  درصد با تراشه صفر درصد، مقدار استقامت نمونه مارشال کاهش ناچیزی داشته ولی با افزایش درصد الیاف از صفر به  $0/2$  درصد با تراشه  $50$  درصد استقامت نمونه مارشال افزایش نشان نمی‌دهد. معادله (۱) اثر مقدار تراشه آسفالتی، درصد قیر و درصد الیاف بر استقامت مارشال را به صورت یک رابطه ریاضی نشان می‌دهد.

$$\text{Strength} = +377.20000 + 8.67560 A + 75.44000 B + 3206.20000 C - 0.37720 AB - 9.43000 AC - 660.10000 BC \quad (1)$$

جدول ۵. تحلیل واریانس برای استقامت مارشال

منبع	مجموع مربعات	درجه آزادی	میانگین مربعات	F-value	P-value
A	$1/996 \times 10^6$	۱	$1/996 \times 10^6$	۳۹/۱۵	۰/۰۰۸۲
B	۴۴/۴۶	۱	۴۴/۴۶	۰/۰۰۸۷۲۱	۰/۹۳۱۵
C	$3601/46$	۱	$3601/46$	۰/۷۱	۰/۴۶۲۳
AB	۴۰۰/۱۴	۱	۴۰۰/۱۴	۰/۰۷۸	۰/۷۹۷۶
AC	۱۱۱۱/۵۶	۱	۱۱۱۱/۵۶	۰/۲۲	۰/۶۷۲۴
BC	$32413/13$	۱	$32413/13$	۶/۳۶	۰/۰۸۶۱
ABC	۴۴/۴۶	۱	۴۴/۴۶	۰/۰۰۸۷۲۱	۰/۹۳۱۵

A: مقدار تراشه آسفالت، B: مقدار قیر و C: مقدار الیاف



شکل ۵. الف- اثر قیر و تراشه آسفالت، ب- اثر الیاف و قیر و ج- اثر تراشه آسفالت و الیاف بر روی استقامت نمونه مارشال

### ۳-۲- فضای خالی

تراشه آسفالت از صفر به ۵۰ درصد، مقدار فضای خالی کمی کاهش داشته ولی با افزایش درصد قیر از ۴ به ۶ درصد فضای خالی کاهش می‌یابد. این مطلب نشان می‌دهد که افزایش مقدار قیر، فضای خالی بین حفرات را در مخلوط آسفالتی پر کرده است. شکل (۶-ب) اثر درصد قیر و درصد الیاف را بر روی

جدول ۶ نتایج تحلیل واریانس را برای فضای خالی نمونه‌ها نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود تنها متغیر B با مقدار P-value کمتر از ۰/۰۵، متغیر تأثیرگذار در این بخش هست. شکل (۶-الف) اثر مقدار تراشه آسفالت و درصد قیر بر فضای خالی نمونه‌ها را نشان می‌دهد. با افزایش مقدار



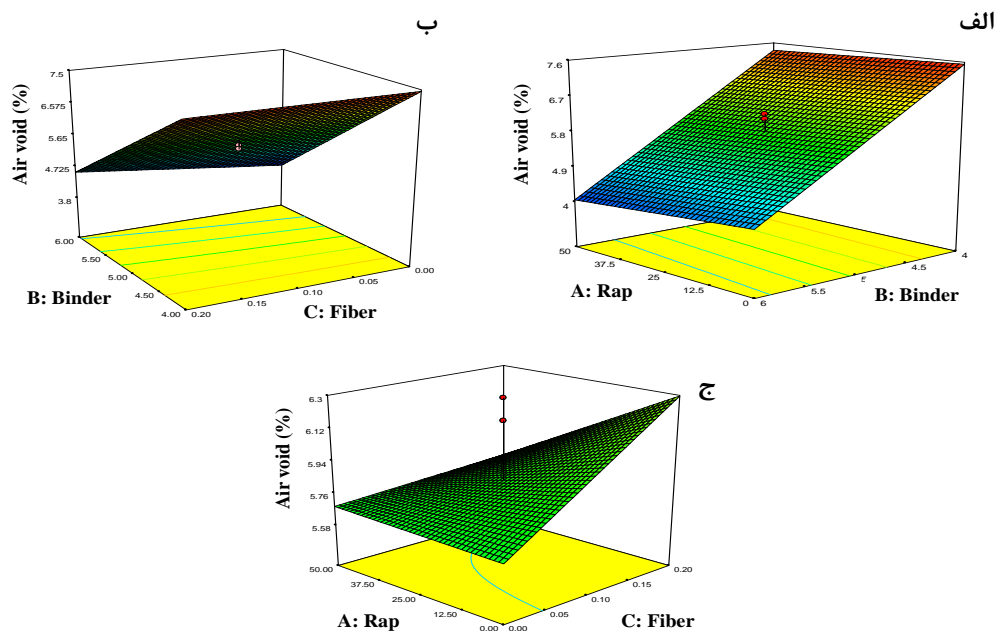
است. در این شکل، بیشترین فضای خالی مربوط به حالتی است که الیاف بیشتری در مخلوط بازیافتی استفاده شده است. در واقع وجود الیاف توانسته است مانع جابجایی شدن بیشتر مصالح سنگی و ماتع تراکم بیشتر مخلوط آسفالتی شود. در نتیجه فضای خالی در مخلوط آسفالتی افزایش داشته است. معادله (۲) اثر مقدار تراشه آسفالتی، درصد قیر و درصد الیاف را بر روی فضای خالی نمونه مارشال با ارایه یک مدل ریاضی بین متغیرها نشان می‌دهد.

$$\text{Air voids} = +14.23676 + 0.014367A - 1.71481B - 4.02510C - 2.77593E - 003AB - 0.091675AC + 1.43950BC \quad (2)$$

جدول ۶. تحلیل واریانس برای فضای خالی

منبع	مجموع مربعات	درجه آزادی	میانگین مربعات	F-value	P-value
A	۰/۱۳	۱	۰/۱۳	۱/۱۲	۰/۳۶۷۷
B	۲۱/۰۷	۱	۲۱/۰۷	۱۷۵/۷۴	۰/۰۰۰۹
C	۰/۲۵	۱	۰/۲۵	۲/۰۶	۰/۲۴۷۰
AB	۰/۰۲۲	۱	۰/۰۲۲	۰/۱۸	۰/۷۰۰۲
AC	۰/۱۶	۱	۰/۱۶	۱/۳۴	۰/۳۳۰۹
BC	۰/۲۱	۱	۰/۲۱	۱/۷۴	۰/۲۷۸۸
ABC	۰/۰۰۲۴۵۱	۱	۰/۰۰۲۴۵۱	۰/۰۲۰	۰/۸۹۵۴

A: مقدار تراشه آسفالت، B: مقدار قیر و C: مقدار الیاف



شکل ۶. اثر قیر و تراشه آسفالتی، ب- اثر قیر و الیاف و ج- اثر الیاف و تراشه آسفالتی بر روی فضای خالی نمونه مارشال

### ۳-۳- وزن مخصوص آسفالت

جدول ۷ تحلیل واریانس صورت گرفته بر روی نتایج وزن مخصوص آسفالت نمونه مارشال را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، متغیرهای A، B و C متغیرهای تأثیرگذار در این پیش‌بینی نیستند. شکل (۷-الف) اثر مقدار تراشه آسفالت و درصد الیاف بر روی وزن مخصوص نمونه مارشال را نشان می‌دهد. همان‌طور که ملاحظه می‌شود با افزایش مقدار تراشه آسفالت از صفر به ۵۰ درصد و بدون استفاده از الیاف مقدار وزن مخصوص نمونه کمی کاهش یافته ولی با افزایش درصد تراشه از صفر به ۵۰ درصد با الیاف ۰/۲ درصد وزن مخصوص نمونه مارشال افزایش می‌یابد. شکل (۷-ب) اثر مقدار تراشه آسفالت و درصد قیر بر روی وزن مخصوص نمونه مارشال را نشان می‌دهد. همان‌طور که ملاحظه می‌شود با افزایش مقدار تراشه آسفالت از صفر به ۵۰ درصد، مقدار وزن مخصوص

نمونه آسفالت افزایش یافته و با افزایش درصد قیر از ۴ به ۶ درصد وزن مخصوص نمونه افزایش می‌یابد. شکل (۷-ج) اثر درصد الیاف و درصد قیر بر روی وزن مخصوص نمونه مارشال را نشان می‌دهد. همان‌طور که ملاحظه می‌شود با افزایش درصد الیاف از صفر به ۰/۲ درصد با مقدار قیر ۴ درصد، مقدار وزن مخصوص نمونه تغییری نمی‌کند درحالی‌که با افزایش درصد الیاف از صفر به ۰/۲ درصد با قیر ۶ درصد وزن مخصوص نمونه مارشال افزایش نمی‌یابد. دلیل عدم افزایش وزن مخصوص می‌تواند به عدم تغییر فضای خالی یا افزایش آن در مخلوط آسفالتی ارتباط داشته باشد. معادله (۳) اثر مقدار تراشه آسفالتی، درصد قیر و درصد الیاف بر روی وزن مخصوص نمونه مارشال را به صورت یک رابطه ریاضی نشان می‌دهد.

$$\text{Unit weight} = +2.27325 - 3.70011E - 004A + 7.78235E - 003B + 0.11725C + 5.54411E - 005AB + 1.39202E - 003AC - 0.038898BC \quad (3)$$

جدول ۷. تحلیل واریانس برای وزن مخصوص آسفالت

منبع	مجموع مربعات	درجه آزادی	میانگین مربعات	F-value	P-value
A	$1/076 \times 10^{-6}$	۱	$1/076 \times 10^{-6}$	۰/۱۵	۰/۷۲۴۳
B	$2/229 \times 10^{-4}$	۱	$2/229 \times 10^{-4}$	۳/۱۱	۰/۱۷۶۰
C	$1/441 \times 10^{-4}$	۱	$1/441 \times 10^{-4}$	۲/۰۱	۰/۲۵۱۲
AB	$1/537 \times 10^{-6}$	۱	$1/537 \times 10^{-6}$	۰/۲۱	۰/۶۷۴۹
AC	$9/689 \times 10^{-6}$	۱	$9/689 \times 10^{-6}$	۱/۳۵	۰/۳۲۹۱
BC	$1/210 \times 10^{-4}$	۱	$1/210 \times 10^{-4}$	۱/۶۹	۰/۲۸۴۶
ABC	$1/824 \times 10^{-6}$	۱	$1/824 \times 10^{-6}$	۰/۰۲۵	۰/۸۸۳۴

A: مقدار تراشه آسفالت، B: مقدار قیر و C: مقدار الیاف

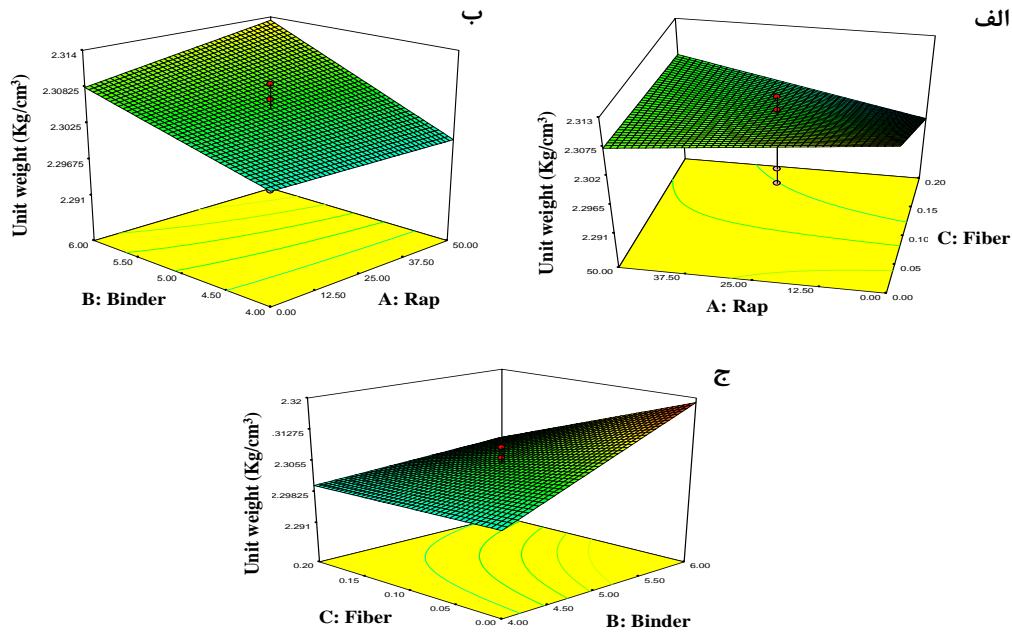
### ۳-۴- نتایج روانی

جدول ۸ تحلیل واریانس برای نتایج روانی نمونه مارشال را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود متغیرهای A، B و C با مقدار P-value کمتر از ۰/۰۵ متغیرهای اثرگذاری در این پیش‌بینی هستند. شکل (۸-الف) اثر مقدار تراشه آسفالت و درصد قیر بر روی روانی نمونه مارشال را نشان می‌دهد. همان‌طور که ملاحظه می‌شود با افزایش مقدار تراشه آسفالت از صفر به ۵۰ درصد روانی نمونه افزایش داشته و با افزایش درصد قیر از ۴ به ۶ درصد، روانی نمونه مارشال افزایش

می‌یابد. افزایش مقدار قیر توانسته است جابجایی بین سنگدانه‌ها برای افزایش روانی را در مخلوط بازیافتی فراهم کند. شکل (۸-ب) اثر مقدار تراشه آسفالت و درصد الیاف بر روی روانی نمونه مارشال را نشان می‌دهد. همان‌طور که ملاحظه می‌شود با افزایش مقدار تراشه آسفالت از صفر به ۵۰ درصد، روانی نمونه افزایش داشته ولی با افزایش درصد الیاف از صفر به ۰/۲ درصد روانی کاهش می‌یابد. شکل (۸-ج) اثر درصد قیر و درصد الیاف بر روی روانی نمونه مارشال را نشان

الیاف توامان با یک مقدار قیر معین، عملکرد مربوط به ترکیب خودشان را ایجاد می‌کنند. این موضوع را شاید این چنین بتوان توجیه کرد که با افزایش الیاف، مقدار قفل و بست مصالح کاهش می‌یابد و در نتیجه روانی افزایش یابد در حالی که در یک مقدار قیر کمتر، این قفل و بست تغییر نمی‌کند و شبکه‌ای از الیاف مانع تغییر شکل‌های بیشتر در نمونه آسفالتی می‌شود و روانی در مقایسه با نمونه‌های کنترل کاهش می‌یابد. معادله (۴) اثر مقدار تراشه آسفالتی، درصد قیر و درصد الیاف را بر روی روانی نمونه مارشال نشان می‌دهد.

می‌دهد. همان‌طور که ملاحظه می‌شود با افزایش قیر از ۴ به ۶ درصد روانی نمونه افزایش داشته در صورتی که با افزایش درصد الیاف از صفر به ۰/۲ درصد روانی کاهش می‌یابد. در مقالات متعدد اثر اندرکنش بین قیر و الیاف مختلف بر روانی مارشال گزارش شده است. در این مقالات مشاهده می‌شود، مخلوط‌های آسفالتی در مقدار قیرهای مختلف با کاهش یا افزایش مقدار الیاف، روندهای مختلفی را برای روانی تعریف می‌کنند (Morva et al. 2016, Morva, 2013, Chen et al. 2009). این بدان معناست که مقدار مشخص یک



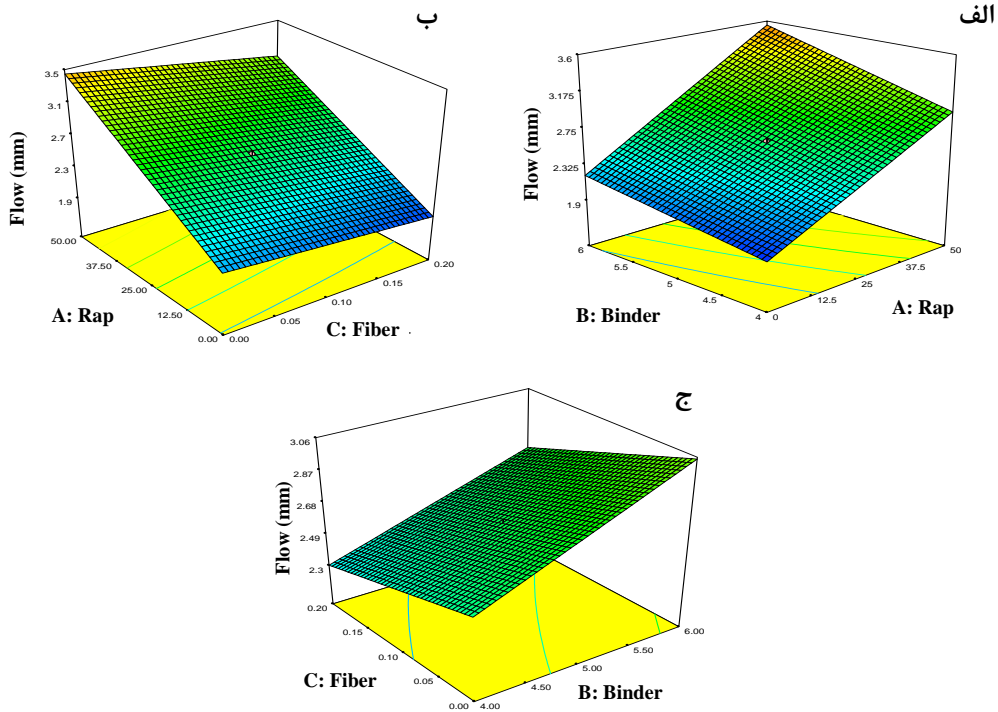
شکل ۷. الف- اثر الیاف و تراشه آسفالتی، ب- اثر مقدار تراشه آسفالت و درصد قیر و ج- اثر درصد الیاف و درصد قیر بر روی وزن مخصوص نمونه مارشال

$$Flow = +1.40000 + 6.00000E - 003 A + 0.15000 B - 1.00000 C + 4.00000E - 003 AB + 0.030000 AC \quad (4)$$

جدول ۸. تحلیل واریانس برای روانی مارشال

P-value	F-value	میانگین مربعات	درجه آزادی	مجموع مربعات	منبع
۰/۰۰۰۳	۳۹۴/۹۷	۲/۸۸	۱	۲/۸۸	A
۰/۰۰۵۰	۵۵/۵۴	۰/۴۰	۱	۰/۴۰	B
۰/۰۱۵۷	۲۴/۶۹	۰/۱۸	۱	۰/۱۸	C
۰/۰۸۸۹	۶/۱۷	۰/۰۴۵	۱	۰/۰۴۵	AB
۰/۱۹۶۳	۲/۷۴	۰/۰۲۰	۱	۰/۰۲۰	AC
۰/۴۶۸۴	۰/۶۹	۵/۰۰۰×۱۰ <sup>-۳</sup>	۱	۵/۰۰۰×۱۰ <sup>-۳</sup>	BC

A: مقدار تراشه آسفالت، B: مقدار قیر و C: مقدار الیاف



شکل ۸. الف- اثر درصد قیر و تراشه آسفالتی ب- اثر الیاف و تراشه آسفالتی و ج- اثر درصد قیر و الیاف بر روی روانی نمونه مارشال

### ۳-۵- فضای خالی پرشده با قیر

جدول ۹ نتایج تحلیل واریانس را برای فضای خالی پرشده با قیر برای نمونه مارشال نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود متغیر B، متغیر اثرگذار در پیش‌بینی مقدار فضای خالی پرشده با قیر نمونه مارشال هست.

شکل (۱۰-الف) اثر درصد قیر و مقدار تراشه آسفالت بر روی فضای خالی پرشده با قیر نمونه مارشال را نشان می‌دهد. همان‌طور که ملاحظه می‌شود با افزایش قیر از ۴ به ۶ درصد فضای خالی پرشده با قیر نمونه افزایش داشته در صورتی که با افزایش مقدار تراشه آسفالت از صفر به ۵۰ درصد، فضای خالی پرشده با قیر تقریباً تغییری نداشته است. شکل (۱۰-ب) اثر درصد قیر و درصد الیاف بر روی فضای خالی پرشده با قیر نمونه مارشال را نشان می‌دهد. همان‌طور که ملاحظه می‌شود

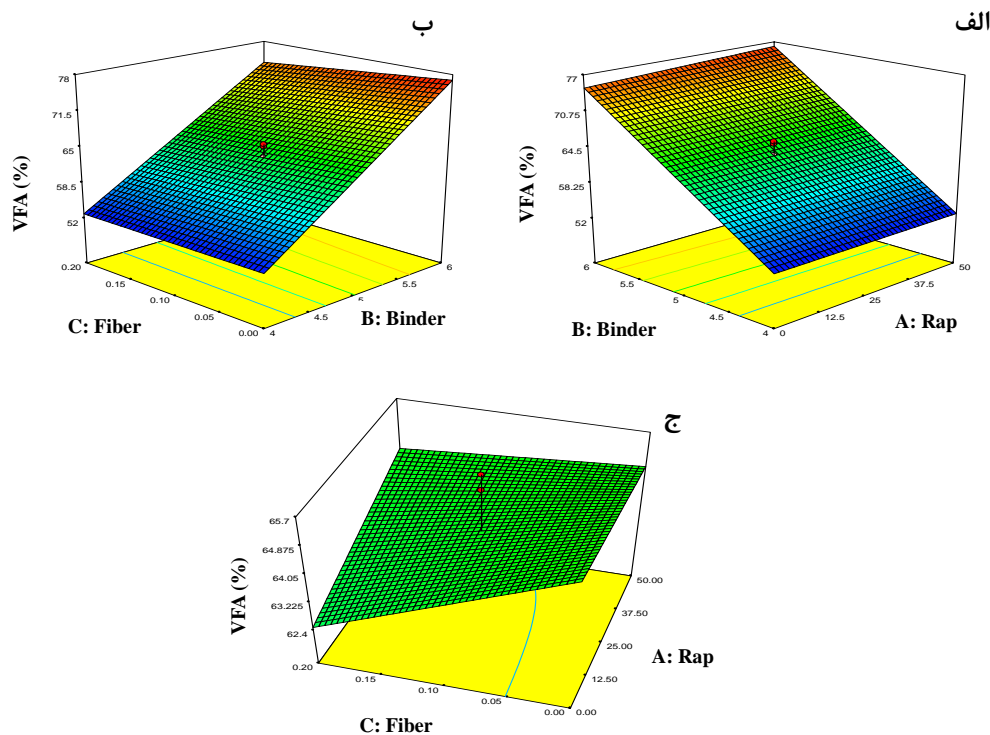
با افزایش قیر از ۴ به ۶ درصد، فضای خالی پرشده با قیر نمونه افزایش داشته و نیز با افزایش درصد الیاف از صفر به ۰/۲ درصد، فضای خالی پرشده با قیر نیز اندکی کاهش می‌یابد. کاهش درصد فضای خالی پرشده با قیر با افزایش فضای خالی مخلوط آسفالتی ارتباط دارد. شکل (۱۰-ج) اثر مقدار تراشه آسفالتی و درصد الیاف بر روی فضای خالی پرشده با قیر نمونه مارشال را نشان می‌دهد. همان‌طور که ملاحظه می‌شود با افزایش مقدار تراشه آسفالتی از صفر به ۵۰ درصد، فضای خالی پرشده با قیر نمونه افزایش داشته در صورتی که با افزایش درصد الیاف از صفر به ۰/۲ درصد، فضای خالی پرشده با قیر نمونه کاهش می‌یابد. معادله (۵) اثر مقدار تراشه آسفالتی، درصد قیر و درصد الیاف را بر روی فضای خالی پرشده با قیر نمونه مارشال به صورت یک رابطه ریاضی نشان می‌دهد.

$$VFA = +6.57896 - 0.078156 A + 11.71763 B + 22.74253 C + 0.013920 AB + 0.26021 AC - 7.23234 BC - 7.72523 E - 003 ABC \quad (5)$$

جدول ۹. تحلیل واریانس برای فضای خالی پر شده با قیر

منبع	مجموع مربعات	درجه آزادی	میانگین مربعات	F-value	P-value
A	۰/۹۳	۱	۰/۹۳	۰/۴۵	۰/۵۴۸۴
B	۱۰۲۵/۷۰	۱	۱۰۲۵/۷۰	۵۰۴/۱۵	۰/۰۰۰۲
C	۴/۹۷	۱	۴/۹۷	۲/۴۴	۰/۲۱۶۱
AB	۰/۸۶	۱	۰/۸۶	۰/۴۲	۰/۵۶۱۰
AC	۲/۴۵	۱	۲/۴۵	۱/۲۱	۰/۳۵۲۳
BC	۴/۴۱	۱	۴/۴۱	۲/۱۷	۰/۲۳۷۳
ABC	$۲/۹۸۴ \times ۱۰^{-۳}$	۱	$۲/۹۸۴ \times ۱۰^{-۳}$	$۱/۴۶۷ \times ۱۰^{-۳}$	۰/۹۷۱۹

A: مقدار تراشه آسفالت، B: مقدار قیر و C: مقدار الیاف



شکل ۱۰. الف- اثر درصد قیر و تراشه آسفالتی، ب- اثر درصد قیر و الیاف و ج- اثر الیاف و تراشه آسفالتی بر روی فضای خالی پر شده با

قیر نمونه مارشال

### ۳-۶- فضای خالی مصالح سنگی

با افزایش قیر از ۴ به ۶ درصد فضای خالی مصالح سنگی نمونه افزایش می‌یابد؛ و همچنین با افزایش مقدار تراشه آسفالتی از صفر به ۵۰ درصد، فضای خالی مصالح سنگی کاهش می‌یابد. شکل (۱۱-ب) اثر درصد قیر و درصد الیاف بر روی فضای خالی مصالح سنگی نمونه مارشال را نشان می‌دهد. همان‌طور که ملاحظه می‌شود با افزایش قیر از ۴ به ۶ درصد،

جدول ۱۰ تحلیل واریانس را برای نتایج فضای خالی مصالح سنگی نمونه مارشال نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود متغیر B، متغیر اثرگذار در پیش‌بینی مقدار فضای خالی مصالح سنگی نمونه مارشال هست. شکل (۱۱-الف) اثر درصد قیر و مقدار تراشه آسفالت بر روی فضای خالی مصالح سنگی نمونه مارشال را نشان می‌دهد. همان‌طور که ملاحظه می‌شود

درصد فضای خالی مصالح سنگی کاهش داشته، در صورتی که با افزایش درصد الیاف از صفر به ۰/۲ درصد فضای خالی مصالح سنگی افزایش می‌یابد. معادله (۶) اثر مقدار تراشه آسفالتی، درصد قیر و درصد الیاف را بر روی فضای خالی مصالح سنگی نمونه مارشال نشان می‌دهد.

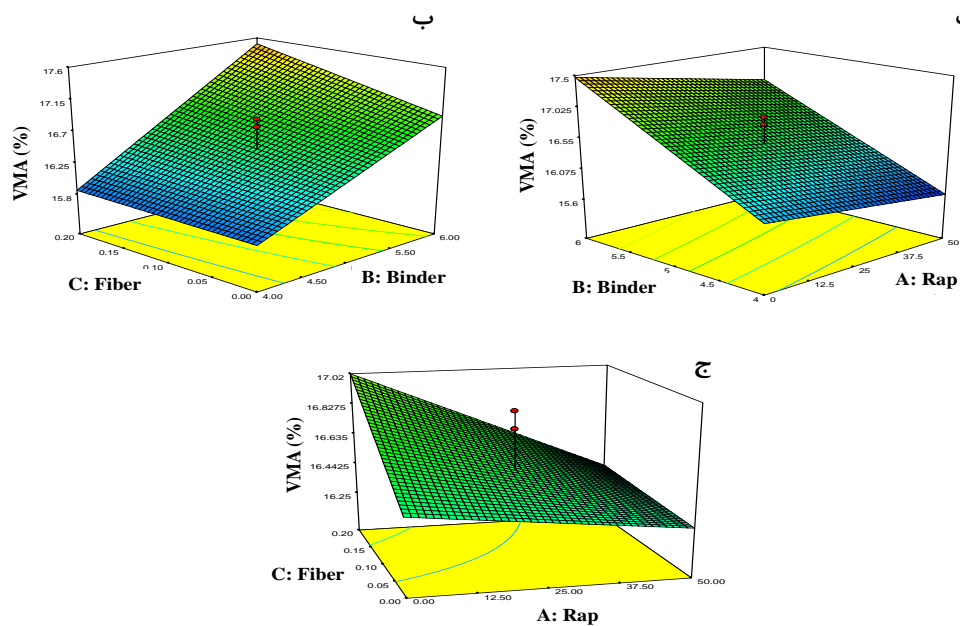
فضای خالی مصالح سنگی نمونه افزایش می‌یابد. همچنین با افزایش درصد الیاف از صفر به ۰/۲ درصد با قیر ۶ درصد فضای خالی مصالح سنگی افزایش می‌یابد. شکل (۱۱-ج) اثر مقدار تراشه آسفالت و درصد الیاف بر روی فضای خالی مصالح سنگی نمونه مارشال را نشان می‌دهد. همان‌طور که ملاحظه می‌شود با افزایش مقدار تراشه آسفالتی از صفر به ۵۰

$$VMA = +13.38673 + 0.010133A + 0.61543B - 3.23956C - 2.69006E - 003AB - 0.088133AC + 1.20349BC + 7.55749E - 003ABC \quad (6)$$

جدول ۱۰. تحلیل واریانس برای فضای خالی مصالح سنگی مارشال

منبع	مجموع مربعات	درجه آزادی	میانگین مربعات	F-value	P-value
A	۰/۳۵	۱	۰/۳۵	۳/۷۰	۰/۱۵۰۲
B	۳/۷۸	۱	۳/۷۸	۴۰/۰۹	۰/۰۰۸۰
C	۰/۱۸	۱	۰/۱۸	۱/۹۶	۰/۲۵۶۲
AB	۰/۰۱۹	۱	۰/۰۱۹	۰/۲۰	۰/۶۸۶۲
AC	۰/۱۳	۱	۰/۱۳	۱/۳۴	۰/۳۳۰۲
BC	۰/۱۶	۱	۰/۱۶	۱/۶۴	۰/۲۸۹۸
ABC	$۲/۸۵۶ \times ۱۰^{-۳}$	۱	$۲/۸۵۶ \times ۱۰^{-۳}$	۰/۰۳۰	۰/۸۷۲۹

A: مقدار تراشه آسفالت، B: مقدار قیر و C: مقدار الیاف

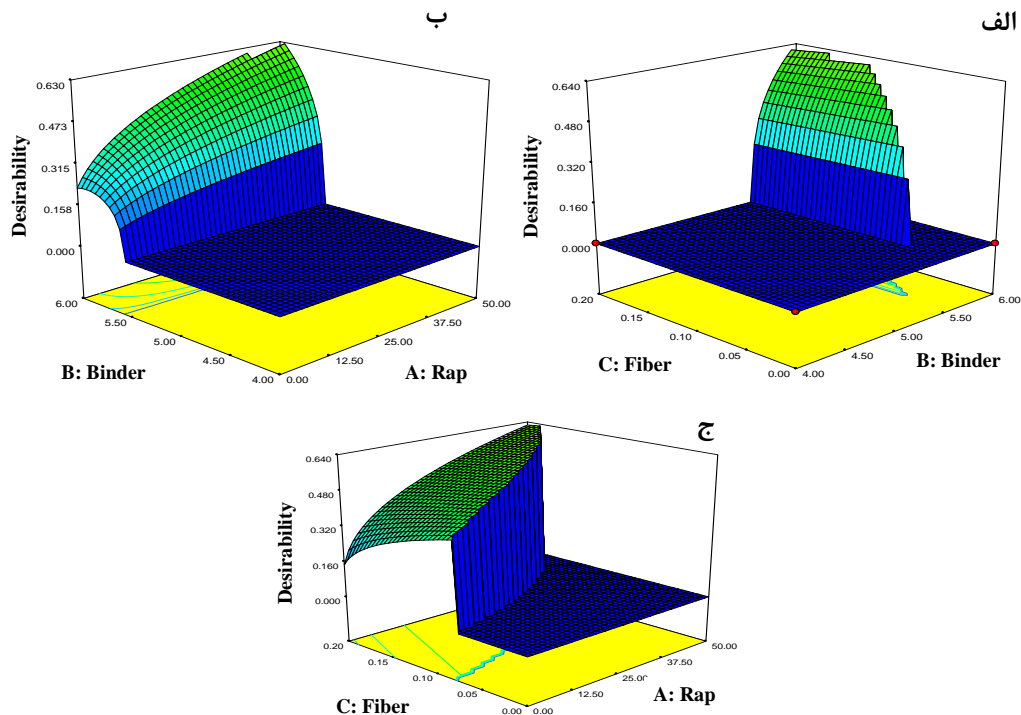


شکل ۱۱. الف- اثر درصد قیر و تراشه، ب- اثر درصد قیر و الیاف و ج- اثر الیاف و مقدار تراشه آسفالتی بر روی فضای خالی مصالح سنگی نمونه مارشال

#### ۴- تعیین ترکیب مناسب برای آرایه طرح تولید مخلوط آسفالتی

سؤال مهم در طراحی مخلوط آسفالت بازیافتی حاوی تراشه آسفالت شاید این باشد که با چه ترکیبی از الیاف، قیر و تراشه آسفالتی می‌توان به یک ترکیب مناسب برای تولید مخلوط آسفالت بازیافتی دست یافت. بدین منظور در معرفی این ترکیب شرایط و محدودیت‌های آیین‌نامه روسازی آسفالتی راه‌های ایران (نشریه ۲۳۴) و نرم‌افزار دیزاین اکسپرت استفاده شد. در این نرم‌افزار، استقامت و وزن مخصوص به صورت حداکثر، روانی بین ۲ الی ۳/۵ میلی‌متر، فضای خالی آسفالت بین ۳ الی ۵ درصد، فضای خالی پر شده با قیر بین ۶۰ الی ۷۵ درصد و فضای خالی مصالح سنگی بین ۱۲ الی ۱۸ درصد تعریف شد. بدین منظور مطلوبیت ترکیب مخلوط‌های آسفالتی که در حد مجاز قرار می‌گیرند با عدد یک تعریف می‌شود و مطلوبیت ترکیب‌هایی که در خارج از محدوده مجاز قرار می‌گیرند صفر تعریف می‌گردد. مطلوبیت نقاطی که دارای حداکثر وزن مخصوص و استقامت مارشال هستند با عدد یک و سایر نقاط بین یک تا صفر ارزش‌گذاری می‌شوند. بر اساس معیارهای

فوق، نتایج تحلیل تابع مطلوبیت ۶ به ازای درصد قیر، درصد تراشه آسفالتی و درصد الیاف مختلف در شکل ۱۲ نمایش داده شده است. لازم به ذکر است که در بعضی از ترکیب‌ها، تعدادی از پارامترهای حجمی و مقاومتی در خارج از محدوده تعریف شده در آیین‌نامه قرار می‌گیرند، در نتیجه مطلوبیت آن ترکیب‌ها صفر می‌شود. به عنوان مثال اگر در یک ترکیب، مقدار روانی از دامنه مجاز کمتر یا بیشتر باشد، مقدار مطلوبیت صفر خواهد بود. مطلوبیت صفر موجب نمایش شکست ناگهانی در شکل ۱۲ شده است. این نقاط شایستگی انتخاب شدن به عنوان یک ترکیب از الیاف، قیر و تراشه برای تهیه مخلوط‌های آسفالتی را ندارند. هدف، انتخاب ترکیبی است که ماکزیم مطلوبیت را تامین نماید. نرم‌افزار دیزاین اکسپرت مطابق جدول ۱۱، ترکیب مناسب را در تهیه مخلوط‌های آسفالت بازیافتی حاوی الیاف پیشنهاد می‌دهد. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، مخلوط مناسب در قیر ۵/۹۷ درصد، تراشه آسفالت ۵۰ درصد و الیاف ۰/۲ درصد با مقدار مطلوبیت ۰/۶۳۳ تعریف می‌شود.



شکل ۱۲. مقدار تابع مطلوبیت به ازای الف- قیر و الیاف، ب- تراشه آسفالت و قیر و ج- تراشه آسفالت و الیاف

جدول ۱۱. ترکیب پیشنهادی برای تهیه مخلوط آسفالت بازیافتی

ردیف	تراشه (درصد)	قیر (درصد)	الیاف (درصد)	استقامت (کیلوگرم)	روانی (سی.تی.تی)	وزن مخصوص (کیلوگرم بر سانتی متر مکعب)	فضای خالی (درصد)	فضای خالی پر شده با قیر (درصد)	فضای خالی مصالح سنگی (درصد)	مطلوبیت
۱	۵۰	۵/۹۷	۰/۱۸	۱۰۱۰/۸۷	۳/۴۲	۲/۳۱	۴/۲۸	۷۵	۱۷/۰۹	۰/۶۳۳
۲	۵۰	۵/۹۷	۰/۱۹	۱۰۰۷/۲۳	۳/۴۱	۲/۳۱	۴/۲۷	۷۵	۱۷/۱۰	۰/۶۳۳
۳	۵۰	۵/۹۶	۰/۱۷	۱۰۲۰/۳۱	۳/۴۴	۲/۳۱	۴/۳۰	۷۵	۱۷/۰۵	۰/۶۳۳

## ۵- نتیجه گیری

۰/۱۹ (با تقریب ۲) درصد الیاف برای تولید آسفالت بازیافتی گرم با مصالح استحصال شده از نوع تراشه آسفالت محور اهر-مشگین شهر استفاده نمود.

در تحقیق حاضر به بررسی اثر الیاف پارافینر در کنار میزان تراشه خرده آسفالتی و قیر بر مشخصات فنی مخلوطهای آسفالت گرم بازیافتی پرداخته شد و نتایج زیر حاصل شد: با طراحی آزمایشها به روش طراحی عاملی دو سطحی ضمن کاهش هزینههای لازم برای تست تعداد زیادی از نمونههای آزمایشگاهی و انجام تحلیل واریانس مشاهده گردید که درصد تراشه آسفالت و درصد قیر به ترتیب دارای بیشترین تأثیر بر روی استقامت مارشال و درصد فضای خالی هستند. هر سه متغیر مورد بررسی بر روی روانی مارشال تأثیر معنی داری دارند و مقدار قیر بر میزان فضای خالی پر شده توسط قیر و فضای خالی مصالح سنگی تأثیر معنی داری دارد.

## ۶- پی نوشتها

1. Voids Filled with Bitumen (VFB)
2. Voids in the Mineral Aggregate (VMA)
3. 2-Level Factorial Design
4. Design Expert
5. Analysis of Variance (ANOVA)
6. Desirability

در مخلوطهای آسفالت بازیافتی، الیاف پارافینر استقامت مارشال را می تواند افزایش دهد. در مخلوط حاوی ۵۰ درصد تراشه و ۶ درصد قیر، افزایش الیاف از صفر به ۰/۲ درصد، مقدار استقامت مارشال را ۱۷/۴ درصد افزایش می دهد. در مخلوطهای با مقدار تراشه و الیاف مختلف، بیشترین فضای خالی مربوط به حالتی است که الیاف بیشتری در مخلوط بازیافتی استفاده شده است. همچنین تغییر مقدار الیاف در مخلوطهایی با تراشه کمتر، موجب تغییر در وزن مخصوص می شود. روانی مارشال به اندرکنش بین مقدار قیر و الیاف بستگی دارد. افزایش مقدار تراشه آسفالت در مخلوطهای آسفالت بازیافتی حاوی افزودنی الیاف موجب کاهش فضای خالی آسفالت، فضای خالی مصالح سنگی نمونه مارشال و همچنین افزایش تراشه آسفالت موجب افزایش استقامت و روانی نمونه مارشال می شود.

## ۷- مراجع

- گلچین، ب. و ربی، م.، (۱۳۹۹)، "ارزیابی مشخصات فنی مخلوطهای آسفالتی حاوی تراشه آسفالت و افزودنی ساسویت"، پژوهشنامه حمل و نقل، دوره ۱۷، شماره ۲، ص. ۱۹۲-۱۸۷.
- نام آور جهرمی، م. و ابوطالبی اصفهانی، م.، (۱۳۹۶)، "بررسی عملکرد الیاف فورتا و پلی پروپیلن در مخلوط آسفالتی با آزمایش مدول برجهدگی"، دومین همایش ملی مهندسی عمران و توسعه پایدار، دانشگاه آزاد اسلامی واحد استهبان، استهبان.
- معتمدی، ح.، ذاکر، ج. و حسینی عقدا، ا.، (۱۳۹۶)، "بررسی آزمایشگاهی عملکرد مخلوطهای آسفالتی اصلاح شده با الیاف فورتا و پارافینر در دماهای مختلف"، نهمین همایش ملی و نمایشگاه قیر، آسفالت و ماشین آلات، مرکز تحقیقات راه و مسکن و شهرسازی، تهران.
- کفاش زاده، س.، (۱۳۹۶)، "بررسی آزمایشگاهی مقاومت مارشال سه ماده مؤثر الیاف فورتا و الیاف شیشه ای و زباله PET بر رفتار خستگی مخلوط آسفالت گرم"، کنفرانس ملی تحقیق و

با توجه به نتایج به دست آمده با رعایت الزامات آیین نامه ای، می توان ۵۰ درصد تراشه آسفالت را در مخلوط آسفالتی با حضور ۵/۹۷ (با تقریب ۶) درصد قیر خالص ۱۰۰-۸۵ و



- Memon, A. M., (2021), "Modeling and design optimization of reclaimed asphalt pavement containing crude palm oil using response surface methodology", *Construction and Building Materials*, Vol.291, pp.123288.
- Zhang, J., Sun, H., Jiang, H., Xu, X., Liang, M., Hou, Y., and Yao, Z., (2019), "Experimental assessment of reclaimed bitumen and RAP asphalt mixtures incorporating a developed rejuvenator", *Construction and Building Materials*. Vol.215, pp.660-669.
- Chen, H., Xu, Q., Chen, S. and Zhang, Z., (2009), "Evaluation and design of fiber-reinforced asphalt mixtures", *Materials and Design*, Vol.30(7), pp.2595-2603.
- Fakhri, M., and Mottahed, A. R., (2021), "Improving moisture and fracture resistance of warm mix asphalt containing RAP and nanoclay additive", *Construction and Building Materials*, Vol.272, pp.121900.
- Golchin, B., and Mansourian, A., (2017), "Evaluation of fatigue properties of asphalt mixtures containing reclaimed asphalt using response surface method", *International Journal of Transportation Engineering*, Vol.4, No.4, pp.335-350.
- Jahromi, S. G. and Khodai, A., (2008), "Carbon Fiber Reinforced Asphalt Concrete". *Arabian Journal of Science and Engineering*, Vol.33, No.2B, pp. 355-364.
- Mirhosseini, A. F., Tahami, S. A., Hoff, I., Dessouky, S., and Ho, C. H., (2019), "Performance evaluation of asphalt mixtures containing high-RAP binder content and bio-oil rejuvenator", *Construction and Building Materials*, Vol.227, pp.116465.
- Morova, N. (2013) "Investigation of usability of basalt fibers in hot mix asphalt concrete", *Construction and Building Materials*, Vol.47, pp.175-180.
- Morova, N., Serin, S., Terzi, S., Saltan, M., Kucukcapraz, D.O., Karahancer, S.S. and Eriskin, E., (2016), "Utility of polyparaphenylene terephthalamide fiber in hot mix asphalt as a fiber", *Construction and Building Materials*, Vol.107, pp.87-94.
- Taherkhani, H., and Noorian, F., (2021), "Investigating permanent deformation of recycled asphalt concrete containing waste oils as rejuvenator using response surface methodology (RSM)", *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering*, Vol.45, No.3, pp.1989-2001.
- توسعه در مهندسی عمران، معماری و شهرسازی نوین، پژوهشگاه فرهنگ و هنر، تهران.
- شفابخش، غ، اسدی، س. و محمدی جانکی، ا.، (۱۴۰۰)، "بررسی پتانسیل شیاردگی و مدول برجهنگی مخلوط آسفالت لاستیکی حاوی الیاف پارافیبر"، فصلنامه مهندسی حمل و نقل، در نوبت چاپ.
- نام‌آور جهرمی، م.، سی سختی، س. و قزل بیگلر، ا.، (۱۳۹۶)، "بررسی عملکرد الیاف پلی‌اتیلن و پارافیبر در مخلوط آسفالتی با آزمایش خزش دینامیکی"، دومین همایش ملی مهندسی عمران و توسعه پایدار، دانشگاه آزاد اسلامی واحد استهبان، استهبان.
- نام‌آور جهرمی، م. و ابوطالبی اصفهانی، م.، (۱۳۹۷)، "بررسی آزمایشگاهی الیاف پارافیبر"، دهمین همایش قیر و آسفالت ایران، مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی، تهران.
- Aravind, K., Shaopeng, W. and Ning, L., (2009), "Investigation of the dynamic and fatigue properties of fibermodified asphalt mixtures", *International Journal of Fatigue*, Vol.31, No.10, pp. 1598-1602.
- Fakhri, M., and Hosseini, S. A., (2017), "Laboratory evaluation of rutting and moisture damage resistance of glass fiber modified warm mix asphalt incorporating high RAP proportion", *Construction and Building Materials*, Vol.134, pp.626-640.
- Hamzah, M. O., Golchin, B., and Woodward, D., (2017), "A quick approach for rheological evaluation of warm asphalt binders using response surface method", *Journal of Civil Engineering and Management*, Vol.23, No. 4, pp.475-486.
- Hamzah, M. O., Gungat, L., and Golchin, B. (2017), "Estimation of optimum binder content of recycled asphalt incorporating a wax warm additive using response surface method", *International Journal of Pavement Engineering*. Vol.18, N0.8, pp.682-692.
- Jaskula, P., Stienss, M., and Szydłowski, C. (2016), "Effect of polymer fibres reinforcement on selected properties of asphalt mixtures". *Procedia Engineering*, Vol.172, pp. 441 – 448.
- Pang, L., Wang, P., Li, B., Pan, P., Wu, S. P., (2014), "Investigation of Rheological Characteristics of Carbon Fiber Modified Asphalt Binder", *Key Engineering Materials*, Vol.599, pp. 182-186.
- Rafiq, W., Napiyah, M., Habib, N. Z., Sutanto, M. H., Alaloul, W. S., Khan, M. I., and

# Evaluating the Effect of Para-fiber on the Technical Properties of in Plant Hot Recycled Asphalt Mixture and Determining a Suitable Combination

*Babak Golchin, Department of Civil Engineering,  
University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran.  
Mohammad Aliyan, Department of Civil Engineering, Ahar Branch,  
Islamic Azad University, Ahar, Iran.  
Ramin Meshkabadi, Department of Advanced Technologies,  
University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran.*

*E-mail: r\_meshkabadi@uma.ac.ir*

Received: March 2023- Accepted: August 2023

## **ABSTRACT**

Today, due to the rapid increase in the bitumen price and environmental problems, the hot mix recycling is taken into consideration in the construction of asphalt pavements. From a technical point of view, fibers are materials that improve a number of behaviors of asphalt mixtures. The aim of this research is to investigate the technical properties of reclaimed asphalt pavement (RAP) in the presence of para-fibers in order to achieve a suitable combination of these parameters. For this purpose, a new approach was utilized to design the experiment, analyze the results and choose the appropriate asphalt mixture. This approach uses a two-level factorial design in the Design Expert software environment based on desirability functions. The results showed that in the mixture containing 50% RAP and 6% bitumen, increasing the fibers from zero to 0.2% increases the Marshall Strength value by 17.4% and decreases the Marshal Flow value by 3.8%. In the same mixture with 4% bitumen, with the increase of fibers from zero to 0.2%, Marshall's strength and flow increase by 1.8 and 21.5, respectively. The most air voids are related to the mixtures, containing 50% RAP, 4% bitumen and 0.2% fibers. The results for selected materials showed that the suitable combination for the production of reclaimed asphalt mixtures according to the design criteria in Iran Highway Asphalt Paving Code is 6% bitumen, 50% RAP and 0.2% para-fiber.

**Keywords:** Reclaimed Asphalt Pavement, 2-Level Factorial Design, Para-Fibre, Bitumen, Experiment Design