

مدلسازی مقاومت فشاری بتن غلتکی روسازی حاوی خرده آسفالت بازیافتی با استفاده از روش سطح پاسخ (RSM)

علیرضا غنی زاده*

استادیار بخش مهندسی عمران، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی سیرجان

محمد کریمی گوغری

دانش آموخته کارشناسی ارشد دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

امیر توانا املشی

دانش آموخته کارشناسی ارشد دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی سیرجان، سیرجان، ایران

چکیده

مصالح خرده آسفالتی که به عنوان مصالح نخاله‌ای حاصل از بازسازی و تراش رویه‌های آسفالتی شناخته می‌شوند، بخش عمده‌ای از مصالح دورریز را تشکیل می‌دهند. یکی از کاربردهایی که به تازگی مورد توجه قرار گرفته است، استفاده از این مصالح (RAP) در مخلوط‌های سیمانی از جمله بتن غلتکی روسازی است. به همین منظور در تحقیق حاضر، پس از انجام مطالعات آزمایشگاهی و ساخت ۱۴۱ نمونه بتن، ۴۷ داده منحصر به فرد مربوط به مقاومت فشاری بتن غلتکی حاوی خرده آسفالت بازیافتی به دست آمد. سپس با استفاده از روش سطح پاسخ (RSM) به ساخت مدلی جهت پیش‌بینی مقاومت فشاری پرداخته شد. مقدار ضریب رگرسیون مدل توسعه داده شده برابر با ۰/۹۶۶۸ به دست آمد که نشان‌دهنده دقت بالای این مدل است. مدل به دست آمده نشان داد که علاوه بر تمامی متغیرهای اولیه به غیر از ریزدانه طبیعی، برهم‌کنش میان سیمان و خرده آسفالت ریزدانه، برهم‌کنش میان درشت‌دانه طبیعی و زمان عمل‌آوری، برهم‌کنش میان خرده آسفالت ریزدانه و زمان عمل‌آوری و همچنین برهم‌کنش مجذور زمان عمل‌آوری و مجذور دما نیز می‌تواند در پیش‌بینی مقادیر مقاومت فشاری تأثیرگذار باشد. همچنین با توجه به نتایج تحلیل حساسیت مدل، مشاهده شد که مقدار مقاومت فشاری با افزایش مقدار سیمان افزایش خواهد یافت به طوری که با افزایش مقدار خرده آسفالت ریزدانه نرخ افزایش مقاومت کاهش می‌یابد. به علاوه کاهش مقدار خرده آسفالت ریزدانه یا افزایش زمان عمل‌آوری در یک میزان درشت‌دانه طبیعی ثابت، افزایش مقاومت فشاری را در پی خواهد داشت. همچنین ملاحظه گردید که با افزایش درصد خرده آسفالت ریزدانه، تأثیر زمان عمل‌آوری بر روی مقاومت فشاری کاهش می‌یابد.

واژه‌های کلیدی: بتن غلتکی روسازی، مصالح خرده آسفالتی، مدل‌سازی، مقاومت فشاری، روش سطح پاسخ (RSM).

۱- مقدمه

مشخصات طاقت این مخلوط‌ها می‌شود. بررسی تأثیر الیاف‌های پلی‌پروپیلن [۸]، لاستیک ضایعاتی و دوده سیلیس [۹]، ضایعات زغال‌سنگ و پودر سنگ‌آهک به‌عنوان جایگزین سیمان [۱۰]، سرباره کوره [۱۱]، میکرو الیاف [۱۲] و پودر شیشه [۱۳] بر خصوصیات مکانیکی بتن‌های غلتکی از جمله جدیدترین تحقیقات صورت گرفته در این زمینه‌اند. امروزه به دلایل زیست‌محیطی بازیافت مواد زائد و استفاده مجدد آن‌ها مورد توجه بسیاری از پژوهشگران قرار گرفته است. مصالح خرده آسفالتی بازیافتی که به‌عنوان مصالحی نخاله‌ای حاصل از بازسازی و تراش رویه‌های آسفالتی شناخته می‌شوند، بخش اعظمی از مصالح دورریز را تشکیل می‌دهند. همه‌ساله در حدود ۱۰۰ میلیون تن خرده آسفالت بازیافتی در کشور آمریکا از بازسازی جاده‌ها تولید می‌شود. با توجه به خواصی که از این مصالح گزارش شده است، تاکنون راه‌کارهای گوناگونی جهت استفاده مجدد از این مصالح پیشنهاد شده است. یکی از کاربردهایی که به‌تازگی مورد توجه قرار گرفته است، استفاده از مصالح خرده آسفالتی در مخلوط‌های سیمانی از جمله بتن غلتکی است. تحقیقات انجام شده نشان‌دهنده‌ی بهبود طاقت در این مخلوط‌هاست [۱۴]. در همین راستا هانگ و همکاران (۲۰۰۵) تأثیر استفاده از خرده آسفالت بازیافتی در مخلوط‌های بتن معمولی به دلیل منافع زیست‌محیطی و تأثیر مثبت احتمالی آن بر خواص مخلوط از جمله طاقت و کاهش شکست ترد را مورد بررسی قرار دادند. نتایج حاصل از مقاومت فشاری، پیش‌بینی هانگ مبنی بر کاهش احتمالی مقاومت مخلوط را اثبات نمود. همین‌طور نتایج آزمون طاقت، افزایش شاخص طاقت را در مخلوط‌های دارای خرده آسفالت نشان داد [۱۴]. مدرس و حسینی (۲۰۱۴) با جای‌گزینی ۳ و ۵ درصدی خاکستر پوسته برنج به‌جای سیمان در بتن غلتکی حاوی مصالح آسفالتی معمولی و بازیافت شده، دریافتند که افزودن مصالح خرده آسفالتی با ابعاد مختلف، درصد رطوبت بهینه و وزن مخصوص خشک را کاهش خواهد داد. همین‌طور مشاهده شد که انعطاف‌پذیری مصالح با جای‌گزینی ۳ درصدی خاکستر افزایش می‌یابد. میزان جذب انرژی نیز با افزودن ۵ درصدی خاکستر پوسته برنج دچار کاهش شد. نتایج نشان داد که عمر خستگی بتن غلتکی حاوی مصالح خرده آسفالتی کمتر از حالت معمولی آن بود. محققان با توجه به نتایج به‌دست‌آمده اذعان داشتند که جای‌گزینی درشت‌دانه طبیعی با

بتن غلتکی (Roller compacted concrete) یک ترکیب بتن سیمانی پرتلند با اسلامپ صفر است که توسط ماشین‌آلات متداول در بتن آسفالتی، پخش گردیده و به‌وسیله غلتک‌های فلزی چرخ لاستیکی و غلتک‌های ویریه، متراکم می‌شود [۱]. دلایل گسترش استفاده از بتن غلتکی در روسازی شامل قابلیت اجرای آن با ماشین‌آلات متداول روسازی‌های آسفالتی، افزایش سرعت اجرا و در نتیجه صرفه‌جویی اقتصادی در مقایسه با سایر روسازی‌ها، نیاز نداشتن به میلگردهای عرضی (Dowel) در درزها و تقویت سازه‌ای با فولاد، امکان عبور زود هنگام ترافیک نسبت به اجرای سایر روسازی‌های بتنی به علت استحکام سازه‌ای بعد از تراکم و مصرف کمتر سیمان است [۲]. در سال‌های گذشته تحقیقات زیادی در زمینه استفاده از مصالح زائد و نخاله‌های صنعتی و ساختمانی در مخلوط‌های بتنی و نیز مخلوط بتن غلتکی صورت پذیرفته است. لوک کورارد و همکاران (۲۰۱۰) در تحقیق خود به بررسی نقش خرده بتن بازیافتی به‌عنوان جای‌گزین سنگ‌دانه در مخلوط بتن غلتکی پرداختند. نتایج نمونه‌های ساخته شده بیانگر کاهش مقاومت چشمگیر در مقاومت ۷ و ۲۸ روزه بوده است. لیکن به دلیل وجود صرفه اقتصادی و اثرات مثبت زیست‌محیطی استفاده از مصالح خرده آسفالتی در مخلوط بتن غلتکی مطلوب گزارش شده است [۳]. در همین راستا لویز یوسدا و همکاران (۲۰۱۶) در تحقیق خود بر روی بتن‌های غلتکی حاوی سنگدانه‌های بازیافتی بتن معمولی اذعان داشتند که اجرای روسازی بر پایه این گونه بتن‌ها به‌صورت ۱۰۰ درصد عملی خواهد بود [۴]. محمودی و عامری (۱۳۸۸) در تحقیقی دیگر تأثیر سرباره کارخانه ذوب‌آهن اصفهان بر مخلوط بتن غلتکی را مورد ارزیابی قرار دادند. نتایج آزمون مقاومت فشاری نشان داد که استفاده ۲۵ درصدی از سرباره باعث افزایش مقاومت فشاری بتن می‌شود و با افزایش درصد جایگزینی به بیش از ۲۵ درصد، مقدار مقاومت به‌شدت کاهش می‌یابد. این محققان متذکر شدند که با توجه به قیمت ارزان‌تر سرباره نسبت به سنگ‌دانه طبیعی، به‌کارگیری آن در روسازی‌های بتنی، کاهش هزینه‌های ساخت و قیمت تمام‌شده پروژه را در پی خواهد داشت [۵]. مطالعات انجام‌شده نشان می‌دهند که به‌کارگیری مواد زائدی چون الیاف و دورریز پلاستیک [۶] در بتن غلتکی و خرده لاستیک [۷] در بتن معمولی، با وجود کاهش مقاومت در مخلوط سبب بهبود

مصالح خرده آسفالتی منجر به افزایش عمر خستگی نسبت به ریزدانه طبیعی خواهد شد [۱۵]. فخری و عموسلطانی (۲۰۱۷) تأثیر مصالح بازیافتی مانند خرده آسفالت و خرده لاستیک به عنوان جایگزین سنگدانه در بتن غلتکی را با اندازه گیری انرژی جذب شده و طاقت این مخلوطها مورد بررسی قرار دادند. نتایج حاکی از بهبود ۵ درصدی مقاومت فشاری و خمشی بتن غلتکی با افزودن ۵ درصد خرده لاستیک بود. همین طور کاهش چشمگیری در میزان مقاومت فشاری و خمشی بتن غلتکی با افزایش مصالح خرده آسفالتی به بیش از مقدار ۵ درصد مشاهده شد. نتایج مطالعات این محققین نشان داد که ترکیب بالای ۱۰ درصد لاستیک و ۵ درصد مصالح خرده آسفالتی می تواند برای طولانی کردن عمر روسازیها به وسیله افزودن میزان طاقت و جذب انرژی، مقرون به صرفه و مفید باشد [۱۶].

روش سطح پاسخ (RSM) مجموعه ای از روش های ریاضی و آماری است که در بهینه سازی بسیاری از فرآیندهای مختلف بکار می رود. مزیت اصلی روش سطح پاسخ یعنی کاهش تعداد آزمایش های لازم جهت ارزیابی پارامترهای متعدد و برهم کنش بین آنها، منجر به ترغیب محققان جهت ساخت مدل هایی ساده و عموماً دقیق برای مسائل پیچیده شده است. «نامیر» و «رامامورسی» (۲۰۰۶) به توسعه مدل های تجربی برای مقاومت فشاری و چگالی فوم بتن از طریق آزمایش های آماری طراحی شده پرداختند. آزمایش های اعتبار سنجی نشان دادند که رابطه توسعه یافته می تواند به عنوان یک راهنما در تعیین طرح اختلاط فوم بتن عمل کند [۱۷].

۲- مطالعات آزمایشگاهی

۲-۱- مصالح

به طور کلی در این تحقیق از یک نوع سنگ دانه طبیعی و دو نوع خرده آسفالت بازیافتی استفاده شده است. مشخصات خرده آسفالت های بازیافتی در جدول ۱ ارائه شده است. سنگ دانه های طبیعی در این تحقیق از معادن تولید سنگ دانه شکسته اطراف تهران تهیه شد. دانه بندی مصالح سنگ دانه ای مورد استفاده منطبق بر دانه بندی پیشنهادی انجمن سیمان پرتلند در نظر گرفته شد. نمودار دانه بندی مصالح سنگی و خرده آسفالتی در شکل ۱ الف و ب نشان داده شده است. به علاوه مقادیر وزن مخصوص ظاهری و درصد جذب آب هر کدام از مصالح سنگ دانه ای مطابق با آیین نامه ASTM C136-01 و ASTM C127-01 در جدول ۲ داده شده است [۲۱ و ۲۲].

۲-۲- آماده سازی نمونه ها

به منظور آماده سازی نمونه های بتن، ابتدا دو دانه بندی با نسبت های مختلف درشت دانه به ریزدانه و نیز دو مقاومت طراحی ۲۸ روزهی ۳۵ و ۴۰ مگاپاسکال در نظر گرفته شد و محاسبات مربوط به نسبت های اختلاط به صورت حجمی انجام شد. پس از تعیین نظری نسبت های اختلاط برای هر یک از دانه بندی ها، مستقل از مقدار آب محاسبه شده از چندین مقدار مختلف آب در ساخت نمونه ها

روش سطح پاسخ (RSM) مجموعه ای از روش های ریاضی و آماری است که در بهینه سازی بسیاری از فرآیندهای مختلف بکار می رود. مزیت اصلی روش سطح پاسخ یعنی کاهش تعداد آزمایش های لازم جهت ارزیابی پارامترهای متعدد و برهم کنش بین آنها، منجر به ترغیب محققان جهت ساخت مدل هایی ساده و عموماً دقیق برای مسائل پیچیده شده است. «نامیر» و «رامامورسی» (۲۰۰۶) به توسعه مدل های تجربی برای مقاومت فشاری و چگالی فوم بتن از طریق آزمایش های آماری طراحی شده پرداختند. آزمایش های اعتبار سنجی نشان دادند که رابطه توسعه یافته می تواند به عنوان یک راهنما در تعیین طرح اختلاط فوم بتن عمل کند [۱۷]. پس از آن در تحقیقات گوناگونی از روش سطح پاسخ جهت توسعه مدل های رگرسیون طرح اختلاط انواع بتن ها از جمله بتن پلیمری [۱۸] و بتن حاوی کاغذ آسیاب شده [۱۹] استفاده شده است. بوکلی حصین و همکاران (۲۰۱۳) برای پیش بینی مقاومت فشاری از مدل سطح پاسخ و شبکه عصبی مصنوعی استفاده نمودند. درصد سیمان، درصد رطوبت، میزان اسلامپ و درصد هوا به عنوان متغیرهای ورودی در مدل ها اعمال گردید و خروجی مدل مقاومت فشاری ۲۸ روزه بتن در نظر گرفته شد [۲۰].

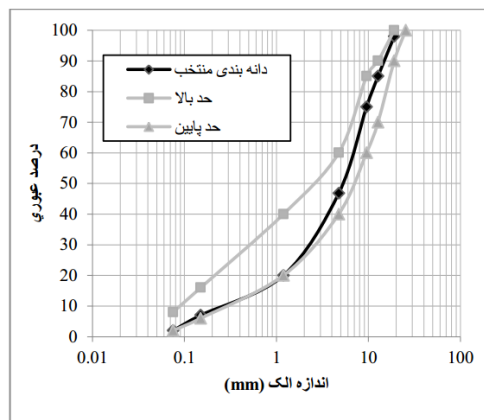
روش های مختلفی به منظور مدل سازی یک پارامتر خروجی وابسته بر اساس تعدادی پارامترهای ورودی مستقل وجود دارد که از جمله این روش ها می توان به رگرسیون خطی و غیرخطی و همچنین روش های مبتنی بر هوش محاسباتی مانند روش شبکه عصبی

تأمین رطوبت و عمل آوری، ابتدا برای ۲۴ ساعت از پوشش گونی نخی مرطوب و نایلون استفاده کرده و سپس نمونه‌ها به آرامی از قالب استوانه‌ای خارج شده و برای مدت زمان مورد نیاز درون حوضچه آب قرار داده شدند. از گذشته تا امروز یکی از مباحثی که در مخلوط‌های آسفالتی و قیری به آن پرداخته شده است، بحث حساسیت حرارتی و مشکلات ناشی از افزایش دما بر این مخلوط‌ها بوده است. قیر ماده‌ای است که در اثر حرارت به ترتیب از سختی به سفتی، خمیری، شلی و سیال تغییر شکل داده و پس از حذف حرارت دوباره به حالت اولیه خود برمی‌گردد [۲۳]. به منظور تأمین این شرایط پس از ساخت نمونه‌های استوانه‌ای و عمل آوری آن در حوضچه آب، نمونه‌ها به مدت ۲۴ ساعت از حوضچه بیرون گذاشته شده تا این که آب منفذی آن‌ها خارج شده و سپس به مدت ۲۴ ساعت در گرم‌کن یا سردخانه قرار داده شده و پس از خروج بلافاصله مورد آزمایش مقاومت فشاری قرار گرفته‌اند. بدین ترتیب با در نظر گرفتن دما به صورت سه حالت ۲۰-، ۲۵ و ۶۰ درجه سانتی‌گراد و زمان عمل آوری به صورت سه حالت ۳، ۷ و ۲۸ روز، تأثیر این دو پارامتر نیز با ساخت نمونه‌های استوانه‌ای جداگانه‌ای مورد بررسی قرار گرفت. لازم به ذکر است که تمام مراحل آزمایشگاهی این تحقیق در آزمایشگاه تکنولوژی بتن دانشگاه تربیت مدرس انجام پذیرفته است.

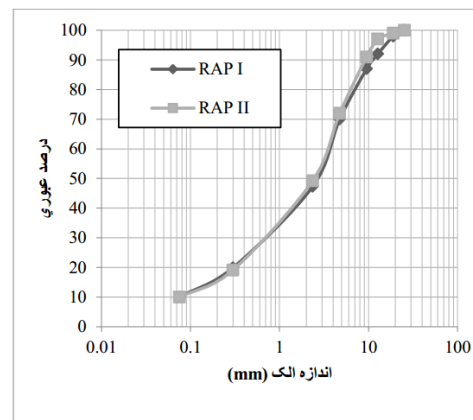
استفاده گردید. در این مرحله ۳۶ نمونه استوانه‌ای ۱۵×۳۰ سانتی متری ساخته شد و قبل از اینکه نمونه‌های استوانه‌ای توسط میز لرزان و سربار متراکم شوند، روانی مخلوط‌ها توسط آزمایش زمان تأمین رطوبت و عمل آوری، ابتدا برای ۲۴ ساعت از پوشش گونی نخی مرطوب و نایلون استفاده کرده و سپس نمونه‌ها به آرامی از قالب استوانه‌ای خارج شده و برای مدت زمان مورد نیاز درون حوضچه آب قرار داده شدند. از گذشته تا امروز یکی از مباحثی که در مخلوط‌های آسفالتی و قیری به آن پرداخته شده است، بحث حساسیت حرارتی و مشکلات ناشی از افزایش دما بر این مخلوط‌ها و بی‌بی کنترل شد و نمونه‌هایی که در زمان وی بی محدود ۳۰ تا ۵۵ ثانیه بودند، جهت ساخت نمونه‌های استوانه‌ای مورد استفاده قرار گرفتند. در نهایت مخلوطی که بیشترین مقاومت ۲۸ روزه را حاصل نمود به‌عنوان مخلوط شاهد در نظر گرفته شد. نسبت‌های اختلاط منتخب برای مخلوط‌های مینا در جدول ۳ داده شده است. پس از تعیین طرح‌های اختلاط مینا، نمونه‌های مختلف خرده آسفالت بازیافتی در سه حالت: ۱- جای‌گزینی در ریزدانه و درشت‌دانه، ۲- جای‌گزینی فقط در ریزدانه و ۳- جای‌گزینی فقط در درشت‌دانه ساخته شدند. سپس با استفاده از خرده آسفالت بازیافتی نوع دوم نمونه‌های استوانه‌ای دیگری جهت بررسی تأثیر انواع مختلف این مصالح ساخته شد. پس از ساخت نمونه‌های استوانه‌ای به منظور

جدول ۱- مشخصات مصالح خرده آسفالتی بازیافتی مورد استفاده

نوع خرده آسفالت	درصد قیر	درجه نفوذ در ۲۵°C (۰/۱ میلی‌متر)	مقدار کشش در ۲۵°C (سانتی‌متر)
RAPI	۵/۲	۱۶	۴/۲
RAPII	۵/۵	۱۵	۳/۸



(ب)



(الف)

شکل ۱- (الف) دانه‌بندی سنگدانه حاصل از استخراج خرده آسفالت‌های بازیافتی (ب) دانه‌بندی مورد استفاده در ساخت نمونه‌های بتن غلتکی

جدول ۲- مشخصات سنگ‌دانه‌ها

مصالح	وزن مخصوص ظاهری (KG/M ³)	درصد جذب آب
سنگدانه طبیعی	۲۷۷۰	۱/۶۵
	۲۶۱۰	۲/۱
خرده آسفالت نوع I	۲۴۰۰	۱/۳۵
	۲۲۰۰	۱/۸
خرده آسفالت نوع II	۲۳۳۰	۱/۴۵
	۲۱۵۰	۱/۸۵

جدول ۳- نسبت‌های اختلاط منتخب برای مخلوط‌های مبنا

شماره نسبت اختلاط	مقاومت طراحی (MPa)	سیمان (kg/m ³)	آب (kg/m ³)	W/C	ریزدانه (kg/m ³)	درشت‌دانه (kg/m ³)
۱	۴۰	۳۱۰	۱۰۱/۶۳	۰/۳۲	۹۵۲	۱۰۸۴
۲	۳۵	۲۸۰	۱۰۱/۶۳	۰/۳۶	۹۵۲	۱۰۸۴

۳-۲- آزمایش مقاومت فشاری

آسفالت درشت‌دانه، زمان عمل‌آوری و دما به‌عنوان متغیرهای مستقل و مقاومت فشاری تک‌محوری به‌عنوان متغیر وابسته در نظر گرفته شدند. از تأثیر مقدار آب به علت ثابت ماندن آن در تمام نمونه‌ها، صرف‌نظر شد. حدود آماری هر یک از متغیرها در جدول ۴ داده شده است.

آزمایش مقاومت فشاری بر طبق استاندارد ASTM 39/C 39M-03 صورت پذیرفت [۲۴] بر طبق توصیه ASTM 39/C 39M-03، مقاومت فشاری ۲۸ روزه مخلوط‌های بتن غلتکی روسازی باید بیش از ۲۷/۶ مگا پاسکال باشد. تعیین مدلی برای پیش‌بینی مقاومت فشاری در درصد‌های مختلف خرده آسفالت از اهداف این پژوهش بود که برای این منظور از روش سطح پاسخ استفاده شده است. لازم به ذکر است که طبق توصیه استاندارد ASTM 39/C 39M-03 نرخ بارگذاری بین ۰/۱۴ و ۰/۳۴ مگا پاسکال بر ثانیه لحاظ شده است.

۳-۳- روش سطح پاسخ (RSM)

روش سطح پاسخ (RSM) مجموعه‌ای از روش‌های آماری و ریاضی مفید برای توسعه، بهبود و بهینه‌سازی فرآیندهاست [۲۵]. روش سطح پاسخ یک روش مبتنی بر رگرسیون برای برقراری ارتباط بین چندین متغیر ورودی به‌طور بالقوه و یک پارامتر خروجی است. در اصطلاح به این پارامتر خروجی پاسخ گفته می‌شود. متغیرهای ورودی در اغلب اوقات به‌عنوان متغیرهای مستقل شناخته می‌شوند و در عمل وابسته به کنترل محققان و مهندسان دارند. روش سطح پاسخ متشکل از راهبردهای علمی برای کاوش در فضای فرآیند یا متغیرهای مستقل، مدل‌سازی آماری-تجربی به‌منظور توسعه یک رابطه مناسب میان متغیرهای ورودی و خروجی و بهینه‌سازی روش‌ها برای یافتن مقدار متغیرهای فرآیند که مقادیر مطلوب پاسخ را منجر می‌شود، است.

۴-۲- مجموعه داده

پس از انجام مطالعات آزمایشگاهی، ۴۷ داده منحصر به فرد مربوط به مقاومت فشاری بتن غلتکی حاوی خرده آسفالت بازیافتی به دست آمد. لازم به ذکر است مقادیر مقاومت فشاری برای هر طرح از میانگین مقاومت فشاری سه نمونه یکسان از همان طرح حاصل گردید. در واقع برای تهیه این پایگاه داده در مجموع ۱۴۱ نمونه استوانه‌ای مورد آزمایش قرار گرفت. در نهایت مقدار سیمان، مقدار ریزدانه طبیعی، مقدار درشت‌دانه طبیعی، مقدار خرده آسفالت ریزدانه، مقدار خرده

جدول ۴- حدود آماری مجموعه داده مقاومت فشاری بتن غلتکی حاوی خرده آسفالت بازیافتی

متغیر	حداکثر	حداقل	میانگین	انحراف معیار	میان
سیمان (kg/m^3)	۳۱۰	۲۸۰	۳۰۱/۰۶۴	۱۳/۸۶۸	۳۱۰
ریزدانه طبیعی (kg/m^3)	۹۵۲	۱۹۰/۴	۷۵۳/۴۹۸	۲۱۴/۷۹	۸۰۹/۲
درشت‌دانه طبیعی (kg/m^3)	۱۰۸۴	۵۴۲	۸۹۷/۱۸۳	۲۰۳/۹۹۴	۹۷۵/۶
خرده آسفالت ریزدانه (kg/m^3)	۶۴۱/۹۶	۰	۱۶۶/۷۷۸	۱۸۰/۵۷۹	۱۱۷/۶۳
خرده آسفالت درشت‌دانه (kg/m^3)	۴۶۹/۶	۰	۱۶۱/۱۰۴	۱۷۵/۹۳۸	۹۳/۹۲
زمان عمل‌آوری (روز)	۲۸	۳	۲۴/۰۸۵	۸/۷۷۷	۲۸
دما ($^{\circ}\text{C}$)	۶۰	-۲۰	۲۴/۱۴۹	۱۶/۷۸۹	۲۵
مقاومت فشاری (MPa)	۶۶/۵	۱۴/۸	۲۹/۳۰۴	۹/۶۴۴	۲۷/۳

میانگین صفر و همان واریانس تعریف می‌شوند، تبدیل نمود. با در نظر گرفتن متغیرهای کد شده، تابع پاسخ رابطه (۲) به صورت زیر نوشته خواهد شد:

$$\eta = f(x_1, x_2, \dots, x_k) \quad (3)$$

به دلیل ناشناخته بودن شکل تابع پاسخ f ، باید آن را تقریب زد. در حقیقت، استفاده موفق از سطح پاسخ به توانایی محقق برای توسعه یک تقریب مناسب برای f بستگی دارد. معمولاً، یک تابع چندجمله‌ای مرتبه پایین در منطقه نسبتاً کوچکی از فضای متغیر مستقل مناسب است. در بسیاری موارد، از یک مدل چندجمله‌ای مرتبه اول یا مرتبه دوم استفاده می‌شود. مدل‌های مرتبه اول زمانی مناسب‌اند که محقق علاقه‌مند باشد تا سطح پاسخ صحیح را در بیش از یک منطقه نسبتاً کوچک از فضای متغیر مستقل و محلی که در آن انحنای کمی در f وجود دارد، تخمین بزند. در صورت وجود دو متغیر مستقل، مدل مرتبه اول با توجه به متغیرهای کد شده به صورت زیر نوشته می‌شود:

$$\eta = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 \quad (4)$$

شکل مدل مرتبه اول در معادله ۴ گاهی اوقات تحت عنوان مدل تأثیرات اصلی نامیده می‌شود، زیرا فقط اثرات اصلی دو متغیر

در این تحقیق بیشتر بر کاربرد دوم روش سطح پاسخ یعنی مدل‌سازی آماری به منظور توسعه یک رابطه تقریب مناسب میان پاسخ Y و متغیرهای مستقل $\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_k$ تمرکز شده است.

رابطه کلی به صورت زیر است:

$$Y = f(\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_k) + \varepsilon \quad (1)$$

که در آن شکل تابع پاسخ دقیق f ناشناخته است و ممکن است پیچیده باشد و ε نشان‌دهنده خطای مدل‌سازی است که در تابع f به حساب نیامده است. ε معمولاً شامل اثرات خطای اندازه‌گیری بر پاسخ و همچنین تأثیر خطای ناشی از عوامل پارامترهای ورودی ناشناخته در مدل‌سازی است. ε همانند یک خطای آماری رفتار کرده که اغلب به جهت داشتن یک توزیع احتمال نرمال با میانگین صفر و واریانس σ^2 فرض می‌شود. پس داریم:

$$E(y) = \eta = E[f(\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_k)] + E(\varepsilon) = f(\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_k) \quad (2)$$

متغیرهای $\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_k$ در رابطه (۲) معمولاً متغیرهای طبیعی نامیده می‌شوند، زیرا با واحدهای اندازه‌گیری طبیعی مانند درجه سانتی‌گراد یا کیلوگرم بر مترمکعب بیان شده‌اند. در اکثر تحقیقات مبتنی بر مدل سطح پاسخ، به راحتی می‌توان متغیرهای طبیعی را به متغیرهای کد شده x_1, x_2, \dots, x_k که معمولاً به صورت بی‌بعد، با

$$\eta = \beta_0 + \sum_{j=1}^k \beta_j x_j + \sum_{j=1}^k \beta_{jj} x_j^2 + \sum_{i=1}^k \sum_{j=2}^k \beta_{ij} x_i x_j \quad (8)$$

در این تحقیق به منظور ساخت مدل RSM از نسخه ۱۰ نرم افزار Design Expert استفاده شده است. این نرم افزار امکان برازش، تحلیل و مقایسه توابع مختلف اعم از خطی، برهم کنش (2FI) و چندجمله‌ای را فراهم می‌آورد. همچنین صحت مدل (Significant of the model) با استفاده از آزمون فیشر سنجیده شد و دقت عملکرد مدل به وسیله ضریب رگرسیون (R^2) مورد ارزیابی قرار گرفت. به علاوه تأثیر متغیرهای ورودی بر روی مقاومت فشاری با استفاده از تحلیل واریانس (ANOVA) بررسی شد.

۴- نتایج و بحث

۴-۱- ارزیابی مدل ساخته شده توسط RSM

در این تحقیق از سه تابع درجه دوم، خطی و برهمکنش به منظور توسعه مدل سطح پاسخ برای پیش‌بینی مقاومت فشاری بتن غلتکی حاوی خرده آسفالت بازیافتی استفاده شد و نتایج حاصل با یکدیگر مقایسه گردید. تحلیل داده‌ها نشان‌دهنده برتری تابع درجه دوم است (جدول ۵). این مدل علاوه بر مقدار P کم (< 0.0001)، ضریب رگرسیون 0.9668 را نتیجه داده است. منظور از درجه آزادی رگرسیون و خطا (DF) در هر مدل به ترتیب نشان‌دهنده تعداد متغیرهای پذیرفته شده و کنار گذاشته شده به دلیل تأثیر کم آنان در فرآیند پیش‌بینی از مدل کلی ساخته شده است.

جدول ۵- مقایسه مدل‌های ساخته شده برای پیش‌بینی مقاومت فشاری

مدل	مجموع مربعات	درجه آزادی	میانگین مربعات	F	P Prob > F	R^2
* درجه دوم	رگرسیون	۱۱	۳۷۶/۷۴	۹۸/۱۲	< 0.0001	۰/۹۶۸۶
	خطا	۳۵	۳/۸۴	-	-	-
خطی	رگرسیون	۶	۶۲۷/۶۷	۴۸/۹۹	< 0.0001	۰/۸۸۰۲
	خطا	۴۰	۱۲/۸۱	-	-	-
برهمکنش (2FI)	رگرسیون	۲۲	۱۷۹/۸۹	۱۳/۴۵	< 0.0001	۰/۹۲۵۰
	خطا	۲۴	۱۳/۳۷	-	-	-

فرضی x_1 و x_2 را شامل می‌شود. در صورت وجود یک برهم-کنش بین این متغیرها، می‌توان آن را به سادگی به مدل افزود:

$$\eta = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_{12} x_1 x_2 \quad (5)$$

افزودن جزء برهم کنش، معرف انحنای تابع پاسخ خواهد بود. اغلب انحنا در سطح پاسخ صحیح به اندازه‌ای است که مدل مرتبه اول (حتی با وجود جزء برهم کنش) برای تقریب آن دارای کارایی لازم نیست. در این شرایط به مدل مرتبه دوم نیاز خواهد بود. در حالت وجود دو متغیر مستقل، مدل مرتبه دوم به صورت زیر خواهد بود:

$$\eta = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_{11} x_1^2 + \beta_{22} x_2^2 + \beta_{12} x_1 x_2 \quad (6)$$

این مدل می‌تواند به عنوان یک تقریب از سطح پاسخ صحیح در یک منطقه نسبتاً کوچک، مفید واقع بشود. دلایل استفاده از مدل مرتبه دوم موارد زیر است:

- ۱- مدل مرتبه دوم بسیار انعطاف پذیر است و می‌تواند طیف گسترده‌ای از توابع را در برگیرد. به همین منظور اغلب به عنوان یک تقریب سطح پاسخ صحیح، به خوبی عمل خواهد کرد.
- ۲- محاسبه پارامترهای β به راحتی انجام خواهد پذیرفت و برای این منظور می‌توان از روش حداقل مربعات استفاده نمود.
- ۳- تجارب عملی نشان‌دهنده عملکرد مناسب مدل مرتبه دوم در حل مسائل واقعی سطح پاسخ است.

در حالت کلی می‌توان مدل مرتبه اول را به صورت زیر نوشت:

$$\eta = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_k x_k \quad (7)$$

و مدل مرتبه دوم نیز به شکل زیر خواهد بود:

$$T > T^2 > C > "CA \times CT" > "FRAP \times CT" > CT^2 > CA > CRAP > "C \times FRAP"$$

که به ترتیب T برابر با دما، C برابر با سیمان، CA برابر با درشت دانه طبیعی، FRAP برابر با خرده آسفالت ریزدانه، CRAP برابر با خرده آسفالت درشت دانه و CT برابر با زمان عمل آوری است. از طرفی با توجه به جدول ۷، مقدار R^2 پیش بینی شده (۰/۹۳۳۱) نشان دهنده سازگاری منطقی آن با مقدار R^2 تعدیل یافته (۰/۹۵۸۷) با توجه به تفاوت کمتر از ۰/۲ میان آنهاست.

نتایج تحلیل واریانس نیز در جدول ۶ به نمایش در آمده است. این جدول نشان می دهد که علاوه بر تمامی متغیرهای اولیه به غیر از ریزدانه طبیعی، برهم کنش میان سیمان و خرده آسفالت ریزدانه، برهم کنش میان درشت دانه طبیعی و زمان عمل آوری، برهم کنش میان خرده آسفالت ریزدانه و زمان عمل آوری، مجذور زمان عمل آوری و مجذور دما نیز می تواند در پیش بینی مقادیر مقاومت فشاری تأثیرگذار باشد. علت انتخاب این متغیرها، مقادیر کمتر از ۰/۰۵ برای پارامتر "Prob>F" است. همین طور با توجه به مقادیر F می توان نتیجه گرفت که درجه اهمیت متغیرها به صورت زیر است:

جدول ۶- تحلیل واریانس

متغیر	نماد	مجموع مربعات	F	p Prob > F
سیمان	C	۹۷/۱۶	۲۵/۳۰	<۰/۰۰۰۱
درشت دانه طبیعی	CA	۳۱/۱۳	۸/۱۱	۰/۰۰۷۳
خرده آسفالت ریزدانه	FRAP	۱۹/۸۴	۵/۱۷	۰/۰۲۹۳
خرده آسفالت درشت دانه	CRAP	۳۰/۸۶	۸/۰۴	۰/۰۰۷۶
زمان عمل آوری	CT	۴۰/۹۵	۱۰/۶۶	۰/۰۰۲۴
دما	T	۱۵۳۹/۰۰	۴۰۰/۸۲	<۰/۰۰۰۱
اندرکنش سیمان و خرده آسفالت ریزدانه	C×FRAP	۲۳/۲۴	۶/۰۵	۰/۰۱۹۰
اندرکنش درشت دانه طبیعی و زمان عمل آوری	CA×CT	۶۴/۳۸	۱۶/۷۷	۰/۰۰۰۲
اندرکنش خرده آسفالت ریزدانه و زمان عمل آوری	FRAP×CT	۵۵/۹۸	۱۴/۵۸	۰/۰۰۰۵
مجذور زمان عمل آوری	CT ²	۴۳/۹۸	۱۱/۴۵	۰/۰۰۱۸
مجذور دما	T ²	۲۴۹/۹۴	۶۵/۱۰	<۰/۰۰۰۱

جدول ۷- تحلیل آماری مدل RSM

۰/۹۶۸۶	R^2
۰/۹۵۸۷	R^2 تعدیل یافته (Adj R-Squared)
۰/۹۳۳۱	R^2 پیش بینی شده (Pred R-Squared)
۴۶/۶۹۶	کفایت دقت (Adeq Precision)
۱/۹۶	انحراف معیار
۶/۶۹	ضریب تغییر (%) (C.V. %)

جدول ۸- دقت مدل ساخته شده به وسیله روش سطح پاسخ (RSM)

مدل	R^2	RMSE	MAD	MAPE
RSM	۰/۹۶۸۶	۱/۶۹۰۹	۱/۳۷۴۹	۴/۶۹۱۸

۳- متوسط انحراف مطلق (MAD):

$$MAD = \frac{\sum_{i=1}^M |h_i - t_i|}{M} \quad (12)$$

۴- متوسط درصد خطای مطلق (MAPE):

$$MAPE = \frac{\sum_{i=1}^M |h_i - t_i|}{\sum_{i=1}^M h_i} \times 100 \quad (13)$$

که M تعداد کل داده‌ها در هر مجموعه، h_i مقدار اندازه‌گیری شده i امین مقاومت فشاری، t_i مقدار پیش‌بینی شده i امین مقاومت فشاری، \bar{h}_i میانگین h_i و \bar{t}_i میانگین t_i است. مقادیر کمتر RMSE، MAD و MAPE، نشان‌دهنده دقت بالاتر مدل پیش‌بینی خواهند بود. در واقع برای یک مدل پیش‌بینی دقیق و بدون هیچ‌گونه خطای می‌توان مقادیر R^2 برابر با یک و RMSE، MAD و MAPE برابر با صفر را انتظار داشت.

حاصل از روش سطح پاسخ برابر با ۰/۹۶۸۶ است که نشان‌دهنده دقت بالای مدل ارائه شده است. همین‌طور مقادیر متناظر آزمایشگاهی و پیش‌بینی شده برای مقاومت فشاری بتن غلتکی حاوی خرده آسفالت بازیافتی در جدول ۹ به نمایش درآمده است.

$$CS = (-343.13531) + (0.15777 \times C) + (0.29265 \times CA) + (0.086954 \times FRAP) + (0.33563 \times CRAP) + (1.68318 \times CT) - (0.53116 \times T) - (0.000298308 \times C \times FRAP) + (0.000666899 \times CA \times CT) - (0.000825197 \times FRAP \times CT) - (0.051657 \times CT^2) + (0.00441956 \times T^2) \quad (9)$$

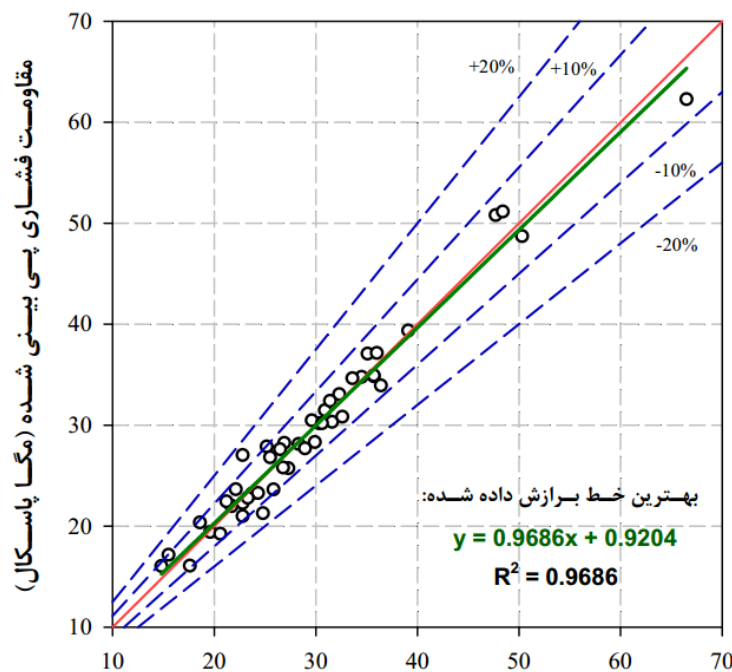
در این تحقیق از روابط آماری زیر برای محاسبه دقت و عملکرد روش سطح پاسخ استفاده گردید:

۱- جذر میانگین مربعات خطا (RMSE):

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{M} \sum_{i=1}^M (h_i - t_i)^2} \quad (10)$$

۲- ضریب رگرسیون (R^2):

$$R^2 = \left[\frac{\sum_{i=1}^M (h_i - \bar{h}_i)(t_i - \bar{t}_i)}{\sqrt{\sum_{i=1}^M (h_i - \bar{h}_i)^2 \sum_{i=1}^M (t_i - \bar{t}_i)^2}} \right]^2 \quad (11)$$



شکل ۲- عملکرد مدل ساخته شده به وسیله‌ی روش سطح پاسخ (RSM)

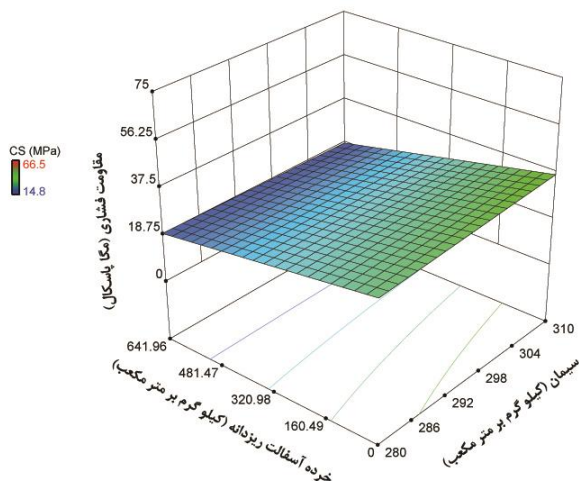
جدول ۹- مقادیر متناظر آزمایشگاهی و پیش‌بینی شده برای مقاومت

فشاری بتن غلتکی حاوی خرده آسفالت بازیافتی (MPa)

مقاومت فشاری پیش‌بینی شده	مقاومت فشاری آزمایشگاهی
۳۹/۳۶	۳۹/۱
۳۴/۸۴	۳۵/۷
۳۰/۳۲	۳۱/۶
۲۱/۲۷	۲۴/۸
۳۷/۰۶	۳۵/۱
۳۴/۷۷	۳۴/۵
۳۰/۱۷	۳۰/۳
۲۰/۹۸	۲۲/۸
۳۷/۱۴	۳۶
۳۴/۹۱	۳۵/۷
۳۰/۴۶	۲۹/۶
۳۴/۶۳	۳۳/۶
۳۰/۸۲	۳۲/۶
۲۷/۰۲	۲۲/۸
۱۹/۴۱	۱۹/۶
۳۳/۰۵	۳۲/۳
۳۱/۴۷	۳۰/۹
۲۸/۳۱	۲۹/۹
۲۲	۲۱/۷
۳۲/۴	۳۱/۴
۳۰/۱۸	۳۰/۶
۲۵/۷۳	۲۷/۳
۲۵/۸۰	۲۶/۷۷
۲۷/۸۸	۲۵/۱۷
۲۸/۲۴	۲۶/۹
۲۳/۱۹	۲۳/۷
۲۸/۱۴	۲۸/۳
۲۳/۶۴	۲۲/۱۳
۲۷/۶۰	۲۶/۴۷
۲۷/۶۸	۲۸/۹۳
۲۳/۶۲	۲۵/۸۳
۱۹/۲۴	۲۰/۶
۲۶/۸	۲۵/۵
۱۶/۰۷	۱۷/۶
۲۱/۹۶	۲۱/۷
۱۶/۰۴	۱۴/۸
۲۲/۲۷	۲۲/۸
۱۷/۱۶	۱۵/۵
۲۳/۲۷	۲۴/۳
۶۲/۲۷	۶۶/۵
۳۳/۹۲	۳۶/۴
۴۸/۷	۵۰/۳
۲۰/۳۵	۱۸/۶
۵۰/۷۸	۴۷/۷
۲۲/۴۳	۲۱/۲
۵۱/۱۴	۴۸/۴
۲۲/۷۹	۲۳/۳

۴-۲- تحلیل حساسیت

یکی از مزیت‌های روش سطح پاسخ (RSM)، این است که می‌توان تأثیرات برهم‌کنش متغیرهای مختلف را بر میزان خروجی مدل بررسی نمود. در این تحقیق مدل نهایی به‌دست آمده شامل برهم‌کنش سیمان با خرده آسفالت ریزدانه، برهم‌کنش درشت‌دانه طبیعی با زمان عمل‌آوری و برهم‌کنش خرده آسفالت ریزدانه با زمان عمل‌آوری است. همان‌طور که در شکل ۳ ملاحظه می‌شود، مقدار مقاومت فشاری با افزایش مقدار سیمان افزایش خواهد یافت و شیب این افزایش در مقادیر زیادتر خرده آسفالت ریزدانه به مراتب کمتر است. و در مجموع می‌توان دید که کاهش خرده آسفالت ریزدانه سبب افزایش مقاومت فشاری خواهد شد که این افزایش مقاومت با آنچه در پیشینه تحقیق و مطالعات آزمایشگاهی به آن اشاره شد، سازگاری دارد.



شکل ۳- تأثیر تغییرات دو پارامتر سیمان و خرده آسفالت ریزدانه بر میزان مقاومت فشاری

علاوه بر این باتوجه به شکل ۴ می‌توان به‌خوبی دریافت که با افزایش زمان عمل‌آوری در یک میزان درشت‌دانه طبیعی ثابت، مقدار مقاومت فشاری افزایش می‌یابد. البته لازم به ذکر است که شیب منحنی صعودی با افزایش زمان عمل‌آوری رفته‌رفته کمتر خواهد شد.

مطابق با آنچه که در شکل ۵ به نمایش درآمده، در مقادیر کمتر خرده آسفالت ریزدانه، تأثیر زمان عمل‌آوری بیشتر است به گونه‌ای که در حالت خرده آسفالت ریزدانه برابر با صفر کیلوگرم بر مترمکعب، مقاومت ۲۸ روزه به ۳۷/۵ مگا پاسکال نزدیک شده اما

برهم کنش میان درشت‌دانه طبیعی و زمان عمل‌آوری، برهم کنش میان خرده آسفالت ریزدانه و زمان عمل‌آوری، و مجذور زمان عمل‌آوری و مجذور دما نیز می‌تواند در پیش‌بینی مقادیر مقاومت فشاری تأثیرگذار باشد. درجه اهمیت متغیرها به صورت زیر است:

$$T > T^2 > C > "CA \times CT" > "FRAP \times CT" > CT^2 > CA > CRAP > "C \times FRAP"$$

که به ترتیب T برابر با دما، C برابر با سیمان، CA برابر با درشت‌دانه طبیعی، $FRAP$ برابر با خرده آسفالت ریزدانه، $CRAP$ برابر با خرده آسفالت درشت‌دانه و CT برابر با زمان عمل‌آوری است.

۳- مقدار R^2 پیش‌بینی شده (۰/۹۳۳۱) نشان‌دهنده سازگاری منطقی آن با مقدار R^2 تعدیل یافته (۰/۹۵۸۷) با توجه به تفاوت کمتر از ۰/۲ میان آن‌ها بود.

۴- مقدار مقاومت فشاری با افزایش مقدار سیمان افزایش خواهد یافت و شیب این افزایش در مقادیر زیادتر خرده آسفالت ریزدانه به مراتب کمتر است.

۵- با افزایش زمان عمل‌آوری در یک میزان درشت‌دانه طبیعی ثابت، مقدار مقاومت فشاری افزایش می‌یابد.

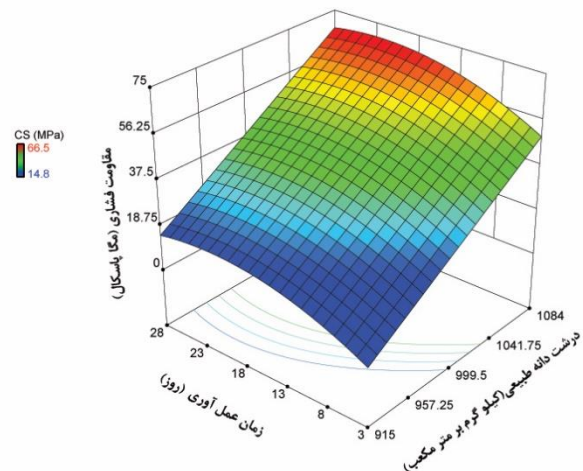
۶- در مقادیر کمتر خرده آسفالت ریزدانه، تأثیر زمان عمل‌آوری بیشتر است.

۷- از مدل توسعه داده شده در این تحقیق می‌توان به منظور پیش‌بینی مقاومت فشاری بتن غلتکی روسازی حاوی مصالح خرده آسفالت بازیافتی با توجه به پارامترهای مقدار درشت‌دانه طبیعی، مقدار سیمان، مقدار خرده آسفالت ریزدانه، مقدار خرده آسفالت درشت‌دانه، زمان عمل‌آوری و دما استفاده نمود.

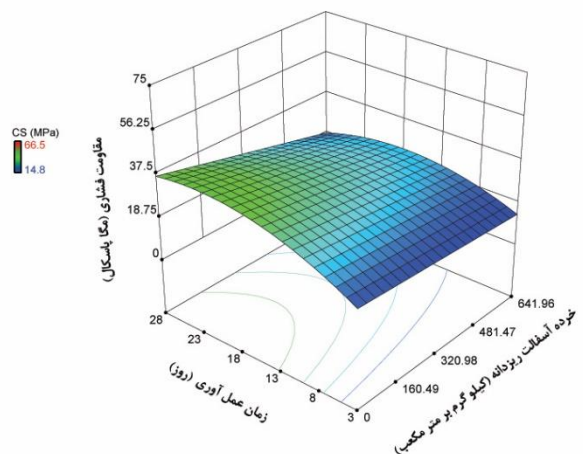
۶- مراجع

- [1] ACI Committee 325. 1995. Report on Roller Compacted Concrete Pavement, ACI 325.10R-95. American Concrete Institute, 3-15.
- [2] TM 5-822-7/AFM 88-6. 1987. CHAPTER 8, Appendix D, Roller compacted concrete pavements: Design and Construction.
- [3] Courard, L., Michel, F., Delhez, P. 2010. Use of concrete road recycled aggregates for roller compacted concrete. Construction and Building Materials, 24(3): 390-395.
- [4] Lopez-Uceda, A., Agrela, F., Cabrera, M., Ayuso, J., López, M. 2016. Mechanical performance of roller compacted concrete with recycled concrete aggregates. Road Materials and Pavement Design, 1-20.

این مقدار در حالت خرده آسفالت ریزدانه برابر با ۶۴۱/۹۶ کیلوگرم بر مترمکعب برابر با ۱۸/۵ مگا پاسکال است.



شکل ۴- تأثیر تغییرات دو پارامتر درشت‌دانه طبیعی و زمان عمل‌آوری بر میزان مقاومت فشاری



شکل ۵- تأثیر تغییرات دو پارامتر خرده آسفالت ریزدانه و زمان عمل‌آوری بر میزان مقاومت فشاری

۵- نتیجه‌گیری

- نتایج حاصل از این تحقیق به شرح زیر قابل بیان می‌باشند:
- ۱- توسعه مدل سطح پاسخ با استفاده از سه تابع درجه دوم، خطی و برهم کنش به منظور پیش‌بینی مقاومت فشاری بتن غلتکی حاوی خرده آسفالت بازیافتی نشان داد که دقت مدل مبتنی بر تابع درجه دوم نسبت به سایر مدل‌ها بیشتر است. این مدل علاوه بر مقدار P کم (< 0.001)، مقدار ضریب رگرسیون قابل قبولی ($R^2=0.9686$) داشت.
 - ۲- مدل به دست آمده نشان داد که علاوه بر تمامی متغیرهای اولیه به غیر از ریزدانه طبیعی، برهم کنش میان سیمان و خرده آسفالت ریزدانه،

of Reclaimed Asphalt Pavement and crumb rubber on mechanical properties of Roller Compacted Concrete Pavement. *Construction and Building Materials*, 137: 470-484.

[17] Nambiar, E. K., Ramamurthy, K. 2006. Models relating mixture composition to the density and strength of foam concrete using response surface methodology. *Cement and Concrete Composites*, 28(9): 752-760.

[18] Barbuta, M., Lepadatu, D. 2008. Mechanical characteristics investigation of polymer concrete using mixture design of experiments and response surface method. *J. Applied Sciences*, 8(12): 2242-2249.

[19] Mohammed, B. S., Fang, O. C., Hossain, K. M. A., Lachemi, M. 2012. Mix proportioning of concrete containing paper mill residuals using Absorption of Coarse Aggregate response surface methodology. *Construction and Building Materials*, 35: 63-68.

[20] Hacene, S. B., Ghomari, F., Schoefs, F., Khelidj, A. 2014. Probabilistic modelling of compressive strength of concrete using response surface methodology and neural networks. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 39(6): 4451-4460.

[21] ASTM C 136 – 01, Standard Test Method for Density, Relative Density (Specific Gravity), and Absorption of Coarse Aggregate.

[22] ASTM C127 – 01, Standard Test Method for Density, Relative Density (Specific Gravity), and

[۲۳] زیاری، ح.، طباطبایی، س.ع.، خبیری، م. م. ۱۳۸۵. راهنمای کاربردی آزمایش‌های قیر و آسفالت. انتشارات دانشگاه علم و صنعت.

[24] ASTM 39/C 39M – 03, Standard Practice for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens.

[25] Myers Raymond H. Montgomery, D. C. 2002. *Response Surface Methodology: process and product optimization using designed experiment*. A Wiley-Interscience Publication.

[۵] عامری، م.، شهابی شه‌میری، ح. ۱۳۸۸. بررسی تأثیر استفاده از سرباره کنورتور ذوب آهن اصفهان به عنوان جایگزین سنگدانه بر بتن غلتکی روسازی راه. هشتمین کنگره بین‌المللی مهندسی عمران، ایران، شیراز، دانشگاه شیراز.

[6] Sobhan, K., & Mashnad, M. 2001. Roller-compacted fiber concrete pavement foundation with recycled aggregate and wasteplastics. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, (1775): 53-63.

[7] Güneş, E., Gesoğlu, M., Özturan, T. 2004. Properties of rubberized concretes containing silica fume. *Cement and Concrete Research*, 34(12): 2309-2317.

[8] Yazici, S., Mardani-Aghabaglou, A., Tuyan, M., Ute, A. A. 2015. Mechanical properties and impact resistance of roller-compacted concrete containing polypropylene fibre. *Magazine of Concrete Research*, 67(16): 867-875.

[9] Fakhri, M., Saberi, K., F. 2016. The effect of waste rubber particles and silica fume on the mechanical properties of Roller Compacted Concrete Pavement. *Journal of Cleaner Production*, 129: 521-530.

[10] Hesami, S., Modarres, A., Soltaninejad, M., Madani, H. 2016. Mechanical properties of roller compacted concrete pavement containing coal waste and limestone powder as partial replacements of cement. *Construction and Building Materials*, 111: 625-636.

[11] Rao, S. K., Sravana, P., Rao, T. C. 2016. Abrasion resistance and mechanical properties of Roller Compacted Concrete with GGBS. *Construction and Building Materials*, 114: 925-933.

[12] LaHucik, J., Dahal, S., Roesler, J., Amirhanian, A. N. 2017. Mechanical properties of roller-compacted concrete with macro-fibers. *Construction and Building Materials*, 135: 440-446.

[13] Omran, A., Harbec, D., Tagnit-Hamou, A., Gagne, R. 2017. Production of roller-compacted concrete using glass powder: Field study. *Construction and Building Materials*, 133: 450-458.

[14] Huang, B., Shu, X., Li, G. 2005. Laboratory investigation of Portland cement concrete containing recycled asphalt pavements. *Cement and Concrete Research*, 35(10): 2008-2013.

[15] Modarres, A., Hosseini, Z. 2014. Mechanical properties of roller compacted concrete containing rice husk ash with original and recycled asphalt pavement material. *Materials & Design*, 64: 227-236.

[16] Fakhri, M., Amoosoltani, E. 2017. The effect

Modeling of compressive strength of roller-compacted concrete containing reclaimed asphalt pavement using response surface methodology (RSM)

Alireza Ghanizadeh*

Assistant professor in Civil Engineering Department, Civil Engineering College, Sirjan University of Technology

Mohammad Karimi Goghari

Graduated Student, Faculty of Civil and Environmental Engineering, Tarbiat Modarres University, Tehran, Iran

Amir Tavana Amlashi

Graduated Student, Department of Civil Engineering, Sirjan University of Technology, Sirjan, Iran

Abstract

Reclaimed asphalt pavement material (RAP) that are known as reconstruction and asphalt milling debris, constitute a major part of the waste materials. One of the applications that have been considered recently, is the use of these materials (RAP) in mixes such as roller-compacted concrete (RCC). Therefore, in this study, after experimental studies and making 141 concrete samples, 47 unique data of the compressive strength of RCC containing RAP was obtained. Then, response surface methodology (RSM) was used to build a model to predict the compressive strength. The regression coefficient (R^2) of 0.9668 for the developed model, indicated the accuracy of the model. The model showed that in addition to all the basic variables other than fine aggregate, interaction between cement and fine RAP, coarse aggregate and curing time, fine RAP and curing time, curing time square and temperature square, can also be effective in predicting the compressive strength values. Also according to the results of the sensitivity analysis, it was observed that the amount of compressive strength will be increased by increasing the amount of cement and the slope of this increasing in higher amounts of fine RAP was far less. In addition, decreasing the fine RAP or increasing the curing time in a fixed amount of coarse aggregate, will lead to an increase in compressive strength. And also, curing time will have a greater effect on the compressive strength in lower percentage of fine RAP.

Keywords: Roller-compacted concrete (RCC), reclaimed asphalt pavement material (RAP), modeling, compressive strength, response surface methodology (RSM).

* Corresponding Author: Ghanizadeh@sirjantech.ac.ir

