



مقاله پژوهشی

بررسی تأثیر خصوصیات انواع مصالح سنگ طبیعی بر عملکرد آسفالت به روش سطح پاسخ

علی اکبر زاده^۱، علیرضا یاراحمدی بافقی^{۲*}، حسینعلی لازمی^۱، علی اکبر دهقانی زاده^۱

۱- گروه آموزشی معدن، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد بافق، بافق، ایران

۲- دانشکده مهندسی معدن و متالورژی، دانشگاه یزد، دانشگاه یزد، یزد، ایران

(دریافت: اردیبهشت ۱۴۰۲، پذیرش: شهریور ۱۴۰۲)

چکیده

در صنعت راهسازی سنگدانه‌های طبیعی جایگاه خاصی از دیدگاه اقتصادی و فنی احراز کرده‌اند؛ به نحوی که حجم وسیعی از مصالح بکار رفته در پروژه‌های راهسازی را سنگدانه‌ها تشکیل می‌دهند. از طرفی یکی از عوامل مؤثر در کیفیت آسفالت، کیفیت و خواص مصالح سنگی آسفالت است. از این جهت بررسی کیفیت سنگدانه‌های مورد استفاده در روسازی راه، بسیار حائز اهمیت است. از این رو این پژوهش باهدف بررسی تأثیر خصوصیات مصالح سنگی طبیعی بر عملکرد روسازی آسفالتی شامل مقاومت فشاری، مقاومت شیار شدگی و مقاومت لغزندگی به روش سطح پاسخ انجام شد. بدین منظور نمونه‌های آسفالتی با ۸ نوع نمونه سنگ طبیعی مختلف ساخته شد و تحت آزمایش مقاومت مارشال و مقاومت لغزندگی قرار گرفت و نتایج آزمایش‌ها با نرم افزار Design Expert مورد بررسی قرار گرفت. نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که با افزایش پارامترهای مقاومتی مصالح سنگی، نسبت مارشال نمونه‌های آسفالتی افزایش می‌یابد که مقاومت کششی بیشترین تأثیر را بر این متغیر دارد. همچنین با افزایش پارامترهای مقاومتی سنگ، مقاومت لغزندگی نیز افزایش می‌یابد و مقاومت تک‌محوری مصالح سنگی بیشترین تأثیر را بر این پارامتر دارد. همچنین با توجه به روابط ارائه شده در این پژوهش می‌توان با داشتن نتایج آزمایش‌های مقاومت تک‌محوره، مقاومت سه محوره، سرعت موج‌برشی و مقاومت کششی غیرمستقیم سنگ مقادیر مقاومت فشاری مارشال، نسبت مارشال و مقاومت لغزندگی آسفالت را محاسبه کرد.

کلمات کلیدی

آسفالت، سنگدانه طبیعی، مقاومت فشاری، شیار شدگی، مقاومت لغزندگی

*عهده‌دار مکاتبات: ayarahmadi@yazd.ac.ir

DOI: 10.22034/ANM.2023.20066.1594

۱- مقدمه

رشد روزافزون ترافیک در سال‌های اخیر و افزایش وزن محور وسایل نقلیه، باعث اعمال نیروهای بیشتری به سیستم روسازی و رویه‌های آسفالتی شده و عمر مفید روسازی را کاهش می‌دهد. هزینه‌های بالای ساخت و نگهداری روسازی‌های آسفالتی باعث می‌شود که محققان راهکارهایی را برای افزایش دوام و پایداری روسازی‌های آسفالتی جستجو کنند [۱،۲]. استفاده از مصالح مرغوب، اصلاح قیر، اصلاح دانه‌بندی، استفاده از پرکننده مناسب و به‌کارگیری افزودنی‌های مختلف در طول سال‌های گذشته موردنظر محققان مختلف بوده است [۳-۷]. از آنجاکه بیش از ۹۰ درصد حجم آسفالت را مصالح سنگی تشکیل می‌دهد، می‌توان گفت که سنگ‌دانه نقش مهمی در عملکرد روسازی مصالح راه دارد؛ تأثیر نوع مصالح سنگی و خصوصیات آن بر خواص آسفالت، بسیار مورد توجه محققان بوده است [۸] و پژوهش‌های متعددی در این زمینه صورت گرفته است. به‌عنوان نمونه، شعبانی و همکاران نیز (۲۰۱۰) در پژوهشی همبستگی بین ارزش سیقلی با دیگر خصوصیات فیزیکی و مکانیکی سنگ‌دانه‌های رویه راه را مورد بررسی قرار دادند. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که ارزش ضربه بارزش سایش لوس‌آنجلس دارای ارتباط خطی و معنی‌دار است. همچنین نتایج بیانگر آن است که در بین سنگ‌های استفاده ماسه‌سنگ‌ها دارای کمترین مقاومت در برابر ضربه و سایش هستند که علت آن در پیوند ضعیف ذرات تشکیل‌دهنده سنگ به یکدیگر به‌واسطه ماتریس سست‌تر نسبت به سایر سنگ‌ها است [۹].

همدانی و همکارانش (۲۰۱۶) نیز در پژوهشی به بررسی اثر جنس سنگ‌دانه‌های موجود در آبرفت‌های مناطق غرب و شرق تهران بر دوام آسفالت و پارامترهایی چون جذب آب، وزن مخصوص مخلوط مصالح سنگی، قیر بهینه و دانسیته نمونه مارشال پرداختند. نتایج حاصل از این تحقیق حاکی از آن است که آسفالت ساخته‌شده با مصالح غرب تهران که عمدتاً از سنگ‌دانه‌های آذرآواری (توف) و آذرین است، دوام کمتری نسبت به آسفالت ساخته‌شده با مصالح عمدتاً آهکی شرق تهران دارند و خصوصیات مصالح سنگی تأثیر بسزایی در خواص آسفالت دارد [۱۰]. مقدس نژاد و همکاران (۱۳۹۴) بایبان اینکه سالیانه در صنعت راه و ساختمان مقدار زیادی سنگ‌دانه مصرف می‌شود، به بررسی تأثیر استفاده از

سنگ‌دانه‌های ضایعاتی بر مدول برجهندگی و خصوصیات حجمی مخلوط آسفالت گرم پرداختند و یافتند که نمونه‌های آسفالتی ساخته‌شده با سنگ‌دانه‌های ضایعاتی به‌عنوان ریزدانه و سنگ‌دانه‌های طبیعی به‌عنوان درشت‌دانه دارای مدول برجهندگی بیشتر و خصوصیات حجمی، به‌جز درصد فضای خالی، کمتری هستند. در واقع نتایج بیانگر آن است که جنس سنگ‌دانه تأثیر بسزایی در عملکرد آسفالت دارد [۱۱]. همچنین آدرسی (۲۰۲۱) در پژوهشی به بررسی اثر تأثیر جنس و دانه‌بندی مصالح سنگی ریزدانه و بافت سطحی مختلف بر پایایی مقاومت سایشی رویه بتن غلتکی پرداختند. نتایج این پژوهش بیانگر آن است که جنس مصالح سنگ‌دانه‌ای و طرح اختلاط بتن تأثیر بسزایی بر مقاومت لغزشی بتن دارد؛ به‌طوری‌که ترکیب مصالح آهکی و سیلیسی طبیعی باعث بهبود مقاومت لغزشی روسازی بتنی غلتکی می‌شود [۱۲].

علاوه بر این‌ها رضایی و قدیم (۱۳۹۵) نیز در پژوهشی تحت عنوان مقایسه دو دیدگاه مهندسی عمران و زمین‌شناسان در خصوص سنگ‌دانه‌های مخلوط آسفالتی در ایران بیان می‌دارند که سنگ‌دانه‌ها حدود ۹۰ درصد نسبت حجمی مخلوط‌های آسفالتی را تشکیل می‌دهند و ساختار کلی راه‌سازی به خواص و ویژگی‌های مصالح وابسته است که می‌توان با انتخاب سنگ‌دانه‌های مناسب از طریق مطالعات سنگ‌شناسی، کانی‌شناسی، بلورشناسی و بافت سنگ که به شناخت ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی و مکانیکی سنگ‌ها کمک می‌کند، سبب ارتقای کیفی مخلوط‌های آسفالتی کشور شد. از این‌رو توجه به دیدگاه‌های متفاوت مهندسی عمران و زمین‌شناسان در خصوص انتخاب سنگ‌دانه‌های مناسب در مخلوط‌های آسفالتی در نظر گرفتن پارامترهای هر دو گروه از کارشناسان نتایج بهتری در انتخاب سنگ‌دانه‌ها در پی خواهد داشت [۱۳]. سالک بافقی و خبیری در سال ۱۳۹۶ به بررسی اثرات دانه‌بندی و شکل سنگ‌دانه‌ها بر مقاومت لغزندگی مخلوط‌های آسفالتی با استخوان‌بندی سنگ‌دانه‌ای پرداختند. ایشان نمونه‌های ساخته‌شده شامل چهار نوع مصالح سنگی از جمله مصالح آهکی، سیلیسی، سرباره فولاد و سنگ‌دانه بازیافتی را مورد بررسی قرار دادند و یافتند که مصالح سرباره از لحاظ مقاومت لغزندگی عملکرد بهتری نسبت به مصالح سنگی دیگر دارد و همچنین مقاومت لغزندگی نمونه‌های آسفالتی رابطه مستقیمی با افزایش مقدار حداکثر اندازه اسمی

مغزه گیری برای آزمایش‌های سایش دوری و دیسکی بکار گرفته شدند. نتایج این پژوهش بیانگر آن است که مشخصات روسازی به شدت تحت تأثیر مشخصات مصالح سنگی تشکیل‌دهنده آن است؛ در واقع نوع و جنس کانی‌ها و عناصر تشکیل‌دهنده مصالح سنگی تأثیر مستقیمی بر مقاومت سایشی بتن غلتکی دارد [۱۹]. همچنین صالحی و بنادکی (۱۴۰۱) نیز در پژوهشی به بررسی تأثیر ضریب گوشه‌داری مصالح سنگی ریزدانه بر حساسیت رطوبتی و مقاومت شکست مخلوط آسفالت گرم پرداختند. در این پژوهش، تأثیر ضریب گوشه‌داری با استفاده از آزمایش‌های نسبت استحکام مارشال و مقاومت کششی غیرمستقیم بر روی حساسیت رطوبتی، شکست نمونه‌ها و قابلیت ترک‌خوردگی مخلوط‌های آسفالتی گرم مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج این تحقیق نشان داد که هرچه ضریب گوشه‌داری مصالح کمتر باشد، باعث افزایش مقدار قیر بهینه مخلوط آسفالتی و کاهش مقدار قیر مؤثر می‌شود؛ که ضعیف شدن اتصال بین قیر و سنگ‌دانه و در نتیجه کاهش دوام رطوبتی و مقاومت در تمام مودهای شکست مخلوط آسفالت را به دنبال دارد [۲۰]. در پژوهشی دیگر رن^۳ و یان^۴ به بررسی خصوصیات مکانیکی سازه سنگ‌دانه برای مصالح روسازی پرداختند. در این پژوهش از آزمایش‌های آزمایشگاهی و شبیه‌سازی‌های عددی با استفاده از روش المان گسسته به منظور بررسی خواص مکانیکی ماکروسکوپی ساختار سنگ‌دانه و نیروهای تماس میکروسکوپی سنگ‌دانه‌ها مورد استفاده قرار گرفت. نتایج این تحقیق بیانگر آن است که جنس مصالح و دانه‌بندی آن تأثیر قابل توجهی بر عملکرد روسازی دارد [۸]. آود^۵ و همکارانش در سال ۲۰۲۲ در پژوهشی بابیان اینکه فیلر معدنی جزء لاینفک مخلوط آسفالتی است که بر عملکرد آن تأثیر می‌گذارد، به بررسی اثر جنس فیلر به‌عنوان بخشی از مصالح سنگی تشکیل‌دهنده آسفالت پرداختند. آنها در این پژوهش چهار ماده زائد صنعتی شامل مرمر، گرانیت، سرباره فولاد و پودر آهک هیدراته را مورد بررسی قرار دادند و یافتند که جنس مصالح سنگی از جمله جنس فیلر تأثیر بسزایی بر عملکرد آسفالت تحت بارگذاری استاتیکی و چرخه‌ای دارد [۲۱]. همان‌طور که اشاره شد پژوهش‌های متعددی در زمینه تأثیر خواص مصالح سنگی بر خواص روسازی انجام شده است؛ اما هیچ‌کدام آنها به بررسی جامع در خصوص تأثیر خواص مصالح سنگی بر مقاومت مارشال، مقاومت شیار

سنگ‌دانه‌ها دارند و دیگر اینکه سنگ‌دانه‌های مکعبی از مقاومت لغزندگی بیشتری به‌اندازه ۵ تا ۱۰ درصد نسبت به سنگ‌دانه‌های سوزنی و پولکی برخوردار می‌باشند [۱۴]. احمد^۱ و همکاران نیز در پژوهشی در سال ۲۰۱۴ به بررسی تأثیر شکل مصالح سنگی بر خصوصیات آسفالت پرداختند و نمونه‌های آسفالتی تهیه‌شده با سنگ‌دانه‌هایی دارای سه شکل مکعبی، سوزنی را مورد ارزیابی قرار دادند. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که نمونه‌های تهیه‌شده با سنگ‌دانه مکعبی عملکرد بهتری از نظر مقاومت مارشال، وزن مخصوص، نسبت مارشال، مدول سختی و مقاومت کششی غیرمستقیم نسبت به سایر نمونه‌ها دارد؛ از این رو شکل مصالح سنگی نیز تأثیر بسزایی در عملکرد آسفالت دارد [۱۵]. در سال ۲۰۱۷ لیو^۲ و همکارانش در پژوهشی تحت عنوان تأثیر حداکثر اندازه اسمی سنگ‌دانه بر عملکرد آسفالت یافتند که دانه‌بندی و اندازه ذرات مصالح سنگی در عملکرد آسفالت مؤثر است. همچنین نتایج این پژوهش نشان داد که حداکثر اندازه اسمی سنگ‌دانه تأثیر به‌سزایی بر نفوذپذیری، مقاومت شیار شدگی، مقاومت ترک‌خوردگی و نتایج آزمایش کانتابرو دارد [۱۶].

همچنین داریانی و شیخ‌بگم قلعه (۱۳۹۷) نیز بابیان اینکه خرابی خستگی یکی از شایع‌ترین خرابی‌هایی است که در روسازی‌های انعطاف‌پذیر به‌صورت ترک‌های خستگی که عموماً به ترک‌های پوست‌سوسماری موسوم هستند، ظاهر می‌شود؛ به بررسی نقش مشخصات مصالح در افزایش عمر خستگی روسازی آسفالتی پرداختند و یافتند که مشخصات سیستم روسازی سه لایه‌ای (شامل لایه آسفالتی، اساس و خاک بستر) و نوع مصالح آن‌ها تأثیر مستقیمی بر عملکرد خستگی روسازی دارد [۱۷]. خاوندی و همکاران در سال ۱۳۹۸ با تأکید بر اینکه یکی از مشکلات عمده در روسازی به‌ویژه در مناطق مرطوب، پدیده عریان شدگی مخلوط‌های آسفالتی است، به بررسی افزودنی‌های ضد عریان شدگی و نوع مصالح سنگ‌دانه‌ای بر مقاومت مخلوط‌های آسفالتی در برابر آسیب‌های رطوبتی پرداختند و یافتند جنس مصالح سنگی تشکیل‌دهنده روسازی آسفالتی نقش تأثیرگذاری در پدیده عریان شدگی و راهکار مقابله با آن دارد [۱۸]. فتاحی و همکارانش (۱۴۰۰) به بررسی و مقایسه‌ی استفاده از سنگ‌دانه‌های سخت، دانه‌بندی و طرح اختلاط متفاوت در بتن پرداختند. لازم به ذکر است که در این پژوهش حدود سی نمونه استوانه‌ای ساخت شد که حدود نصف این مقدار با

۲-۱- مشخصات مصالح مصرفی

در این پژوهش ۸ نوع مصالح سنگی طبیعی مطابق جدول ۱ مورد بررسی قرار گرفت. مشخصات این مصالح سنگی طبیعی با انجام آزمایش تهیه در جدول ۲ ارائه شده است که شامل مقاومت تراکمی تک‌محوره، مقاومت سه محوره، آزمایش سرعت موج و مقاومت کششی برزیلی است.

جدول ۱: معرفی انواع سنگ‌دانه مورد استفاده

شماره نمونه	نوع سنگ	نوع سنگ
۱	آذرین داسیت	
۲	دگرگونی (کانی کلسیت)	
۳	آذرین دیوریت	
۴	طبیعی	رسوبی (سنگ‌آهک)
۵		رسوبی (ماسه‌سنگ)
۶		رسوبی (ماسه‌سنگ کوارتزی)
۷		دگرگونی (مرمر)
۸		دگرگونی (کانی کلسیت)

شدگی و مقاومت لغزندگی با روش سطح پاسخ نپرداخته‌اند. از این رو این پژوهش به منظور بررسی تأثیر خواص مصالح سنگی بر عملکرد مقاومتی، شیار شدگی و لغزندگی روسازی آسفالتی به روش سطح پاسخ انجام شده است.

۲-۲ روش تحقیق

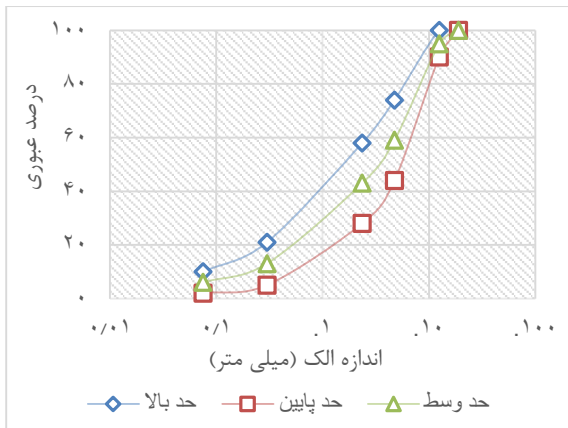
هدف این پژوهش بررسی تأثیر خواص انواع سنگ‌دانه‌های طبیعی بر عملکرد روسازی آسفالتی شامل مقاومت فشاری، مقاومت شیار شدگی و مقاومت لغزندگی به روش سطح پاسخ است. از این رو ۸ نوع مصالح سنگی طبیعی تهیه شد. سپس به منظور بررسی اثر خصوصیات انواع مصالح سنگی طبیعی بر عملکرد آسفالت با استفاده از سنگ‌دانه‌های مختلف، نمونه‌های آسفالتی تهیه شده و تحت آزمایش پاندول انگلیسی و مقاومت مارشال قرار گرفت. پس از تعیین مشخصات مخلوط آسفالتی، به منظور بررسی اثر خواص مصالح سنگی بر عملکرد آسفالت به روش سطح پاسخ، از نرم‌افزار Design Expert استفاده شد.

جدول ۲: مشخصات انواع سنگ‌دانه مورد استفاده

شماره نمونه	مقاومت تک‌محوری (مگا پاسکال)	مدول الاستیسته (گیگا پاسکال)	چسبندگی (مگا پاسکال)	زاویه اصطکاک داخلی (درجه)	سرعت موج (متر بر ثانیه)	مقاومت کششی غیرمستقیم (مگا پاسکال)
۱	۲۲،۴۹	۳،۱۶	۴،۰۵۹	۴۹،۳۲۷	۴۳۰۳	۴،۲۶
۲	۱۲،۸۹	۱،۱۴	۲،۸۴۵	۴۳،۰۴	۵۸۷۷	۳،۳۸
۳	۱۶،۷۷	۳،۳۳	۳،۶۳۵	۵۳،۱۹۶	۴۶۲۰	۵،۱۶
۴	۱۴،۸۹	۱،۴۳	۱،۵۴	۶۱،۳۱۸	۵۵۳۰	۵،۴۳
۵	۴۹،۱	۴،۶۹	۶،۷۸۵	۵۹،۱۱۶	۴۴۴۷	۶،۶۷
۶	۵۳،۹	۹،۵۵	۵،۹۴	۶۵،۳۰۲	۴۷۸۹	۶،۷۶
۷	۱۰،۵۸	۳،۱۵	۰،۸	۶۴،۲۷۹	۵۳۷۵	۵،۰۶
۸	۱۳،۱۲	۳،۳۳	۱،۷۳	۵۸،۸۶۶	۵۰۸۵	۳،۱۷

رویه شامل مصالح عبور کرده از الک نمره ۱۹ و مصالح عبوری از الک‌های ۱۲/۵، ۴/۷۵، ۲/۳۶، ۰/۳ و ۰/۰۷۵ انتخاب شده است. برای تهیه نمونه مخلوط‌های بتن آسفالتی در این تحقیق از حد وسط دانه‌بندی پیوسته‌ی شماره‌ی ۴ جدول ۱-۹ نشریه ۲۳۴ که مناسب اجرا در لایه‌های آستر و رویه روسازی است، استفاده شد. حدود دانه‌بندی شماره ۴ مخلوط آسفالتی پیوسته در این تحقیق در جدول ۳ و شکل ۱ نیز آمده است. همچنین مشخصات بر اساس آزمایش‌های انجام‌شده قیر مصرفی در این پژوهش در جدول ۴ ارائه شده است.

در این تحقیق پس از انجام آزمایش و بررسی بر روی نمونه‌های سنگ، با به کارگیری روش مارشال، نمونه‌های بتن آسفالتی تهیه شد. به طوری که برای تعیین درصد قیر بهینه نمونه‌های آسفالتی مختلف با چهار درصد متفاوت قیر شامل ۴/۵، ۵، ۵/۵ و ۶ درصد به تعداد سه عدد، برای افزایش دقت، ساخته شد. بعد از تعیین درصد قیر بهینه با توجه به انواع سنگ‌دانه‌های مختلف، نمونه‌های آسفالتی با درصد قیر بهینه برای انجام آزمایش‌های مقاومت مارشال و مقاومت لغزندگی آسفالت آماده شد. دانه‌بندی مصالح سنگی مورد استفاده در این تحقیق با استفاده از سری الک‌های دانه‌بندی قشرهای



شکل ۱: منحنی دانه‌بندی مصالح سنگی

جدول ۳: دانه‌بندی مورد استفاده در این تحقیق

حد وسط	محدوده درصد عبوری مجاز	اندازه الک (مش)	اندازه الک (میلی متر)
۱۰۰	۱۰۰	۳/۴"	۱۹
۹۵	۹۰-۱۰۰	۱/۲"	۱۲/۵
۵۹	۴۴-۷۴	۴	۴/۷۵
۴۳	۲۸-۵۸	۸	۲/۳۶
۱۳	۵-۲۱	۵۰	۰/۳
۶	۲-۱۰	۲۰۰	۰/۰۷۵

جدول ۴: مشخصات قیر مورد استفاده

ردیف	آزمایش	روش استاندارد ASTM	نتیجه	حدود استاندارد	
				حداکثر	حداقل
۱	وزن مخصوص در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد	D70	۱/۰۲۱	۰	۰
۲	درجه نفوذ (۰/۱ میلی‌متر) در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد	D5	۶۰	۷۰	۶۰
۳	نقطه اشتعال قیر	D92	۲۹۵	-	۲۳۲
۴	کشش‌پذیری (سانتی‌متر)	D113	۱۰۰+	-	۱۰۰
۵	نقطه نرمی	D36	۵۲	۵۶	۴۹
۶	حلالیت قیر (درصد)	D2042	۹۹/۷۶	-	۹۹
۷	در دمای ۱۲۰ درجه سانتی‌گراد	D2170	۷۴۵	-	-
	در دمای ۱۳۵ درجه سانتی‌گراد		۳۸۶	-	-
	در دمای ۱۶۰ درجه سانتی‌گراد		۱۵۲	-	-

۲-۲- آزمایش‌های انجام شده

پس از ساخت نمونه‌های آسفالتی با انواع مصالح سنگ‌دانه طبیعی، آزمایش‌های مقاومت مارشال و مقاومت لغزندگی بر روی آنها انجام شد.

در این پژوهش، آزمایش مقاومت فشاری مارشال مطابق استاندارد ASTM D6927 انجام شد. این آزمایش بر روی نمونه‌های استوانه‌ای به قطر ۴ اینچ (۱۰ سانتی‌متر) و ارتفاع ۲/۵ اینچ (۶/۲۵ سانتی‌متر) انجام می‌شود (شکل ۲-الف) و به کمک آن مقاومت فشاری و درصد تغییر شکل نسبی نمونه بتن آسفالتی تعیین می‌شود. مقاومت فشاری یا تاب فشاری مارشال عبارت است از حداکثر باری که نمونه تحت آزمایش مارشال بدون اینکه شکستگی در آن ایجاد شود، تحمل می‌نماید. همچنین تغییر شکل نسبی آسفالت یا همان روانی

به میزان وارفتگی یا به عبارت دیگر تغییر شکل آسفالت تحت بار وارده اطلاق می‌شود. با استفاده از نسبت مقاومت مارشال به روانی نمونه آسفالتی، پارامتر جدیدی تحت عنوان نسبت مارشال تعریف می‌شود که معیاری جهت توصیف شیار شدگی است؛ به طوری که هرچه این نسبت بیشتر باشد مخلوط سخت‌تر بوده و دارای مقاومت بیشتری در برابر تغییر شکل‌های دائم خواهد بود [۲۲]. همچنین آزمایش مقاومت لغزندگی مطابق استاندارد ASTM E303 بر روی نمونه‌های آسفالتی ساخته شده با سنگ‌دانه‌های مختلف انجام شد. این آزمایش جهت اندازه‌گیری مقاومت انواع سطوح و کف‌پوش‌ها در برابر لغزندگی و سرخوردگی به صورت آزمایشگاهی و صحرایی کاربرد دارد [۲۳].

مدل‌های تجربی است. هدف این روش، بهینه‌سازی پاسخ (متغیر خروجی) است که متأثر از چندین متغیر مستقل (متغیرهای ورودی) است و در هر آزمایش تغییرات در متغیرهای ورودی به‌منظور تعیین علل تغییرات در متغیر پاسخ ایجاد می‌شوند [۲۴، ۲۵].

یکی از نرم‌افزارهایی که بر اساس روش سطح پاسخ است، نرم‌افزار Design Expert است. نرم‌افزار Design Expert یک بسته نرم‌افزاری آماری از شرکت Stat-Ease Inc است که به‌طور خاص به انجام طراحی آزمایش‌ها (DOE) اختصاص دارد. نرم‌افزار Design Expert، آزمون مقایسه‌ای، غربالگری، توصیفی، بهینه‌سازی، طراحی پارامترهای قوی و طرح‌های ترکیبی را ارائه می‌دهد. اهمیت آماری این عوامل با تجزیه و تحلیل واریانس (ANOVA) ایجاد می‌شود. همچنین Design Expert ابزارهای قدرتمندی برای تعیین روابط مابین پارامترهای مستقل و وابسته است [۲۶]. در این پژوهش پارامترهای وابسته شامل مقاومت تراکمی تک‌محوره، مقاومت سه محوره، آزمایش سرعت موج و مقاومت کششی برزیلی و پارامترهای مستقل شامل مقاومت مارشال، نسبت مارشال و مقاومت لغزندگی است.

۳- نتایج و بحث

۳-۱- نتایج آزمایش‌ها

همان‌طور که اشاره شد، با استفاده از انواع مصالح سنگی طبیعی نمونه‌های آسفالتی تهیه و آزمایش‌های مقاومت مارشال و مقاومت لغزندگی انجام شد که نتایج آن در شکل ۳ ارائه شده است. مطابق شکل ۳-الف نمونه شماره ۶ دارای بیشترین مقاومت مارشال و کمترین روانی و نمونه ۲ دارای کمترین مقاومت مارشال و نمونه ۸ دارای بیشترین روانی است. مطابق شکل ۳-ب نمونه ۶ دارای بیشترین نسبت مارشال است و همچنین نمونه‌های آسفالتی تهیه شده با مصالح سنگی نمونه ۳ و ۵ بیشترین و نمونه‌های آسفالتی تهیه شده با مصالح سنگی نمونه ۲ و ۷ کمترین مقاومت لغزندگی را دارا هستند.



(الف)

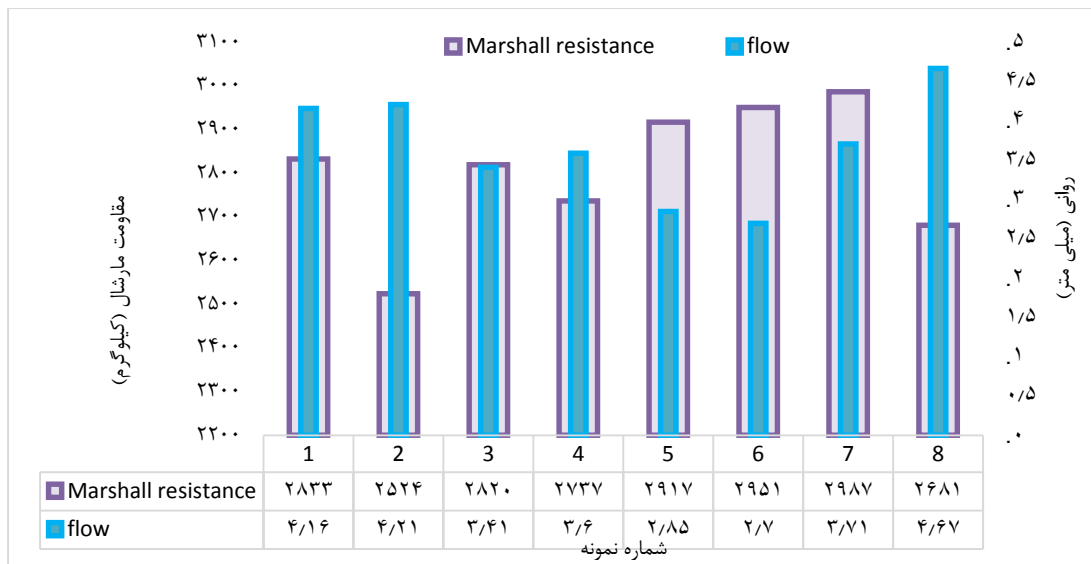


(ب)

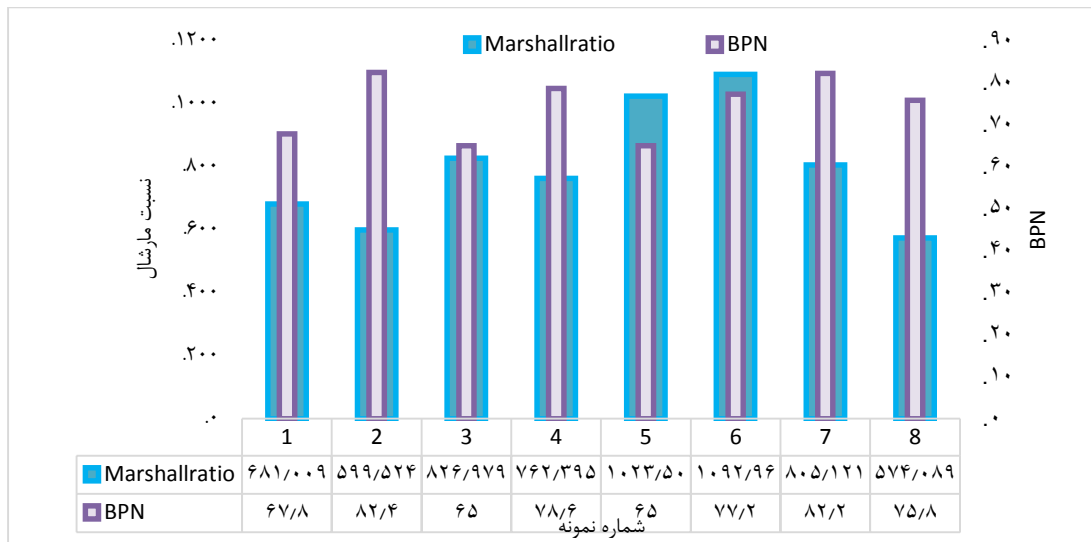
شکل ۲: الف- انجام آزمایش مقاومت مارشال ب- انجام آزمایش مقاومت لغزندگی با پاندول انگلیسی

۲-۴- تحلیل آماری

در این پژوهش تحلیل آماری چند متغیره به روش سطح پاسخ با کمک نرم‌افزارهای Design Expert انجام شد. روش سطح پاسخ (RSM^۲) که در سال ۱۹۵۱ معرفی شد؛ یک مجموعه از روش‌های آماری و ریاضیات کاربردی برای ساخت



(الف)



(ب)

شکل ۳: الف- نتایج آزمایش مقاومت مارشال ب- مقادیر نسبت مارشال و نتایج آزمایش مقاومت لغزندگی

که به صورت یک تابع ثابت است و دلیل آن را می‌توان کم بودن تغییرات مقاومت مارشال در حالات مختلف بیان کرد. با توجه به نتایج ارائه شده توسط نرم‌افزار سایر روابط بین مقاومت مارشال و پارامترهای مستقل از جمله رابطه‌ی خطی معنادار نیستند. به عنوان نمونه جدول ۵ نیز جدول ANOVA رابطه خطی مقاومت مارشال و پارامترهای مستقل است. با توجه به جدول ۵، رابطه خطی مقاومت مارشال و پارامترهای مستقل معنی‌دار نیست^۷؛ چراکه مقدار p-value برای مدل بزرگ‌تر از ۵ درصد است؛ بنابراین مدل خطی همانند سایر مدل‌ها نامناسب است و از این رو نرم‌افزار تابع ثابت رابطه (۱) را پیشنهاد می‌دهد.

۳-۲- نتایج تحلیل آماری

در این بخش به منظور بررسی تأثیر هم‌زمان پارامترهای مستقل بر پارامترهای وابسته از نرم‌افزار Design Expert استفاده شد. همان‌طور که اشاره شد پارامترهای مقاومت مارشال، نسبت مارشال و مقاومت لغزندگی آسفالت به عنوان پارامترهای وابسته و خصوصیات مصالح سنگی شامل مقاومت تک‌محوری (UCS)، مدول الاستیسیته (E)، چسبندگی بین ذرات (C)، اصطکاک داخلی مصالح سنگی (friction)، سرعت موج در مصالح (Vp) و مقاومت کششی (Ot)، به عنوان پارامتر مستقل تعریف شدند.

رابطه (۱)، رابطه مابین مقاومت مارشال و پارامترهای مستقل پیشنهاد شده توسط نرم‌افزار Design Expert است

میزان تأثیر هر پارامتر بر مقدار پاسخ است؛ به طوری که هرچه مقدار آن بیش تر باشد، آن متغیر تأثیر بیشتری بر پاسخ دارد. همچنین R-Squared، ضریب تشخیص نام دارد که بیانگر مقدار تشابه میان داده‌های آزمایشگاهی و داده‌های پیش‌بینی شده توسط مدل است که هرچه این مقدار به ۱ نزدیک تر باشد، مطلوب تر است. پارامتر دیگر در جدول ۶ Adj R-Squared است که در محاسبه این پارامتر، نرم افزار تأثیر پارامترهایی که معنادار نیستند کم تر می کند و همچنین Pred R-Squared نشانگر آن است که این مدل چقدر برای پیش‌بینی پاسخ قوی است.

جدول ۵: جدول ANOVA رابطه خطی مقاومت مارشال و پارامترهای مستقل

متغیر	جمع مربعات	خطای میانگین مربعات	F Value	p-value Prob > F	not significant
Model (Linear)	۳۳۹۶	۵۶۶۰۴۹۲	۰٫۲۷	۰٫۸۹۸۱	
A-UCS	۱۰۴۳۰۵	۱۰۴۳۰۵	۰٫۰۰۴۹۵	۰٫۹۵۵۳	
B-E	۷۶۶۵٫۴۲	۷۶۶۵٫۴۲	۰٫۰۳۶	۰٫۸۸	
C-C	۱۹۴۸٫۷	۱۹۴۸٫۷	۰٫۰۰۹۲۴۸	۰٫۹۳۹	
D-friction	۳۱۴٫۷۱	۳۱۴٫۷۱	۰٫۰۰۱۴۹۴	۰٫۹۷۵۴	
E-Vp	۸۰۴۹٫۲	۸۰۴۹٫۲	۰٫۰۳۸	۰٫۸۷۷۱	
F-Ot	۶۱۳۶٫۶	۶۱۳۶٫۶	۰٫۰۲۹	۰٫۸۹۲۴	
R-Squared	۰٫۶۱۷	Adj R-Squared	-۱٫۶۸	Pred R-Squared	-۲۵۰٫۰۴

که در آن:
 Marshall ratio: نسبت مارشال آسفالت
 UCS: مقاومت تک‌محوره مصالح سنگی (مگا پاسکال)
 E: مدول الاستیسیته مصالح سنگی (گیگا پاسکال)
 C: چسبندگی مصالح سنگی (مگا پاسکال)
 Friction: زاویه اصطکاک داخلی مصالح سنگی (درجه)
 Vp: سرعت موج در مصالح سنگی (متر بر ثانیه)
 Ot: مقاومت کششی برزلی مصالح سنگی (مگا پاسکال)
 همچنین نمودارهای سه‌بعدی رابطه‌ی برازش شده میان روانی آسفالت و پارامترهای مستقل در شکل ۴ ارائه شده است. مطابق شکل ۴ با افزایش پارامترهای مقاومتی سنگ، نسبت مارشال افزایش یافته و احتمال رخ داد و یا شدت شیار شدگی کاهش می‌یابد.

$$\text{Marshall resistance} = 2693.75 \quad (1)$$

در رابطه فوق، Marshall resistance بیانگر مقاومت مارشال آسفالت است.

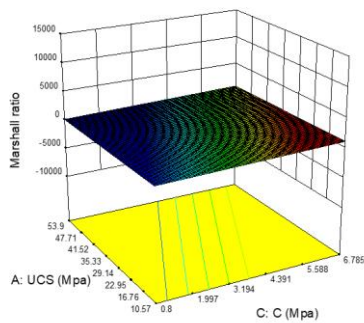
رابطه (۲) نیز رابطه‌ی مابین نسبت مارشال و پارامترهای مستقل است که جدول ANOVA مربوط به آن در جدول ۶ ارائه شده است. در جدول در جدول، پارامتر p-value بیانگر این است که آیا این پارامتر تأثیر قابل توجهی بر مقدار پاسخ دارد یا خیر؛ به طوری که اگر این مقدار کمتر و مساوی ۵ درصد باشد؛ یعنی متغیر مستقل مورد نظر تأثیر قابل توجهی بر متغیر وابسته دارد. همچنین مقدار F-Value نشان‌دهنده

طبق جدول ۶ مقدار ضریب تشخیص به عدد ۱ نزدیک و اختلاف دو پارامتر Adj R-Squared و Pred R-Squared کمتر از ۰٫۲ است. علاوه بر این مقدار p-value مدل کمتر از ۵ درصد است؛ بنابراین مدل معنی دار است. اگرچه این مقدار برای تمامی متغیرهای مستقل بیشتر از ۵ درصد است؛ اما این به این معنی نیست که نمی‌توان مابین این پارامترها رابطه‌ای برقرار کرد. از طرفی بر اساس مقدار F-Value، مقاومت کششی مصالح سنگی بیش‌ترین میزان تأثیر را بر مقدار پاسخ دارد. لازم به ذکر است که نرم‌افزار دیزاین اکسپرت با توجه به اطلاعات و تحلیل‌های آماری، خود بهترین رابطه ممکن بین پارامترهای مستقل و وابسته را ارائه می‌دهد.

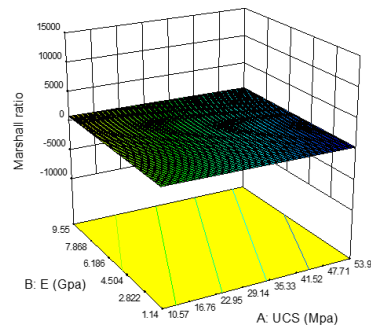
$$\begin{aligned} \text{Marshallratio} = & -618.01987 + 7.09100 \\ & * \text{UCS} + 14.65415 * \text{E} \\ & + 111.71194 * \text{C} \\ & + 6.81187 \text{ friction} \\ & + 0.080649 \text{ Vp} \\ & + 66.24467 * \text{Ot} \end{aligned} \quad (2)$$

جدول ۶: جدول ANOVA رابطه (۲)

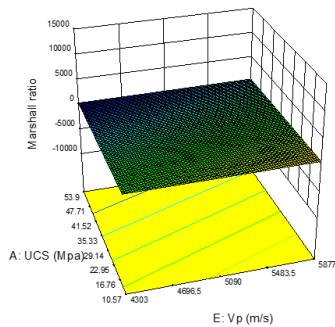
متغیر	جمع مربعات	خطای میانگین مربعات	F Value	p-value Prob > F	Model (Linear)
Model (Linear)	۲,۷۳۶*۱۰ ^۵	۴۵۵۹۵,۱۷	۲,۷۶	۰,۰۴۳۱	significant
A-UCS	۱۲۸۰,۰۳	۱۲۸۰,۰۳	۰,۰۷۷	۰,۸۲۷۳	
B-E	۱۲۹۱,۹۲	۱۲۹۱,۹۲	۰,۰۷۸	۰,۸۲۶۵	
C-C	۴۱۹۶,۱۹	۴۱۹۶,۱۹	۰,۲۵	۰,۷۰۲۹	
D-friction	۱۰۷۱,۸	۱۰۷۱,۸	۰,۰۶۵	۰,۸۴۱۳	
E-Vp	۲۸۰۶,۱۴	۲۸۰۶,۱۴	۰,۱۷	۰,۷۵۱۲	
F-Ot	۸۵۳۵,۷۶	۸۵۳۵,۷۶	۰,۵۲	۰,۶۰۳۴	
R-Squared	۰,۹۴۳	Adj R-Squared	۰,۶۱۷	Pred R-Squared	۰,۷



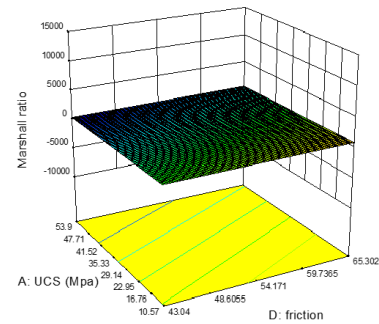
(ب)



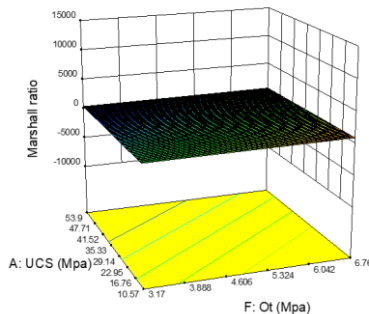
(الف)



(د)



(ج)



(ه)

شکل ۴: نمودار رابطه نسبت مارشال با مقاومت تک‌محوره و مدول الاستیسیته مصالح سنگی ب- نمودار رابطه نسبت مارشال با مقاومت تک‌محوره و چسبندگی مصالح سنگی ج- نمودار رابطه نسبت مارشال با مقاومت تک‌محوره و زاویه اصطکاک داخلی مصالح سنگی د- نمودار رابطه نسبت مارشال با مقاومت تک‌محوره و سرعت موج مصالح سنگی ه- نمودار رابطه نسبت مارشال با مقاومت تک‌محوره و مقاومت کششی مصالح سنگی

پارامترهای مقاومتی سنگ، به جز چسبندگی، مقاومت لغزندگی افزایش می‌یابد.

$$BPN = 91.64529 + 0.96614 * UCS + 1.0642 * E - 9.15586 * C + 0.85415 * friction + 6.35568 * 10^{-3} Vp + 0.67821 * Ot \quad (3)$$

که در آن:

BPN: مقاومت لغزندگی آسفالت

UCS: مقاومت تک‌محوره مصالح سنگی (مگا پاسکال)

E: مدول الاستیسیته مصالح سنگی (گیگا پاسکال)

C: چسبندگی مصالح سنگی (مگا پاسکال)

Friction: زاویه اصطکاک داخلی مصالح سنگی (درجه)

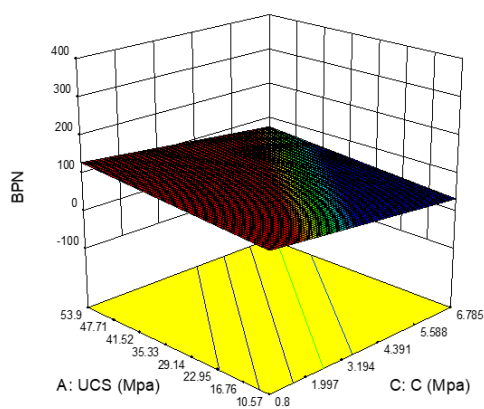
Vp: سرعت موج در مصالح سنگی (متر بر ثانیه)

Ot: مقاومت کششی برزیلی مصالح سنگی (مگا پاسکال)

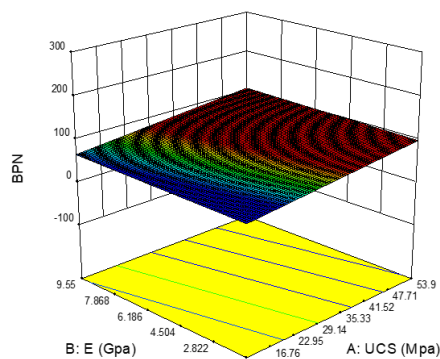
رابطه (۳) نیز رابطه‌ی بین مقاومت لغزندگی آسفالت و پارامترهای مستقل است که جدول ANOVA مربوط به آن در جدول ۷ ارائه شده است. مطابق جدول ۷ مقدار p-value مدل کمتر از ۵ درصد است؛ بنابراین مدل معنی‌دار است. همچنین این مقدار برای تمامی متغیرهای مستقل کمتر از ۵ درصد است؛ بنابراین تمامی متغیرهای مستقل تأثیر معناداری بر مقاومت لغزندگی آسفالت دارد. علاوه بر این بر اساس مقدار F-Value، مقاومت تک‌محوری و چسبندگی مصالح سنگی بیش‌ترین میزان تأثیر را بر مقدار پاسخ دارد؛ و مقدار ضریب تشخیص به عدد ۱ نزدیک است، همچنین اختلاف دو پارامتر Adj R-Squared و Pred R-Squared کمتر ۰/۲ است. نمودارهای سه‌بعدی رابطه‌ی برازش شده میان مقاومت لغزندگی آسفالت و پارامترهای مستقل نیز در شکل ۵ ارائه شده است. مطابق شکل ۵ که بیانگر تأثیر پارامترهای مستقل بر مقدار مقاومت لغزندگی است، افزایش

جدول ۷: جدول ANOVA رابطه (۳)

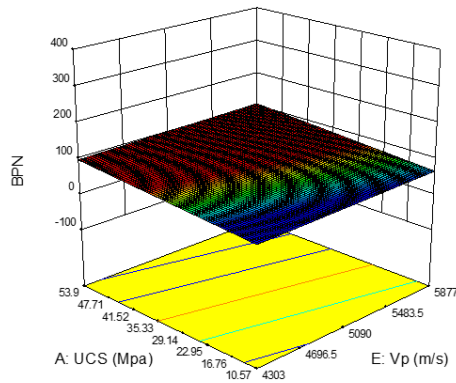
متغیر	جمع مربعات	خطای میانگین مربعات	F Value	p-value Prob > F	Model (Linear)
Model (Linear)	۳۶۶/۵۴۷۱	۶۱/۰۹	۱۰/۴۷	۰/۰۲۳	significant
A-UCS	۲۳/۷۶۲	۲۳/۷۶	۴/۰۷	۰/۰۲۹	
B-E	۶/۸۱۳۳	۶/۸۱	۱/۱۶۸	۰/۰۴۷	
C-C	۲۸/۱۸	۲۸/۱۸	۴/۸۳	۰/۰۲۷	
D-friction	۱۶/۸۵۳	۱۶/۸۵	۲/۸۹	۰/۰۳۳	
E-Vp	۱۷/۴۲۷	۱۷/۴۲	۲/۹۸	۰/۰۳۳	
F-Ot	۰/۸۹۴۶	۰/۸۹	۰/۱۵	۰/۰۷۶۲	
R-Squared	۰/۷۴	Adj R-Squared	۰/۸۹	Pred R-Squared	۰/۹۴۳



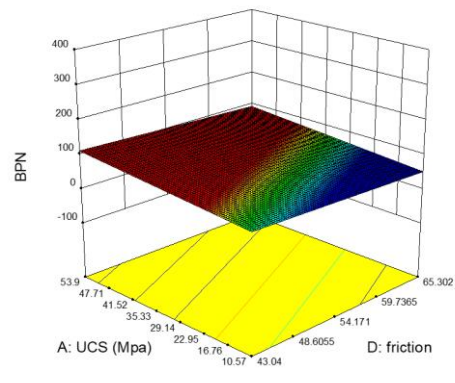
(ب)



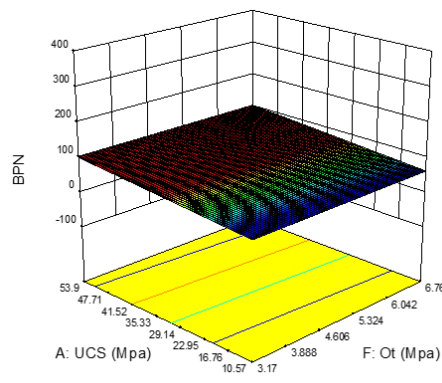
(الف)



(د)



(ج)



(ه)

شکل ۵: نمودار رابطه مقاومت لغزندگی آسفالت با مقاومت تک‌محوره و مدول الاستیسیته مصالح سنگی ب- نمودار رابطه مقاومت لغزندگی آسفالت با مقاومت تک‌محوره و چسبندگی مصالح سنگی ج- نمودار رابطه مقاومت لغزندگی آسفالت با مقاومت تک‌محوره و زاویه اصطکاک داخلی مصالح سنگی د- نمودار رابطه مقاومت لغزندگی آسفالت با مقاومت تک‌محوره و سرعت موج مصالح سنگی ه- نمودار رابطه مقاومت لغزندگی آسفالت با مقاومت تک‌محوره و مقاومت کششی مصالح سنگی

به طوری که نتایج این پژوهش بیانگر آن است که با افزایش مقاومت مصالح سنگی، مقاومت لغزندگی آسفالت نیز افزایش می‌یابد که با پژوهش‌های پیشین مطابقت دارد [۲۹].

به طور کلی نتایج آزمایش‌ها بر روی نمونه‌های آسفالتی تهیه شده با انواع مصالح سنگی طبیعی نشان می‌دهد که خصوصیات مصالح سنگی تأثیر بسزایی در پارامترهای مقاومتی از جمله مقاومت شیار شدگی و مقاومت لغزندگی دارد؛ به طوری که با افزایش پارامترهای مقاومتی مصالح سنگی، پارامترهای مقاومتی روسازی نیز افزایش می‌یابد که با نتایج پژوهش‌های پیشین نیز هم‌خوانی دارد [۱۹].

۴- نتیجه‌گیری

سنگ‌دانه‌ها در بین دیگر مصالح مورد مصرف در پروژه‌های عمرانی جایگاه خاصی از دیدگاه اقتصادی و فنی احراز کرده‌اند؛ به نحوی که حجم وسیعی از مصالح بکار رفته در این پروژه‌ها را سنگ‌دانه‌ها تشکیل می‌دهند. از این جهت

همان‌طور که اشاره شد، نسبت مارشال (نسبت مقاومت مارشال به روانی) به عنوان شاخص شیار شدگی شناخته می‌شود. لازم به ذکر است که شیار شدگی یکی از خرابی‌های مهم و عمده است که در روسازی آسفالتی به علت بار ترافیکی رخ می‌دهد و ایمنی جاده را به خطر می‌اندازد. از این رو این پارامتر اهمیت زیادی در راه‌سازی دارد [۲۷]. نتایج پژوهش‌های پیشین نشان می‌دهد که یکی از عوامل مؤثر بر پدیده‌ی شیار شدگی، مقاومت مصالح سنگی تشکیل‌دهنده آسفالت است؛ به طوری که هرچه مقاومت و استحکام مصالح سنگی بیشتر باشد، احتمال رخ داد و یا شدت شیار شدگی روسازی آسفالتی کاهش می‌یابد [۲۸]. از طرفی مقاومت لغزندگی و ضریب اصطکاک سطح از عوامل مؤثر بر تعداد و شدت تصادفات جاده‌ای است [۲۷]؛ از این رو به جهت حساسیت ایمنی راه‌ها به شدت حائز اهمیت است. نتایج تحقیقات گذشته نشان می‌دهد که نوع و جنس مصالح سنگی تأثیر مستقیمی بر مقاومت لغزندگی آسفالت دارد؛

اساتید بزرگواری که در تکمیل این پژوهش همکاری کردند، قدردانی می‌شود.

مراجع

- [1] Shrestha, K. K., & Shrestha, P. P. (2019). Change orders on road maintenance contracts: Causes and preventive measures. *Journal of Legal Affairs and Dispute Resolution in Engineering and Construction*, 11(3), 04519009.
- [2] Al-Bayati, A. J., Ali, M., & Nnaji, C. (2023). Managing Work Zone Safety during Road Maintenance and Construction Activities: Challenges and Opportunities. *Practice Periodical on Structural Design and Construction*, 28(1), 04022068.
- [3] Zhou, C., Zhang, M., Li, Y., Lu, J., & Chen, J. (2019). Influence of particle shape on aggregate mixture's performance: DEM results. *Road Materials and Pavement Design*, 20(2), 399-413.
- [4] Xie, J., Wu, S., Lin, J., Cai, J., Chen, Z., & Wei, W. (2012). Recycling of basic oxygen furnace slag in asphalt mixture: Material characterization & moisture damage investigation. *Construction and Building Materials*, 36, 467-474.
- [5] Xie, J., Chen, J., Wu, S., Lin, J., & Wei, W. (2013). Performance characteristics of asphalt mixture with basic oxygen furnace slag. *Construction and Building Materials*, 38, 796-803.
- [6] Asi, I. M. (2007). Performance evaluation of SUPERPAVE and Marshall asphalt mix designs to suite Jordan climatic and traffic conditions. *Construction and Building Materials*, 21(8), 1732-1740.
- [7] Ahn, I. S., Cheng, L., Fox, P. J., Wright, J., Patenaude, S., & Fujii, B. (2015). Material properties of large-size tire derived aggregate for civil engineering applications. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 27(9), 04014258.
- [8] Ren, J., & Yin, C. (2022). Investigating mechanical characteristics of aggregate structure for road materials. *International Journal of Pavement Engineering*, 23(2), 372-386.
- [9] Ahmadinejad, M., Ameri, M. (2010). Investigating the correlation between polishing value and other physical and mechanical properties of aggregates. *Research Journal of Transportation*, 7(1). (In Persian)
- [10] Irandoost Hamdani, Sh., Memarian, M. R., Abrishmi Kisemi, H.R. (2014). The influence of the type of alluvial aggregates from south-west and south-east of Tehran on the durability of asphalt, 7th Iran Bitumen and Asphalt Conference, Tehran. (In Persian)
- [11] Moghadas nezhad, F., Falahi, H.,

بررسی کیفیت انواع سنگ‌دانه‌ها به منظور تعیین مناسب بودن آن‌ها با توجه به نوع پروژه مهندسی، بسیار حائز اهمیت است. از این رو این پژوهش با هدف بررسی تأثیر خصوصیات مصالح سنگی طبیعی بر عملکرد روسازی آسفالتی شامل مقاومت فشاری، مقاومت شیار شدگی و مقاومت لغزندگی به روش سطح پاسخ انجام شد. بدین منظور نمونه‌های آسفالتی با ۸ نوع نمونه سنگ طبیعی مختلف ساخته شد و تحت آزمایش مقاومت مارشال و مقاومت لغزندگی قرار گرفت و نتایج آزمایش‌ها با نرم افزار Design Expert مورد بررسی قرار گرفت. نتایج این پژوهش به شرح زیر است:

- نتایج تحلیل آماری چند متغیره نشان می‌دهد که مقاومت مارشال نمونه‌های آسفالت با در نظر گرفتن تمامی متغیرهای مستقل مقداری ثابت است.
- با افزایش پارامترهای مقاومتی مصالح سنگی، نسبت مارشال نمونه‌های آسفالتی افزایش می‌یابد که مقاومت کششی بیشترین تأثیر را بر این متغیر دارد.
- با افزایش پارامترهای مقاومتی سنگ، به جز چسبندگی، مقاومت لغزندگی نیز افزایش می‌یابد و مقاومت تک‌محوری مصالح سنگی بیشترین تأثیر را بر این پارامتر دارد.
- با توجه به روابط ۱، ۲ و ۳ می‌توان با داشتن نتایج آزمایش‌های مقاومت تک‌محوره، مقاومت سه محوره، سرعت موج‌برشی و مقاومت کششی غیرمستقیم سنگ مقادیر مقاومت فشاری مارشال، نسبت مارشال و مقاومت لغزندگی آسفالت را محاسبه کرد.
- به‌طور کلی نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که خواص مصالح سنگی تأثیر بسزای بر عملکرد آسفالت دارد؛ از این رو با توجه به هدف پروژه باید مصالح سنگی مناسب را برای ساخت روسازی آسفالتی انتخاب کرد.
- پیشنهاد می‌شود اثر ویژگی‌های مصالح سنگی بر خصوصیات دیگر آسفالت، از جمله خستگی، عمق شیار شدگی، میزان قیر زدگی نیز مورد بررسی قرار گیرد.

سپاسگزاری

لازم به ذکر است که این مقاله برگرفته از رساله دکتری تحت عنوان مقایسه ویژگی‌های ژئومکانیکی انواع سنگ‌دانه‌های طبیعی (آهکی و سیلیسی) نسبت به سنگ‌دانه‌های مصنوعی و تأثیر آن بر رفتار لایه رویه راه است. بدین‌وسیله از آزمایشگاه معدن و عمران دانشگاه یزد و تمامی

- characteristics on the surface wear performance of rolled concrete pavement. *Concrete Research*, 14(2), 35-51. (In Persian)
- [20] Salehi, R., Dehghan Benadaki, A. (2022). The effect of cornering coefficient of fine-grained stone materials on moisture sensitivity and fracture resistance of hot asphalt mixture. *Transportation Infrastructure Engineering*, 8(1), 95-118. (In Persian)
- [21] Awed, A. M., Tarbay, E. W., El-Badawy, S. M., & Azam, A. M. (2022). Performance characteristics of asphalt mixtures with industrial waste/by-product materials as mineral fillers under static and cyclic loading. *Road Materials and Pavement Design*, 23(2), 335-357.
- [22] ASTM, A. (2015). D6927-15 Standard Test Method for Marshall Stability and Flow of Asphalt Mixtures. *ASTM International: West Conshohocken, PA, USA*.
- [23] ASTM E303, "Standard Test Method for Measuring Surface Frictional Properties Using the British Pendulum Tester".
- [24] Fu, C., Fu, C., & Michael, M. (2015). *Handbook of simulation optimization*. Springer.
- [25] Jabroti, A., Ghofrani, A. 2014, Introduction of Response Surface Methodology, Fourth National Conference of New Technologies of Chemistry and Chemical Engineering, Qochan. (In Persian)
- [26] Montgomery, D. C. (2017). Montgomery: design and analysis of experiments. *John Willy & Sons*.
- [27] Asphalt Paving Code of Iranian Roads, Publication 234, Country Management and Planning Organization, Tehran, Iran, 1390. (In Persian)
- [28] Cao, W., Liu, S., & Feng, Z. (2013). Comparison of performance of stone matrix asphalt mixtures using basalt and limestone aggregates. *Construction and Building Materials*, 41, 474-479.
- [29] Rezaei, A., Masad, E., & Chowdhury, A. (2011). Development of a model for asphalt pavement skid resistance based on aggregate characteristics and gradation. *Journal of transportation engineering*, 137(12), 863-873.
- Azarhoosh, A. (2014). investigation of the effect of using waste concrete aggregates on the modulus of elasticity and volumetric properties of hot mix asphalt, 10th International Congress of Civil Engineering, Tabriz. (In Persian)
- [12] Adresi, M. (2021). The effect of the type and grain size of fine-grained stone materials and different surface texture on the reliability of the wear resistance of the roller concrete surface. *Amirkabir Civil Engineering Journal*, 54(1), 343-362. (In Persian)
- [13] Rezaei, L., and Qadim, A., Rezaei, P. (2015). Comparison of two viewpoints of civil engineers and geologists regarding asphalt mixture aggregates in Iran, 8th Iran Bitumen and Asphalt Conference, Tehran. (In Persian)
- [14] Salek Bafghi, M., Khabeiri, M.M. (2016). Investigating the effects of granulation and shape of aggregates on the slip resistance of asphalt mixtures with aggregate skeleton. *Research Journal of Transportation*, 14(1), 218-236. (In Persian)
- [15] Ahmed, H. Y., Hashem, M. D., Rashwan, N. K., & Abdalla, S. A. (2014). Investigation of aggregate particles shape on characteristics of hot mix asphalt. *JES. Journal of Engineering Sciences*, 42(6), 1349-1366.
- [16] Liu, H., Hao, P., & Xu, J. (2017). Effects of nominal maximum aggregate size on the performance of stone matrix asphalt. *Applied Sciences*, 7(2), 126.
- [17] Efti Dariani, M., Shikhabegam Qala, Arman. (2019). Technical justification of using the role of load characteristics and materials in increasing the fatigue life of asphalt pavement. *Road*. (In Persian)
- [18] Khadadi, A., Heydari, M., Dehghani, Ahmad. (2019). Investigating the effect of anti-stripping additives and the type of aggregate materials on the resistance of asphalt mixtures against moisture damage (case study: Ardabil province). *Transportation Engineering Quarterly*, 10(4), 851-866. (In Persian)
- [19] Fatahi, M., Khabeiri, M., Yarahamdi Bafghi, A. (2021). Investigating the effect of aggregate

⁵ Awed⁶ Response Surface Methodology⁷ not significant¹ Ahmed² Liu³ Ren⁴ Yin