

تعیین مقدار مناسب استفاده از ترکیب سرباره ریزدانه و درشت‌دانه بر اساس خصوصیات مکانیکی مخلوط‌های آسفالتی با استفاده از روش سطح پاسخ

محمود عامری*، استاد، گروه راه و ترابری، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران،

تهران

احمد منصوریان، دانشیار، بخش قیر و آسفالت، مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی، تهران
حمید شاکر، دانشجوی دکتری راه و ترابری، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران،

تهران

امیرحسین عامری، دانش‌آموخته کارشناسی ارشد راه و ترابری، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه
علم و صنعت ایران، تهران

Email: ameri@iust.ac.ir

دریافت: ۱۳۹۹/۱۱/۲۶ - پذیرش: ۱۴۰۰/۰۱/۱۱

چکیده

استفاده از پسماند تولیدات صنعتی، مانند سرباره فولاد، در صنعت راه‌سازی، جهت کاهش استفاده از مصالح سنگی و همچنین مزایای زیست‌محیطی ناشی از استفاده مجدد از آنها اهمیت زیادی دارد. تحقیقات در خصوص استفاده از سرباره فولاد به‌عنوان جایگزین مصالح سنگی در روسازی‌های آسفالتی به سبب بهبود برخی از خصوصیات اصلی این مخلوط‌ها برای سالیان متمادی انجام گرفته است. در این تحقیقات، سرباره به‌صورت کلی (شامل ریزدانه و درشت‌دانه با درصد یکسان) و با به‌صورت درشت‌دانه جایگزین مصالح سنگی گردیده است. اما از آنجا که برخی از خصوصیات مخلوط‌های آسفالتی با تغییر مصالح ریزدانه یا ترکیبی متفاوت از ریزدانه و درشت‌دانه نسبت به جایگزینی هم‌زمان و یکسان هر دو، تأثیرات متفاوتی را نشان می‌دهند، در این تحقیق، به بهینه‌یابی درصد استفاده از مصالح سرباره در اندازه ریزدانه و درشت‌دانه با استفاده از روش پاسخ سطح پرداخته شده است. در همین راستا، طرح‌های اختلاط متفاوتی از این جایگزینی با استفاده از آزمایش‌های مدول برجهندگی، مقاومت مارشال، کشش غیرمستقیم و حساسیت رطوبتی بررسی شده‌اند. نتایج آزمایش‌های انجام گرفته و تحلیل آنها، نوع رفتار ریزدانه و درشت‌دانه را در مخلوط‌های آسفالتی مشخص کرده و در نهایت برای هر آزمایش، مدل پیشنهادی بر اساس شرایط تحقیق مشخص شده است. واژه‌های کلیدی: سرباره، ریزدانه، درشت‌دانه، بهینه‌یابی، روش پاسخ سطح

۱. مقدمه

استفاده از مواد و مصالح گوناگون برای بهبود و ارتقاء خصوصیات مخلوط های آسفالتی طی سالیان گذشته مورد توجه پژوهشگران حوزه روسازی های آسفالتی قرار گرفته است. این مواد و مصالح یا جایگزینی برای مصالح سنگی بوده اند و یا به صورت مخلوط با قیر مورد استفاده قرار گرفته اند (فرازمند و همکاران، ۲۰۲۰). با توجه به اینکه سازه اصلی رویه های آسفالتی شامل سنگدانه و قیر می باشد، هرگونه تغییری در این مصالح و یا سیستم چسبندگی و پیوستگی بین این مصالح می تواند خصوصیات کلی مخلوط آسفالتی را دگرگون کرده و بر عمر مفید رویه ها تأثیرگذار باشد (بهیری، ۲۰۱۳؛ عامری و همکاران، ۱۳۹۹). هرچند تحقیقات در زمینه مواد و مصالح قابل کاربرد در روسازی بسیار وسیع است، اما در یک طبقه بندی کلی می توان چنین بیان کرد که: پلیمرهایی مانند SBS، SBR، نانومواد مانند نانورس، زایکوترم، نانوآهک، مواد بازیافتی مانند پودر لاستیک و پلی اتیلن- های بازیافتی عمده مواد و مصالح اصلاح کننده قیر را تشکیل می دهند (عامری و همکاران، ۲۰۱۹؛ عامری و همکاران، ۲۰۲۰ a). از طرفی، مصالح بازیافتی مانند خرده آسفالت بازیافتی (RAP) و سنگدانه های مصنوعی مانند سنگدانه های از جنس پلی اتیلن سبک و همچنین سرباره عمده مواد جایگزین شونده برای اصلاح سنگدانه ها را تشکیل می دهند (گائو و همکاران؛ ۲۰۱۷؛ عاملیان و همکاران؛ ۲۰۱۸؛ فخری و احمدی، ۲۰۱۷).

در این تحقیق، به بررسی اثر جایگزینی های مختلف سرباره به جای مصالح سنگی پرداخته می شود. سرباره فولاد یکی از محصولات جانبی صنعت فولاد می باشد که مواد و ترکیبات بارزشی مانند اکسید کلسیم، اکسید منیزیم، آهن، فسفر، منگنز و سیلیسیم را در اجزای تشکیل دهنده خود دارد. سرباره فولاد به طور مستقیم مصرفی ندارد و به صورت پسماند انباشته می شود. دپوی

این مصالح، با توجه به حجم بسیار زیاد آن، علاوه بر محدودیت های مختلف، خطرات بسیار جدی زیست محیطی را می تواند در برداشته باشد (عموزاده عمرانی و حصیرچیان، ۱۳۹۹). سرباره فولاد به دو دسته سرباره کوره قوس الکتریکی (EAF^۱) و سرباره بر پایه اکسیژن (BOS^۲) تقسیم می شود (کاووسی و قاضی زاده، ۲۰۱۴).

استفاده از سرباره فولاد در مخلوط های آسفالتی برای چندین دهه مورد مطالعه و بررسی قرار گرفته است. بهبود خواص مکانیکی مخلوط های آسفالتی شامل بهبود مقاومت مارشال، مقاومت کششی غیرمستقیم و مدول برجهنگی از جمله تأثیر استفاده از سرباره در آسفالت بوده است (آلوواسولا و همکاران، ۲۰۱۵؛ کیم و همکاران، ۲۰۱۸؛ فن و همکاران، ۲۰۱۸).

وزن مخصوص زیاد، زاویه دار بودن، بافت سطحی سخت، مقاومت و دوام زیاد سرباره فولاد به عنوان یکی از عوامل اصلی بهبود خصوصیات مکانیکی مخلوط های آسفالتی عنوان شده است (عربانی و آذرهوش، ۲۰۱۲). در مقابل، افزایش قیر بهینه به دلیل تخلخل سطحی زیاد سرباره و افزایش فضای خالی به واسطه استفاده از سرباره درشت دانه نیز به عنوان یکی از معایب استفاده از سرباره در مخلوط های آسفالتی عنوان شده است (ضیائی و همکاران، ۲۰۱۵). هرچند افزایش مقدار قیر بهینه برای جایگزینی کمتر از ۵۰ درصد سرباره بسیار کم و در حدود ۰/۳ است، اما با افزایش مقدار جایگزینی سرباره به بیش از ۵۰ درصد مقدار قیر بهینه نیز به طور قابل توجهی (در حدود یک درصد) افزایش پیدا می کند (کاووسی و قاضی زاده، ۲۰۱۴). از همین رو، و با توجه به محدود بودن مقدار سرباره، جایگزینی ۱۰۰ درصد سرباره با مصالح طبیعی به ندرت در تحقیقات مشاهده شده است (چن و همکاران، ۲۰۱۵؛ فخری و احمدی، ۲۰۱۷).

^۲- Basic Oxygen Furnace

^۱- Electric Arc Furnace

ضیائی و بهنیا (۲۰۲۰) با جایگزینی سرباره فولاد به نسبت ۲۵، ۵۰ و ۷۵ درصد به جای مصالح سنگی آهکی، آزمایش های مصالح سنگی و عملکرد مکانیکی مخلوط های آسفالتی را انجام دادند. نتایج این تحقیق نشان داد که در پارامترهایی مانند درصد شکستگی، سایش لس- آنجلس، شاخص کل، بافت سطحی و درصد فضای خالی متراکم نشده، استفاده از سرباره نتایج بهتری نسبت به مصالح سنگی آهکی دارد. از طرفی، نتایج آزمایش های عملکردی مانند مدول برجهنگی نیز نشان از عملکرد بهتر مخلوط های آسفالتی حاوی سرباره داشت.

با وجود تحقیقات مختلف در مورد مخلوط های آسفالتی حاوی سرباره، پژوهشی که روی بهینه یابی استفاده از سرباره در ابعاد ریزدانه و درشت دانه انجام شده باشد، به چشم نمی خورد. از همین رو، در این تحقیق، با استفاده از آزمایش هایی مانند مدول برجهنگی، مقاومت مارشال و کشش غیرمستقیم و همچنین با کاربرد روش پاسخ سطح (RSM¹)، بهینه یابی برای استفاده از ترکیب سرباره ریزدانه و درشت دانه در مخلوط های آسفالتی مورد بررسی قرار گرفته است.

۲. مواد و روش ها

۲-۱. مصالح سنگی و قیر

مصالح سنگی مورد استفاده در این تحقیق از معدن اسب- چران واقع در شهرستان دماوند، مطابق با مشخصات جدول ۱، تهیه شده است. همچنین، از قیر با درجه نفوذ ۶۰/۷۰ تولید شرکت پاسارگاد تهران استفاده شده است. مصالح سرباره ای مورد استفاده در این تحقیق از ذوب آهن اصفهان می باشد که نتایج آزمایش XRF روی این مصالح در جدول ۲ ارائه شده است. برای مصالح فیلر نیز از آهک مطابق با مشخصات جدول ۳ استفاده شده است.

همان طور که بیان شد، استفاده از سرباره فولاد برای بهبود خصوصیات مخلوط های آسفالتی توسط پژوهشگران مختلفی مورد بررسی قرار گرفته است. در ادامه این بخش، به بیان نتایج اصلی پژوهش های صورت گرفته و تمایز پژوهش حاضر با تحقیقات گذشته پرداخته شده است.

پاستو و بالود (۲۰۱۰) خصوصیات مخلوط های آسفالتی حاوی سرباره فولاد به همراه قیر SBS را مورد بررسی قرار دادند. در این تحقیق، بخشی از کل مصالح سنگی با سرباره جایگزین شده بود. نتایج این تحقیق نشان داد که مخلوط های حاوی سرباره و SBS دارای حساسیت رطوبتی بهتر و دوام بیشتری نسبت به نمونه شاهد است. عربانی و آذرهوش (۲۰۱۲) نیز در تحقیقی، جایگزینی مصالح سنگی با سرباره و بتن بازیافتی را مورد بررسی قرار دادند. در پژوهش این محققین، از شش ترکیب مختلف که جایگزین درصدی از کل مصالح سنگی می شد برای بررسی خصوصیات عملکردی مخلوط های آسفالتی استفاده شد. نتایج این تحقیق نشان داد که استفاده از سرباره برای جایگزینی مصالح سنگی باعث بهبود مقاومت مارشال، مدول برجهنگی، تغییر شکل های دائمی و عملکرد خستگی می گردد.

گلی و همکاران (۲۰۱۷) شیارشدگی و حساسیت رطوبتی مخلوط های آسفالتی حاوی سرباره را بررسی کردند. نتایج این تحقیق نشان داد که استفاده از سرباره برای جایگزینی مصالح سنگی باعث بهبود مقاومت شیارشدگی، کاهش حساسیت رطوبتی و بهبود عمر خستگی مخلوط های آسفالتی شده است.

قاضی زاده و همکاران (۲۰۱۸) نیز به مقایسه سرباره BOS و EAF با استفاده از آزمایش های مقاومت مارشال و عمر خستگی پرداختند نتایج تحقیق این پژوهشگران نشان داد که استفاده از سرباره EAF نسبت به سرباره BOS در مخلوط های آسفالتی بسیار مناسب تر است.

جدول ۱. مشخصات مصالح سنگی

شرح	استاندارد آزمایش	نتایج آزمایش
حداکثر سایش به روش لس آنجلس (%) برای مصالح درشت‌دانه	AASHTO T96	۲۳
افت وزنی در مقابل سولفات سدیم (%) برای مصالح درشت‌دانه	AASHTO T104	۰/۱
سنگ‌دانه‌های پهن و دراز (%) برای مصالح درشت‌دانه	ASTM D4791	۰/۳
شکستگی مصالح سنگی در دو جبهه روی الک شماره ۴ (%)	ASTM D5821	۱۰۰
افت وزنی در مقابل سولفات سدیم (%) برای مصالح ریزدانه	AASHTO T104	۱/۰
گوشه‌داری مصالح سنگی ریزدانه (%)	ASTM C1252	۴۳
ارزش ماسه‌ای مصالح بین سرد	AASHTO T176	۸۴

جدول ۲. نتایج آزمایش XRF سرباره مصرفی

SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	CaO	Na ₂ O
۲۰/۲۳	۵/۵۲	۲۶/۱۳	۵/۵۸	۳۲/۵۷	۰/۶۸

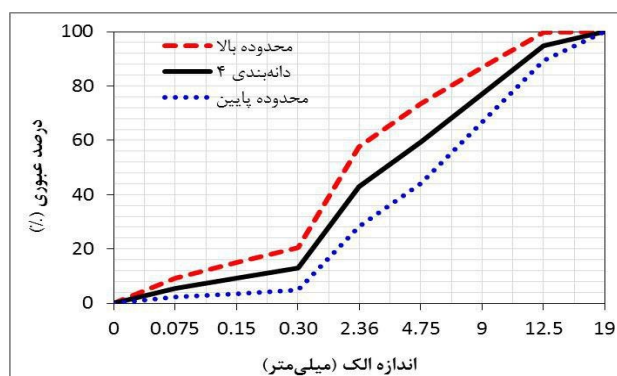
جدول ۳. نتایج آزمایش‌ها روی آهک فیلر

شرح	نتایج آزمایش
وزن مخصوص (gr/cm ³)	۲/۰۲۵
رد شده از الک ۲۰۰ (%)	۱۰۰
رطوبت آزاد (%)	۰/۸۸
افت وزنی در اثر حرارت (%)	۲۴/۷۵

۲-۲. دانه‌بندی

دانه‌بندی مصالح سنگی و سرباره فولاد مورد استفاده در این تحقیق بر اساس دانه‌بندی شماره ۴ پیوسته نشریه

۲۳۴ ایران می‌باشد. مرز بین ریزدانه و درشت‌دانه الک شماره ۴ با قطر ۴/۷۵ میلی‌متر در نظر گرفته شده است. محدوده دانه‌بندی شماره ۴ پیوسته نشریه ۲۳۴ در شکل ۱ نشان داده شده است.



شکل ۱. دانه‌بندی مصالح کاربردی

۳-۲. جایگزینی سرباره

شده است. برای این کار، ابتدا وزن مخصوص مصالح سنگی و سرباره برای مصالح باقی مانده روی هر الک به صورت جدول ۴ به دست آمده است. در ادامه، برای هر درصد جایگزینی از ضرب نسبت وزن مخصوص سرباره به وزن مخصوص مصالح سنگی در وزن مصالح جایگزین شده، استفاده شده است. با این روش، ارتفاع نمونه ها یکسان شده و نمونه ها در حالت یکسان مقایسه می شوند.

با توجه به تفاوت وزن مخصوص سرباره با وزن مخصوص مصالح سنگی، جایگزینی وزنی مصالح سنگی باعث ایجاد تفاوت در ارتفاع نمونه ها می شود و خطای غیرهمسانی نمونه های مقایسه ای را خواهد داشت. به همین دلیل، برای رعایت همسانی نمونه ها برای مقایسه در این تحقیق، جایگزینی سرباره به صورت حجمی انجام

جدول ۴. وزن مخصوص مصالح سنگی و سرباره و نسبت وزن مخصوص ها برای مانده روی هر الک

اندازه الکها (mm)	۱۲/۵	۴/۷۵	۲/۳۶	۰/۳	۰/۰۷۵
مصالح سنگی	۲/۷۴۸	۲/۷۲۶	۲/۶۸۷	۲/۷۷۳	۲/۷۳۶
سرباره	۳/۵۹۲	۳/۷۳۶	۳/۷۱۲	۳/۷۰۸	۳/۵۶۵
نسبت وزن مخصوص سرباره به مصالح	۱/۳۰۷	۱/۳۷۱	۱/۳۸۱	۱/۳۳۷	۱/۳۰۳

۴-۲. ساخت مخلوط های آزمایش

سرباره ریزدانه (بین رد شده از الک ۴ و مانده روی ۲۰۰) استفاده شده است. درصد های مورد استفاده در این جدول نسبت به مقدار مصالح هدف (ریزدانه یا درشت دانه) می باشد. به عنوان مثال، در طرح آزمایش با نام 25CASS+50FASS، ۲۵ درصد مصالح درشت و ۵۰ درصد مصالح ریزدانه با سرباره جایگزین شده است.

در این پژوهش، برای بررسی تأثیر سرباره ریز و درشت در عملکرد مخلوط های آسفالتی طبق طرح آزمایشی که در ادامه شرح داده شده است، از ۹ مخلوط مختلف بر اساس جدول ۵ استفاده شده است. در این جدول، عبارت CASS^۱ برای نشان دادن سرباره درشت دانه (رد شده از الک ۳/۴ و مانده روی الک ۴) و FASS^۲ برای نشان دادن

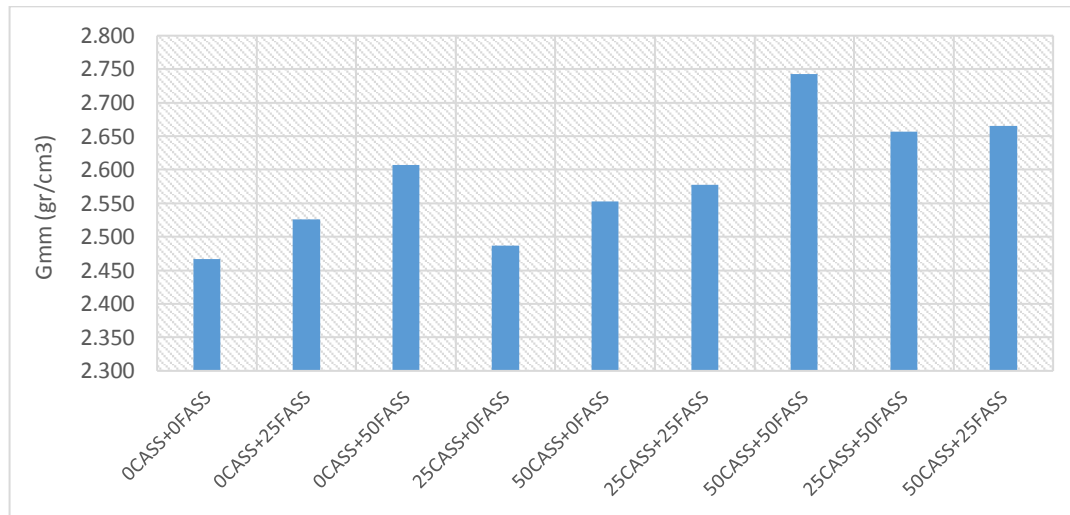
جدول ۵. طرح آزمایش تحقیق

نام مخلوط	درصد سرباره ریز	درصد سرباره درشت
0CASS+0FASS	۰	۰
0CASS+25FASS	*۲۵	۰
0CASS+50FASS	۵۰	۰
25CASS+0FASS	۰	۲۵
50CASS+0FASS	۰	۵۰
25CASS+25FASS	۲۵	۲۵
50CASS+50FASS	۵۰	۵۰
25CASS+50FASS	۵۰	۲۵
50CASS+25FASS	۲۵	۵۰

* منظور از ۲۵ درصد این است که ۲۵ درصد از مصالح سنگی ریزدانه با مصالح سرباره ریزدانه جایگزین شده است. در سایر اعداد نیز به همین ترتیب عمل شده است.

نمونه شاهد ساخته شدند. برای ساخت نمونه‌ها از دستگاه ژیراتوری استفاده شده است. قبل از ساخت نمونه‌ها وزن مخصوص حداکثر مخلوط‌های ۹ گانه مورد استفاده در تحقیق بر اساس شکل ۲ به وسیله آزمایش رایس تعیین شد و وزن مخصوص حداکثر برداشت شده در تراکم نمونه‌ها با استفاده از دستگاه ژیراتوری استفاده شد.

قیر بهینه نمونه بدون افزودنی با استفاده از روش مارشال برابر ۵/۴ به دست آمد. از طرفی، همان‌گونه که در بخش قبل گفته شد، با توجه به نتایج تحقیق کاووسی و قاضی زاده (۲۰۱۴)، مقدار قیر بهینه با تغییر مقدار سرباره از صفر تا ۵۰ درصد تغییر بسیار کمی دارد. با در نظر گرفتن این نتایج و همچنین رواداری‌های نشریه ۲۳۴ کشور، نمونه‌های تغییر یافته نیز بر اساس درصد قیر بهینه



شکل ۲. نتایج آزمایش وزن مخصوص حداکثر برای نمونه‌های مورد استفاده

آزمایش مدول برجهنگی اصولاً یک آزمایش غیرمستقیم است که بر اساس آیین‌نامه ASTM D4123 و با استفاده از دستگاه UTM5 انجام می‌شود. خروجی این آزمایش، مدول برجهنگی مورد نیاز برای محاسبات ضخامت روسازی را ارائه می‌کند. این آزمایش با اعمال بار ۴۰۰ نیوتنی به صورت نیمه‌سینوسی و با ۰/۵ ثانیه بارگذاری و ۱/۵ ثانیه باربرداری انجام شده است.

۲-۵-۳. آزمایش کشش غیرمستقیم و حساسیت رطوبتی

متداول‌ترین آزمایش برای تعیین حساسیت رطوبتی مخلوط‌های آسفالتی، استفاده از روش لاتمن اصلاح شده بر اساس آیین‌نامه AASHTO T283 می‌باشد. در این روش، ابتدا نمونه‌هایی با درصد فضای خالی بین ۶ تا ۸

۲-۵-۵. آزمایش‌ها

۲-۵-۱. آزمایش مقاومت مارشال

استقامت مارشال به‌طور چشم‌گیری با زاویه اصطکاک داخلی^۱ مصالح و ویسکوزیته قیر در دمای ۶۰ درجه سلسیوس تحت تأثیر قرار می‌گیرد. استقامت مارشال به‌وسیله آزمایش مقاومت مارشال طبق آیین‌نامه ASTM D 1559 به دست می‌آید. این آزمایش توسط آیین‌نامه MS-2 برای نمونه‌های حاوی اصلاح‌کننده پلیمری غیرمجاز اعلام شده است و بیشتر برای تعیین قیر بهینه نمونه‌های آسفالتی با روش مارشال متداول است. اما استفاده از این آزمایش به‌صورت کلی برای بررسی مقدار مقاومت مخلوط کاربرد زیادی دارد.

۲-۵-۲. آزمایش مدول برجهنگی

^۱ - Angle of internal friction

مربوط به هر آزمایش شامل آزمایش های مدول برجهنگی، کشش غیرمستقیم (در دو حالت تر و خشک) و آزمایش مقاومت مارشال می باشد. مدل استفاده شده با نام طراحی مرکب مرکزی مدل درجه دو^۲ است که علاوه بر در نظر گرفتن دو پارامتر اصلی برهمکنش دو پارامتر بر هم، درجه دو پارامتر را نیز مد نظر قرار داده است. برای آزمایش های در نظر گرفته شده، در مجموع ۱۲۰ فرآیند (۳ بار تکرار برای هر مورد و ۶ بار تکرار برای نقطه مرجع) در نظر گرفته شده است تا از خطای سیستماتیک جلوگیری شود (۹ مخلوط در نظر گرفته شده در جدول ۵ مشخص شده است). محاسبات با فرض A به عنوان پارامتر ریزدانه و B به عنوان پارامتر درشت دانه صورت پذیرفته است.

۳. نتایج

۳-۱. مدول برجهنگی

کانتور مدول برجهنگی برحسب مقدار ریزدانه به درشت دانه در شکل ۳ نشان داده شده است. همان گونه که از نمودار برمی آید، مقدار مدول برجهنگی با افزایش مقدار درشت دانه و ریزدانه به صورت خطی افزایش پیدا می کند؛ هرچند تأثیر سرباره به صورت درشت دانه به شکل غیرخطی نیز بر مدول برجهنگی اثرگذار است. مقدار P value برای مدل بیانگر آن است که کمتر از ۰/۰۱ درصد احتمال دارد که این مدل به دلیل خطای آزمایشگاهی شکل گرفته باشد. همان طور که در جدول ۶ نیز نشان داده شده است، رفتار خطی ریزدانه و درشت دانه و همچنین تأثیر توان دو درشت دانه بر متغیر پاسخ تأثیرگذارند. مقدار بیش برآزش در مدل زیر، ۰/۴۵ می باشد که نشان دهنده آن است که خطای بیش برآزش در مقایسه با خطای خالص تعریف شده در مدل ناچیز است. همچنین Pred R-Squared برابر با ۰/۹۲۳۳ دارای تطابق مناسب با عدد ۰/۹۵۱۳ به عنوان Adj R-Squared دارد.

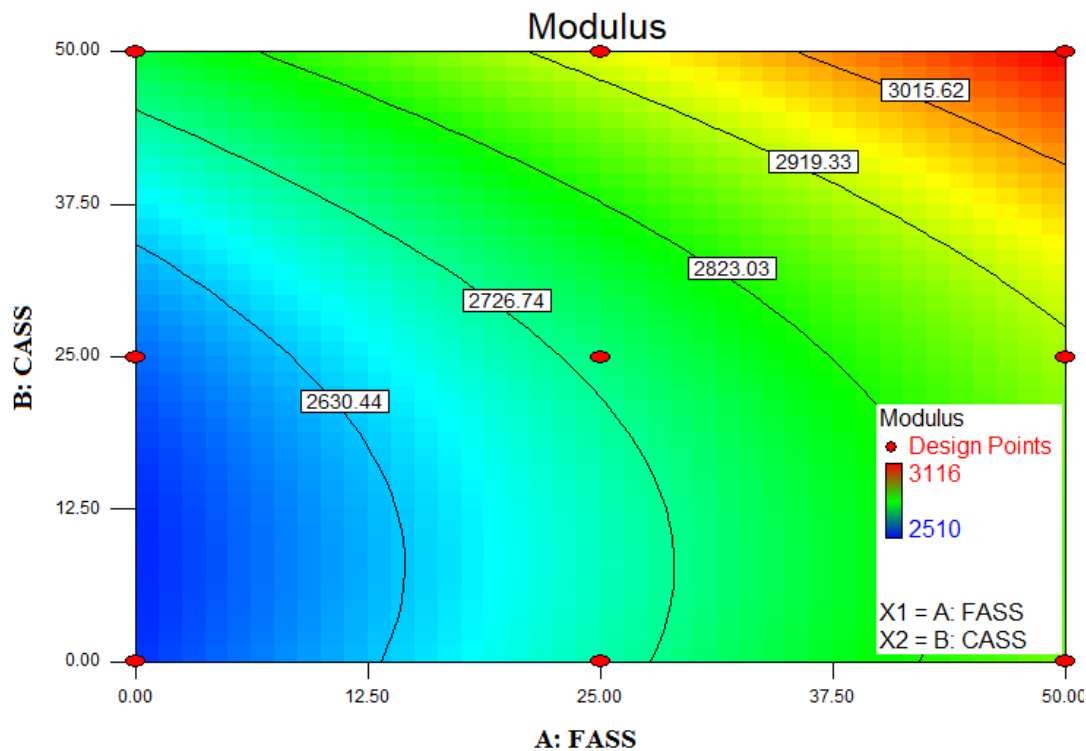
درصد (در این تحقیق ۷ درصد در نظر گرفته شده است) با استفاده از دستگاه تراکم ژیراتوری در دو سری ساخته می شود. سپس، مقاومت کششی غیرمستقیم نمونه های سری اول به صورت خشک (در دمای ۲۵ درجه سلسیوس) و مقاومت کششی غیرمستقیم نمونه های سری دوم به صورت تر (نمونه ها بعد از اشباع به وسیله پمپ خلا، ۱۶ ساعت در دمای ۱۸- قرار گرفته و سپس ۲۴ ساعت در دمای ۶۰ درجه قرار می گیرند و در نهایت در دمای ۲۵ درجه سلسیوس مورد تست قرار می گیرند) مورد سنجش قرار می گیرند و در نهایت از تقسیم مقاومت کششی غیرمستقیم تر به مقاومت کششی غیرمستقیم خشک پارامتری به نام TSR به دست می آید که این پارامتر نشان دهنده مقدار حساسیت رطوبتی مخلوط آسفالتی مورد نظر است.

۲-۶. روش پاسخ سطح

روش پاسخ سطح (RSM) مجموعه ای از تکنیک های ریاضی و آماری به منظور یافتن تخمینی منطقی از عملکردهای پاسخ، تحت متغیرهای مستقل است. این روش، برای ایجاد ارتباط و تناسب بین متغیرهای مستقل و پاسخ، برای عملکرد بهینه به کار رفته است (مونتگمری، ۲۰۱۷؛ صفری و همکاران، ۲۰۱۸). در این روش، با استفاده از مجموعه ای از آزمایش ها، به طور آگاهانه تغییری در متغیرهای ورودی فرآیند ایجاد می شود و از طریق بررسی میزان تغییرات در پاسخ خروجی، حساسیت پاسخ به متغیر ورودی مورد بررسی قرار می گیرد. در این تحقیق، برای تجزیه و تحلیل و بهینه سازی داده های آزمایشگاهی از طرح CCD^۱ با استفاده از نرم افزار Design Expert استفاده شده است. اثر دو متغیر شامل درصد سرباره ریز و درصد سرباره درشت در مخلوط به عنوان متغیرهای اصلی در نظر گرفته شده است و متغیرهای پاسخ در واقع نتایج

^۲- Quadratic

^۱- Central Composite Design



شکل ۳. کانتورهای مدول برجهندگی ریزدانه (A) در برابر درشتدانه (B)

جدول ۶. جدول واریانس برای مدول برجهندگی

ANOVA for Response Surface Reduced Quadratic Model				
Analysis of variance table [Partial sum of squares - Type III]				
Source	Sum of Squares	F Value	p-value	
Model	270268.3	66.13	< 0.0001	Significant
A-FASS	166000.7	121.85	< 0.0001	
B-CASS	83959.88	61.63	0.0001	
B ²	20307.8	14.91	0.0062	
Residual	9535.98			
Lack of Fit	5068.58	0.454	0.7940	not significant

R-Squared	0.965	Pred R-Squared	0.9233
Adj R-Squared	0.951	Adeq Precision	25.576

درشتدانه از صفر تا ۵۰ درصد مدول برجهندگی به صورت غیرخطی افزایش پیدا می کند. ضریب منفی رفتار خطی درشتدانه و ضریب مثبت رفتار غیرخطی آن نشان از آن دارد که در درصدهای جایگزینی بیشتر، میزان افزایش مدول برجهندگی نیز بیشتر است. همان گونه که در جدول ۶ نیز دیده شد، تأثیر تغییرات درصد درشتدانه

فرمول نهایی به شکل زیر خواهد بود:

$$\begin{aligned} \text{Modulus} &= (86.29 \times B^2) + (118.29 \times B) \\ &+ (116.33 \times A) \\ &+ 2741 \end{aligned} \quad (1)$$

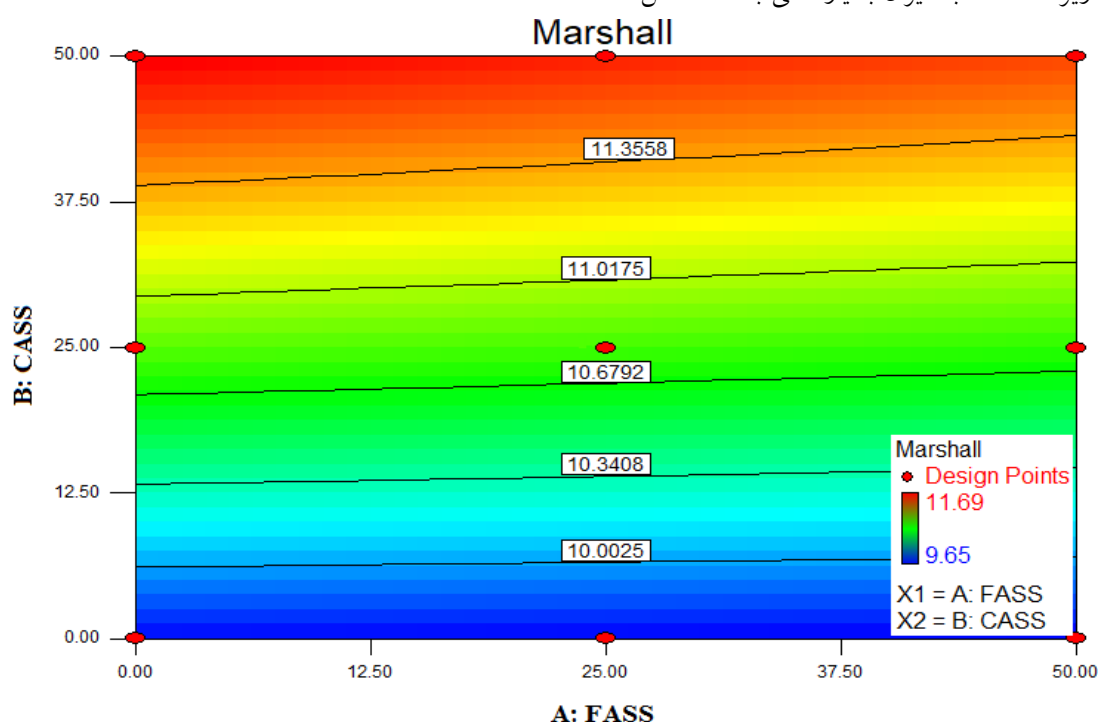
نمودار شکل ۳ و همچنین معادله ارائه شده برای مدول برجهندگی نشان می دهد که با افزایش درصد

مقاومت مارشال می گردد. همچنین، برهمکنش پارامتر A و پارامتر B نشان از آن دارد که با افزایش مقدار برهمکنش، مقاومت مارشال نیز کاهش خواهد یافت؛ هرچند میزان این کاهش بسیار اندک می باشد. این در حالی است که روند پارامتر B نشان از دارد که با افزایش مقدار این پارامتر متغیر پاسخ افزایش خواهد یافت؛ هرچند شیب این تغییرات رفته رفته با توجه به ضریب منفی رفتار غیرخطی پارامتر B ملایم تر خواهد بود (روند بیان شده در معادله ارائه شده برای مقاومت مارشال نیز کاملاً مشخص است).

به صورت خطی و غیرخطی می باشد. این در حالی است که تأثیر تغییرات مقدار ریزدانه بر روی مدول برجهنگی به صورت خطی بوده و با افزایش آن مدول برجهنگی نیز افزایش پیدا می کند.

۲-۳. مقاومت مارشال

نتایج آزمایش مارشال برحسب درصد ریزدانه و درشت-دانه در شکل ۴ و جدول ۷ ارائه شده است. همان گونه که از این شکل مشخص است، پارامتر A که نشان دهنده تغییرات ریزدانه است به میزان بسیار کمی باعث کاهش



شکل ۴. کانتورهای مقاومت مارشال ریزدانه (A) در برابر درشتدانه (B)

جدول ۷. جدول آنالیز واریانس برای مقاومت مارشال

ANOVA for Response Surface Reduced Quadratic Model			
Analysis of variance table [Partial sum of squares - Type III]			
Source	Sum of Squares	F Value	p-value
Model	5.7260	2284.86	< 0.0001
A-FASS	0.01215	19.39	0.0046
B-CASS	5.6454	9010.69	< 0.0001
AB	0.00422	6.74	0.0408
B ²	0.06428	102.61	< 0.0001
Residual	0.00376		
Lack of Fit	0.00356	8.867	0.1039

فرمول نهایی به شکل زیر خواهد بود:

$$\text{Marshall} = (-0.15 \times B^2) - (0.032 \times A \times B) + (0.97 \times B) - (0.045 \times A) + 10.8 \quad (2)$$

پارامتر A مقدار DITS (مقاومت کششی غیرمستقیم خشک) نیز افزایش پیدا می کند. هرچند تأثیر منفی رفتار غیرخطی پارامتر A نشان از آن دارد که این تأثیر در درصدهای بیشتر با شیب کمتری ادامه پیدا می کند. این در حالی است که تأثیر پارامتر B بر متغیر پاسخ غیرخطی بوده و با افزایش آن مقدار متغیر پاسخ افزایش پیدا می کند و سپس تأثیر آن منفی بوده و باعث کاهش مقدار متغیر پاسخ می شود. برهمکنش مثبت رفتار درجه دو B و رفتار خطی پارامتر A و همچنین رفتار خطی پارامتر B و رفتار غیرخطی پارامتر A نشان از آن دارد که در درصدهای بیشتر پارامتر A تأثیر رفتار غیرخطی پارامتر B بر دامنه ی نوسانات مقدار متغیر پاسخ کمتر می شود. به عبارت دیگر، تأثیر مثبت و منفی پارامتر B به درصد مورد استفاده پارامتر A بستگی داشته و با افزایش مقدار پارامتر A میزان این تأثیر نیز کم رنگ تر می گردد.

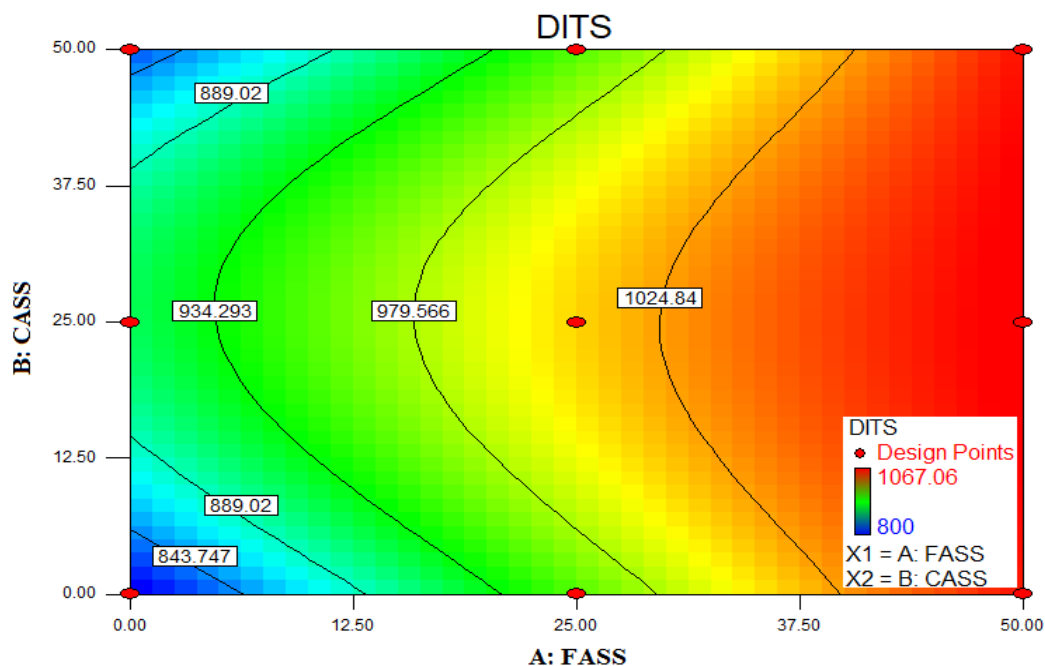
۳-۳. مقاومت کشش غیرمستقیم

الف) مقاومت خشک

نتایج مربوط به مقاومت کششی غیرمستقیم خشک در جدول ۸ و شکل ۵ نشان داده شده است. همچنین، مدل ریاضی مربوط به مقاومت کششی غیرمستقیم خشک در معادله (۳) ارائه شده است. همان گونه که از جدول ۸ برمی آید، مقدار P value مدل کمتر از ۰/۰۰۰۱ می باشد که نشان از معتبر بودن مدل دارد. از طرفی، با توجه به مدل ریاضی و شکل ۵، مشاهده می شود که با افزایش مقدار

جدول ۸. آنالیز واریانس مقاومت کششی غیرمستقیم خشک

ANOVA for Response Surface Reduced Quadratic Model			
Analysis of variance table [Partial sum of squares - Type III]			
Source	Sum of Squares	F Value	p-value
Model	85204.74	520.728	< 0.0001
A-FASS	12444.11	456.312	< 0.0001
AB	197.12	7.228	0.0547
A ²	983.06	36.047	0.0039
B ²	7436.24	272.678	< 0.0001
A ² B	214.91	7.880	0.0485
AB ²	2742.16	100.55	0.0006
Residual	109.08		
Lack of Fit	64.80	1.463	0.4060



شکل ۵. کانتورهای مقاومت کششی غیرمستقیم خشک ریزدانه (A) در برابر درشت دانه (B)

است، WITS (مقاومت کششی غیرمستقیم تر) به رفتار خطی پارامتر A و رفتار غیرخطی پارامتر B وابستگی قابل توجهی دارد. همچنین، برهمکنش پارامترهای دخیل بر متغیر پاسخ اثرگذار است. روند پارامتر A در شکل ۶ نشان از آن دارد که با افزایش مقدار آن، مقاومت کششی غیرمستقیم تر نهایی بیشتر خواهد شد. همچنین، روند پارامتر B نشان از آن دارد که در درصدهای بیشتر، تأثیر پارامتر B منفی بوده و باعث کاهش مقاومت کششی غیرمستقیم تر نهایی خواهد شد. علامت مثبت برهمکنش رفتار خطی پارامتر A و رفتار غیرخطی پارامتر B نشان از آن دارد که در درصدهای بیشتر پارامتر A، تأثیر کاهش پارامتر B بر متغیر پاسخ کمتر خواهد بود.

فرمول نهایی به شکل زیر خواهد بود:

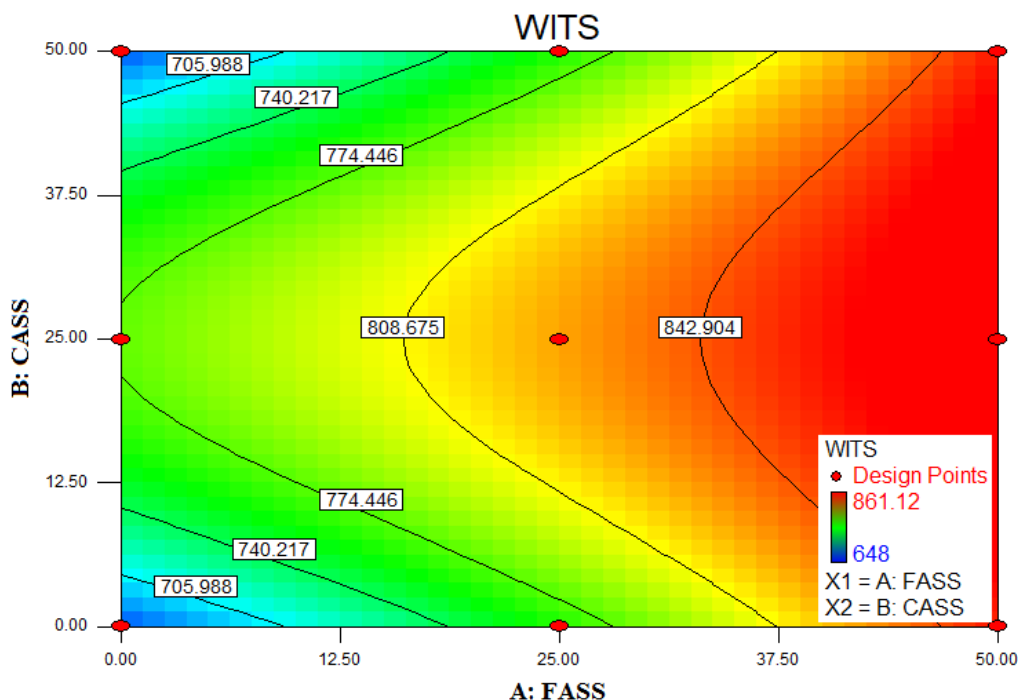
$$\begin{aligned}
 \text{DITS} &= (-19.70 \times A^2) - (54.18 \times B^2) \\
 &+ (7.33 \times A^2 \times B) + (45.35 \times A \times B^2) \\
 &- (7.02 \times A \times B) + (78.88 \times A) \\
 &+ 1010.93
 \end{aligned} \quad (3)$$

(ب) مقاومت کششی غیرمستقیم تر

نتایج مربوط به مقاومت کششی غیرمستقیم تر در جدول ۹ و شکل ۶ نشان داده شده است. همان گونه که از جدول ۹ برمی آید، مانند مقاومت کششی غیرمستقیم خشک، مقدار P value مدل کمتر از ۰/۰۰۰۱ می باشد که نشان از معتبر بودن مدل دارد. همان گونه که در مدل مشخص

جدول ۹. جدول آنالیز واریانس مقاومت کششی غیرمستقیم تر

ANOVA for Response Surface Reduced Quadratic Model			
Analysis of variance table [Partial sum of squares - Type III]			
Source	Sum of Squares	p-value	
Model	49549.38	< 0.0001	significant
A-FASS	5095.451	0.0042	
B ²	10959.44	0.0005	
AB ²	2244.888	0.0279	
Residual	2054.739		
Lack of Fit	2035.992	0.0227	significant



شکل ۶. کانتورهای مقاومت کششی غیرمستقیم تر ریزدانه (A) در برابر درشت دانه (B)

ریاضی ارائه شده در معادله (۵) نیز برمی آید، پارامترهای A و B به صورت خطی و غیرخطی بر متغیر پاسخ تأثیرگذارند. بدین ترتیب که با افزایش مقدار پارامتر A، متغیر پاسخ افزایش می یابد؛ هرچند رفتار غیرخطی آن نشان از آن دارد که در درصدهای بیشتر، این روند شکلی معکوس خواهد گرفت. لیکن، با توجه به داده های موجود در بازه های مورد نظر و ضریب کمتر تأثیرگذاری، رفتار غیرخطی آن نمایش داده نشده است. لیکن، در مورد پارامتر B این رفتار سهموی به وضوح قابل مشاهده است.

فرمول نهایی به شکل زیر خواهد بود:

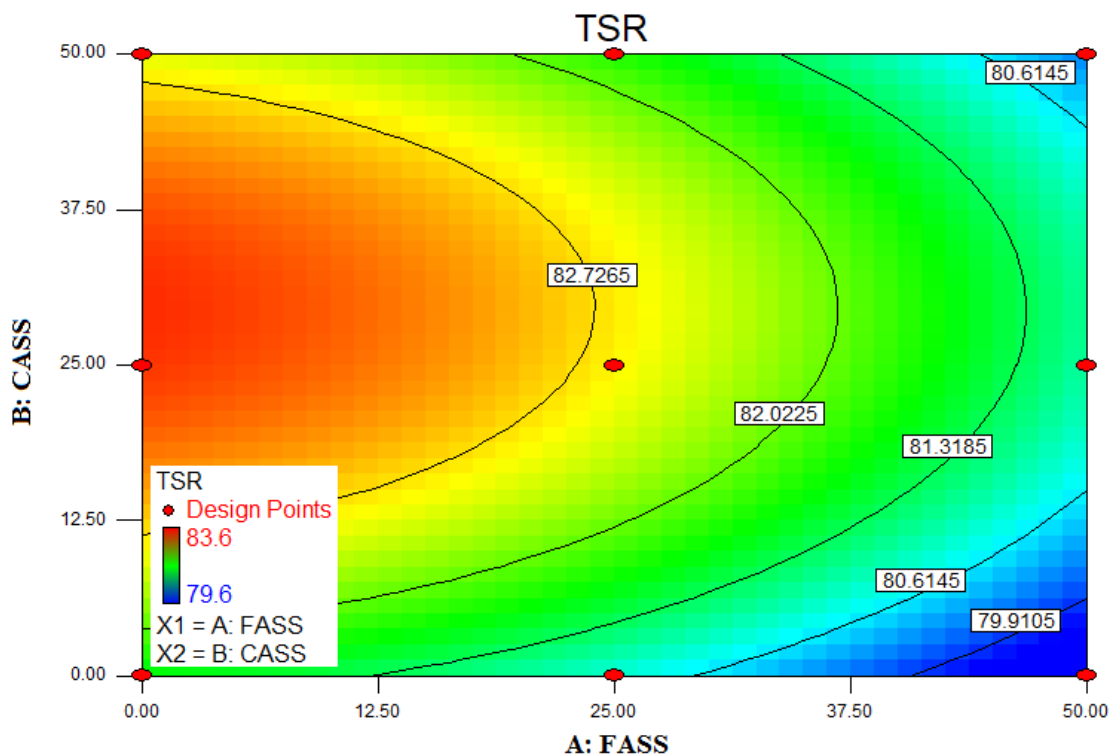
$$\begin{aligned} \text{WITS} &= (-63.39 \times B^2) + (41.03 \times A \times B^2) \\ &+ (50.48 \times A) \\ &+ 826.66 \end{aligned} \quad (۴)$$

۳-۴. حساسیت رطوبتی

نتایج مربوط به حساسیت رطوبتی یا همان پارامتر TSR که از تقسیم مقاومت کششی غیرمستقیم تر به مقاومت کششی غیرمستقیم خشک به دست آمده است در جدول ۱۰ و شکل ۷ نشان داده شده است. همان گونه که از مدل

جدول ۱۰. نتایج آنالیز واریانس پارامتر TSR

ANOVA for Response Surface Reduced Quadratic Model			
Analysis of variance table [Partial sum of squares - Type III]			
Source	Sum of Squares	F Value	p-value
Model	15.97	56.61	< 0.0001
A-FASS	8.4017	119.13	< 0.0001
B-CASS	1.4017	19.876	0.0043
A ²	0.4696	6.658	0.0417
B ²	4.4848	63.59	0.0002
Residual	0.4231		
Lack of Fit	0.4049	11.12	0.0842



شکل ۷. کانتورهای پارامتر TSR ریزدانه (A) در برابر درشتدانه (B)

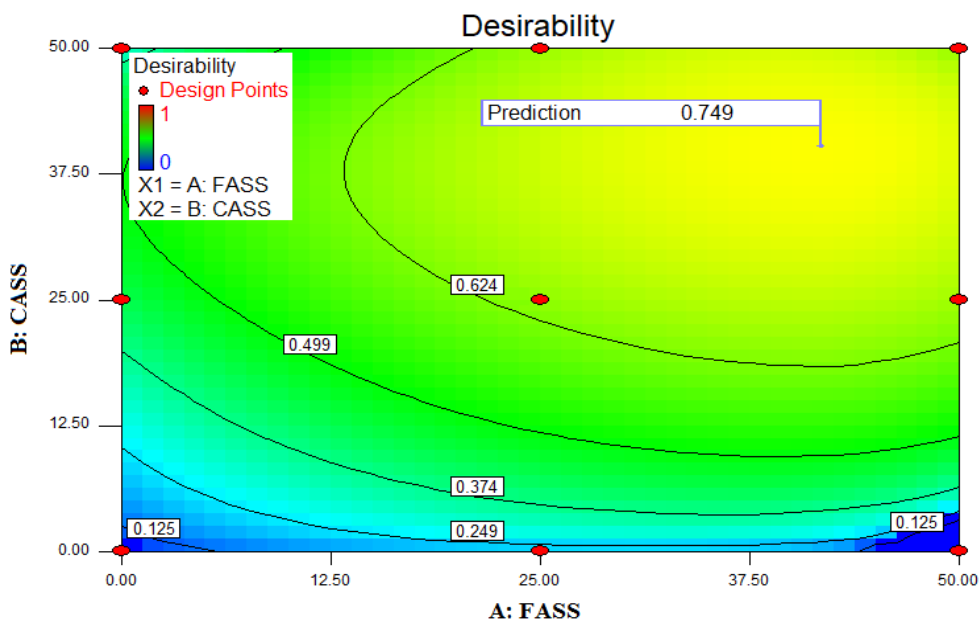
پاسخ برای آزمایش های مدول برجهنگی، کشش غیرمستقیم تر و خشک، حساسیت رطوبتی و مقاومت مارشال، پاسخ بهینه برای میزان استفاده از سرباره ریزدانه (پارامتر A) و سرباره درشتدانه (پارامتر B) به شرح شکل ۸ است. بهینه ترین پاسخ، با توجه به محاسبات صورت گرفته، به شرح جدول ۱۱ می باشد.

فرمول نهایی به شکل زیر خواهد بود:

$$TSR = (-1.33 \times B^2) - (0.43 \times A^2) - (1.18 \times A) + (0.48 \times B) + 82.63 \quad (5)$$

۳-۵. بهینه یابی

با در نظر گرفتن پارامترهای بیان شده در جداول و نمودارهای قبل بر اساس فرض بیشینه شدن متغیرهای



شکل ۸. کانتورهای محاسبه مقدار بهینه ریزدانه (A) در برابر درشتدانه (B)

جدول ۱۱. بهینه‌یابی پارامترها

FASS	CASS	Modulus	WITS	DITS	TSR	Marshall	Desirability	
41.73	40.29	2956.92	847.00	1045.129	81.44	11.29	0.74	Selected

۴. نتیجه‌گیری

افزایش مقدار درشت‌دانه مقدار مقاومت مارشال

بیشتر افزایش یافته بود.

- نتایج مقاومت کششی غیرمستقیم نیز نشان از رفتار غیرخطی ریزدانه و درشت‌دانه داشت و افزایش مقدار ریزدانه تأثیر بیشتری بر مقاومت کششی هم در حالت تر و هم در حالت خشک داشت. همچنین، برهمکنش این دو نیز بر متغیر پاسخ اثرگذار بود.

- نتایج آزمایش حساسیت رطوبتی با پارامتر TSR نیز نشان از رفتار خطی و غیرخطی در اثر افزوده شدن سرباره ریزدانه و درشت‌دانه بر متغیر پاسخ داشت.

- بهینه‌یابی پاسخ تمامی آزمایش‌های این پژوهش نیز به صورت کامل در شکل ۸ ارائه شد که مقدار بهینه ترکیب ریزدانه و درشت‌دانه را شرح داد.

در این پژوهش، به بررسی تأثیر جایگزینی سرباره در ابعاد ریزدانه و درشت‌دانه و بررسی ترکیبات مختلف از این جایگزینی با استفاده از روش پاسخ سطح پرداخته شد. برای این کار، از آزمایش‌های مدول برجهندگی، کشش غیرمستقیم، حساسیت رطوبتی و مقاومت مارشال استفاده گردید. نتایج اصلی این تحقیق به شرح زیر می‌باشد:

- نتایج آزمایش مدول برجهندگی نشان داد که استفاده از سرباره ریزدانه و درشت‌دانه باعث افزایش مدول برجهندگی شده، با این تفاوت که ریزدانه رفتاری خطی و درشت‌دانه رفتاری خطی و غیرخطی داشت.

- نتایج آزمایش مقاومت مارشال نیز نشان از تأثیر کم ریزدانه و تأثیر بیشتر درشت‌دانه داشت و با

۵. مراجع

- عموزاده عمرانی، م. و حصیرچیان، م. ۱۳۹۹. "بررسی اثر سرباره فولاد و مصالح خرده آسفالتی بر خصوصیات مکانیکی و آلاینده‌ی روسازی بتن غلتکی". مهندسی زیرساخت‌های حمل و نقل، ۶(۳): ۸۷-۱۰۸.
- عامری، ا.، عامری، م.، شاکر، ح. و کرم‌رودی، م. ۱۳۹۹. "ارزیابی آزمایشگاهی خصوصیات رئولوژیکی و فیزیکی قیر اصلاح‌شده با پودر لاستیک و پلیمر EVA". مهندسی زیرساخت‌های حمل و نقل، ۶(۳): ۱۲-۱.
- Amelian, S., Manian, M., Abtahi, S. M. and Goli, A. 2018. "Moisture sensitivity and mechanical performance assessment of warm mix asphalt containing by-product steel slag". J. Clean. Prod., 176: 329-337.
- Ameri, M., Nemati, M. and Shaker, H. 2019. "Experimental and numerical investigation of the properties of the hot mix asphalt concrete with basalt and glass fiber". Frattura ed Integrità Strutturale, 13(50): 149-162.
- Ameri, A., Ameri, M., Shaker, H. and Karamroudi, M. 2020a. "Laboratory evaluating of physical and rheological properties of modified bitumen containing crumb rubber and EVA". J. Transport. Infrastruct. Eng., 6(3): 1-12.
- Ameri, M., Shaker, H., Badarloo, B. and Jafari, F. 2020b. "Numerical and experimental investigation on the modified of hot mix asphalt concrete containing crumb rubber and waste pet". Tehnički Vjesnik, 27(4): 1186-1193.
- Arabani, M. and Azarhoosh, A. R. 2012. "The effect of recycled concrete aggregate and steel slag on the dynamic properties of asphalt mixtures". Constr. Build. Mater., 35: 1-7.
- Behiry, A. E. A. E. M. 2013. "Laboratory evaluation of resistance to moisture damage in asphalt mixtures". Ain Shams Eng. J., 4(3): 351-363.
- Chen, Z., Wu, S., Wen, J., Zhao, M., Yi, M. and Wan, J. 2015. "Utilization of gneiss coarse aggregate and steel slag fine aggregate in asphalt mixture". Constr. Build. Mater., 93: 911-918.

- Fakhri, M. and Ahmadi, A. 2017. "Evaluation of fracture resistance of asphalt mixes involving steel slag and RAP: Susceptibility to aging level and freeze and thaw cycles". *Constr. Build. Mater.*, 157: 748-756.
- Farazmand, P., Hayati, P., Shaker, H. and Rezaei, S. 2020. "Relationship between microscopic analysis and quantitative and qualitative indicators of moisture susceptibility evaluation of warm-mix asphalt mixtures containing modifiers". *Frattura ed Integrità Strutturale*, 14(51): 215-224.
- Gao, J., Sha, A., Wang, Z., Tong, Z. and Liu, Z. 2017. "Utilization of steel slag as aggregate in asphalt mixtures for microwave deicing". *J. Clean. Prod.*, 152: 429-442.
- Goli, H., Hesami, S. and Ameri, M. 2017. "Laboratory evaluation of damage behavior of warm mix asphalt containing steel slag aggregates". *J. Mater. Civ. Eng.*, 29(6): 04017009.
- Kavussi, A. and Qazizadeh, M. J. 2014. "Fatigue characterization of asphalt mixes containing electric arc furnace (EAF) steel slag subjected to long term aging". *Constr. Build. Mater.*, 72: 158-166.
- Kim, K., Jo, S. H., Kim, N. and Kim, H. 2018. "Characteristics of hot mix asphalt containing steel slag aggregate according to temperature and void percentage". *Constr. Build. Mater.*, 188: 1128-1136.
- Montgomery, D. C. 2017. "Design and analysis of experiments". John Wiley and Sons, N. Y.
- Oluwasola, E. A., Hainin, M. R. and Aziz, M. M. A. 2015. "Evaluation of asphalt mixtures incorporating electric arc furnace steel slag and copper mine tailings for road Construction. *Transport. Geotech.*, 2: 47-55.
- Pasetto, M. and Baldo, N. 2010. "Experimental evaluation of high performance base course and road base asphalt concrete with electric arc furnace steel slags". *J. Hazard. Mater.*, 181(1-3): 938-948.
- Phan, T. M., Park, D. W. and Le, T. H. M. 2018. "Crack healing performance of hot mix asphalt containing steel slag by microwaves heating". *Constr. Build. Mater.*, 180: 503-511.
- Qazizadeh, M. J., Farhad, H., Kavussi, A. and Sadeghi, A. 2018. "Evaluating the fatigue behavior of asphalt mixtures containing electric arc furnace and basic oxygen furnace slags using surface free energy estimation". *J. Clean. Prod.*, 188: 355-361.
- Safari, J., Mirzaei, M., Rooholamini, H. and Hassani, A. 2018. "Effect of rice husk ash and macro-synthetic fibre on the properties of self-compacting concrete". *Constr. Build. Mater.*, 175: 371-380.
- Ziaee, S. A. and Behnia, K. 2020. "Evaluating the effect of electric arc furnace steel slag on dynamic and static mechanical behavior of warm mix asphalt mixtures". *J. Clean. Prod.*, 274: 123092.
- Ziaee, S. A., Kavussi, A., Jalili Qazizadeh, M. and Mohammadzadeh Moghadam, A. 2015. "Evaluation of long term ageing of asphalt mixtures containing EAF and BOF steel slags". *Int. J. Transport. Eng.*, 2(3): 245-265.

