

مطالعه آزمایشگاهی و مدل‌سازی آماری عملکرد روسازی بتن غلتکی حاوی زباله‌های پت، الیاف بازیافتی و پودر متاکائولن

رضا نوروزی، دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان

غلامعلی شفافبخش*، استاد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان

علی خیرالدین، استاد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان

ابوالفضل محمدزاده مقدم، استادیار، گروه عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد

Email: Ghshafabakhsh@semnan.ac.ir

دریافت: ۱۳۹۸/۰۲/۱۱ - پذیرش: ۱۳۹۸/۰۵/۱۶

چکیده

در این مقاله، امکان استفاده از خرده ذرات پت حاصل از بازیافت بطری‌های حاوی مواد آشامیدنی به‌عنوان جایگزین بخش ریزدانه روسازی بتن غلتکی راه‌ها (RCCP) ارزیابی شده است. با هدف ارتقاء عملکرد این محصول، از متاکائولن به‌عنوان جایگزین سیمان و الیاف فولادی به‌دست‌آمده از بازیافت لاستیک وسایل نقلیه استفاده شده است. به‌منظور پوشش کلیه حالت‌های ترکیب متغیرها، از روش سطح پاسخ با توانایی پیش‌بینی روند تغییرات مقادیر پاسخ، در محدوده تغییرات پارامترهای مستقل، بهره گرفته شده است. این روش، با تعیین ۲۰ طرح آزمایش، صرفه‌جویی زمان و هزینه با امکان تحلیل کامل نتایج را در اختیار گذاشته است. در این فرایند، عملکرد نمونه‌های RCCP در تعیین مقادیر جذب آب، میزان تخلخل، سرعت امواج آلتراسونیک و میزان مقاومت فشاری در سنین ۷ و ۲۸ روز بررسی گردیده است. مدل‌سازی پاسخ‌ها بر اساس تحلیل واریانس صورت گرفته و بهترین مدل برای هر پاسخ برآورد شده است. همچنین، بهترین درصد استفاده از مصالح (طرح بهینه)، با انجام بهینه‌سازی چندهدفه روی مدل‌های تهیه شده، تعیین شده است. براساس نتایج، استفاده از پت باعث افزایش میزان جذب آب و تخلخل مخلوط و کاهش مقاومت فشاری و سرعت امواج آلتراسونیک در نمونه‌های مورد آزمایش گردیده است. همچنین، کاربرد متاکائولن به‌طور کلی بهبود مقاومت فشاری و سرعت امواج آلتراسونیک و کاهش تخلخل و جذب آب مخلوط را به‌دنبال داشته است. الیاف فولادی بازیافتی عموماً وابسته به دیگر اجزای مخلوط رفتار کرده‌اند. محصول نهایی پیشنهاد شده بر مبنای بهینه‌سازی مدل‌های آماری، مخلوط RCCP با سهم ۲۹ درصدی جایگزینی حجم مصالح ریزدانه با پت، ۲۰٪ وزن سیمان با پودر متاکائولن و افزودن الیاف بازیافتی به‌میزان ۲٪ از وزن کل مخلوط (معادل ۰/۷۲ حجم مخلوط) می‌باشد. این محصول، ضمن تأمین مقاومت سازه‌ای، حفظ منابع طبیعی، بازیافت پاک زباله‌ها، کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای و صرفه‌جویی اقتصادی را به ارمغان خواهد آورد.

واژه‌های کلیدی: روسازی بتن غلتکی، ذرات بازیافتی پت، متاکائولن، الیاف فولادی بازیافتی، روش سطح پاسخ

۱. مقدمه

همکاران، ۲۰۰۷؛ صدرممتازی و همکاران، ۲۰۱۶) و صرفه جویی های اقتصادی نام برد.

به طور مرسوم، سنگدانه ها حدود ۶۵ تا ۸۰ درصد از حجم بتن را به خود اختصاص داده و دارای نقش مهمی در تعیین خصوصیات بتن از قبیل کارایی، مقاومت، پایداری ابعاد و دوام می باشند (سایکیا و دبریتو، ۲۰۱۴). استفاده از ذرات پلاستیکی به عنوان جایگزین مصالح سنگی در بتن، باعث ارتقاء مشخصه چغرمگی و مقاومت خمشی نمونه ها و افزایش جذب انرژی آن می گردد؛ ویژگی ای که در انواع سازه های در معرض بارگذاری های دینامیک و ضربه ای مورد توجه می باشد (هناوی و همکاران، ۲۰۱۰). جایگزینی مصالح سنگی طبیعی با سنگدانه های بازیافتی پت، باعث کاهش بار مرده بتن، ارتقای نفوذپذیری و کاهش جذب آب در مقایسه با بتن های معمولی می گردد (رحیمی و همکاران، ۲۰۱۶). در عین حال، افزودن مقادیر زیاد مواد پلاستیکی، منجر به کاهش قابلیت های باربری و افت عملکرد مکانیکی نمونه های بتنی در تحقیقات گوناگون شده است. جایگزینی بیش از ۵۰٪ مصالح سنگی با مصالح بازیافتی پلاستیکی، منجر به کاهش قابل توجه خصوصیات مکانیکی کمپوزیت ها می گردد (مرزوک و همکاران، ۲۰۰۷). این آثار نامطلوب را می توان ناشی از افت مقاومت به وجود آمده بین سنگدانه های پت و خمیر سیمان در مقایسه با چسبندگی مناسب بین مصالح طبیعی در شرایط معمول دانست (آکچائو زغلو و آتیش، ۲۰۱۱؛ آکچائو زغلو و همکاران، ۲۰۱۳؛ فریجیون، ۲۰۱۰؛ گاولا و همکاران، ۲۰۰۴). مهم ترین علت کاهش این چسبندگی، افت هیدراتاسیون سیمان که غالباً ناشی از طبیعت آب گریز پلاستیک می باشد، گزارش شده است (سایکیا و دبریتو، ۲۰۱۲؛ صدیق و همکاران، ۲۰۰۸).

سیمان به عنوان یکی از اجزای گران و انرژی بر بتن به شمار می رود. برای تولید هر تن سیمان، بین ۰/۵ تا ۱ تن دی اکسید کربن در جو منتشر می گردد (خطیب و همکاران، ۲۰۱۸). یکی از افزودنی های معدنی نسل جدید با فعالیت پوزولانی بالا و قابل استفاده به عنوان جایگزین بخشی از سیمان در بتن، متاکائولن می باشد. متاکائولن یک ماده آلومینوسیلیکاتی است که اصولاً از کلسینه

بتن در دومین رده از منابع پرمصرف دنیا و بعد از آب شناخته می شود. مصالحی که تولید آن نابودی منابع طبیعی و آلودگی های زیست محیطی را به دنبال دارد. لذا، بررسی قابلیت انواع مصالح برای جایگزینی سنگدانه ها، سیمان و الیاف تسلیح بتن، از جنبه های مختلفی شامل حفظ منابع طبیعی، بازیافت زباله ها و صرفه جویی اقتصادی مفید خواهد بود. تولید روزافزون پسماندهای حاصل از زندگی بشری، هدررفت منابع طبیعی و تخریب محیط زیست تمامی جانداران را به دنبال دارد. حجم انبوه پلاستیک ها و پلیمرهای بسته بندی مواد غذایی یک نمونه از این موارد است. بطری های مورد استفاده برای بسته بندی نوشیدنی ها و مایعات، عمدتاً از پلیمر پلی اتیلن ترفتالات (پت) ساخته می شوند. در سال ۲۰۱۰، میزان تولید کل مواد پلاستیکی ۲۶۵ میلیون تن بوده است. در همان سال، اروپا ۵۷ میلیون تن از این مواد را تولید کرده که ۳۹ درصد از این مقدار برای تقاضای بسته بندی صرف شده است (دورمر و همکاران، ۲۰۱۳). فرایند تولید و بازیافت بطری های پلاستیکی، هر دو از اقدامات مخرب برای محیط زیست محسوب می شوند (گارفورس و همکاران، ۲۰۰۴؛ کومار و همکاران، ۲۰۱۱).

یکی از راهکارهای بازیافت پسماندهای پلاستیکی، استفاده به عنوان جایگزین مصالح روسازی در راهها می باشد. در این زمینه، روسازی بتن غلتکی (RCCP^۱) با قابلیت اجرای سریع و اقتصادی (نایک و همکاران، ۲۰۰۱) و امکان استفاده در انواع راهها و محوطه انواع کاربری ها (با یا بدون روکش نازک آسفالتی)، گزینه مناسبی خواهد بود. استفاده گسترده این نوع روسازی در سطح دنیا، پتانسیل مناسبی در بهره برداری مجدد پسماندها را در اختیار قرار خواهد داد. به عنوان نمونه، تا سال ۲۰۰۸، سطح کل انواع روسازی های بتن غلتکی در ایالات متحده از مرز ۸ میلیون متر مربع عبور کرده است (پیتمن و اندرتون، ۲۰۰۹). مهم ترین منافع استفاده از زباله های پت در بتن را می توان در بازیافت زباله ها، ذخیره منابع طبیعی، جلوگیری از آلودگی های محیط زیست (جو و

^۱- Roller Compacted Concrete Pavement

مقدار بیشینه تنش خمشی نمونه‌های حاوی الیاف بازیافتی از لاستیک و الیاف فولادی صنعتی، مستقل از نوع الیاف و وابسته به نسبت الیاف می‌باشد (نتوکلئوس و همکاران، ۲۰۰۶).

بر اساس تحقیقات متعدد مورد اشاره، غالباً رفتار نمونه‌های بتنی متأثر از یک یا دو متغیر و در قالب مطالعات آزمایشگاهی مورد ارزیابی قرار گرفته است. لذا، تأثیر استفاده همزمان خرده ذرات پت، پودر متاکائولن و الیاف بازیافتی بر خصوصیات مکانیکی نمونه‌های بتن غلتکی و مدل‌سازی و بهینه‌سازی این مشخصه‌ها شناسایی نشده است. هدف اصلی تحقیق حاضر، تهیه بتن غلتکی سبز روسازی با به‌کارگیری مجموعه‌ای از مصالح دوست‌دار محیط‌زیست می‌باشد. در این راستا و به دنبال پیگیری اهداف مثبت برشمرده شده در کاربرد مصالح بازیافتی در بتن، در کنار استفاده از ذرات پولکی پت به‌عنوان جایگزین ماسه، از الیاف فولادی بازیافت شده از لاستیک فرسوده وسایل نقلیه، به‌عنوان ابزار تسلیح بتن غلتکی استفاده شده است. کاربرد این مصالح، ضمن رعایت صرفه اقتصادی و تأمین مشخصه‌های زیست‌محیطی، انتظار عملکردی قابل قبول و مخلوطی یکپارچه از نمونه‌های RCCP را به دست می‌دهد. کاربرد متاکائولن به‌عنوان جایگزین سیمان، باعث تأمین پایداری مخلوط بتنی در اختلاط این مصالح بازیافتی می‌گردد. شناسایی تأثیر هر یک از این مصالح در رفتار بتن غلتکی همراه با تعیین درصد بهینه ترکیب مواد سه‌گانه در مخلوط RCCP با شرایط تأمین حداقل ویژگی‌های مکانیکی قابل قبول، به‌عنوان نتیجه نهایی تحقیق به‌شمار می‌رود.

این تحقیق به تعیین پاسخ نمونه‌های RCCP به آزمایش مقاومت فشاری و سرعت امواج التراسونیک نمونه‌های مکعبی در سن ۷ و ۲۸ روز در کنار میزان جذب آب و تخلخل نمونه ۲۸ روزه پرداخته است. روش سطح پاسخ (RSM^۱) برای تخمین مدل‌های رگرسیونی بر پایه نتایج آزمایش‌ها و سپس تعیین نسبت‌های اختلاط مصالح سه‌گانه معرفی شده به‌منظور دستیابی به عملکرد بهینه RCCP به‌کار گرفته شده است. استفاده از این تحلیل آماری، تعداد نمونه‌های مورد آزمایش را به ۲۰ طرح- با

نمودن رس‌های کائولن در محدوده دمایی °C ۶۰۰ تا °C ۸۰۰ به دست می‌آید (ایلیچ و همکاران، ۲۰۱۰). انرژی مورد نیاز برای تولید این ماده پوزولانی به مراتب کمتر از انرژی مورد نیاز برای تهیه سیمان می‌باشد (خطیب و همکاران، ۲۰۱۸). متاکائولن توسط بسیاری از محققین به‌عنوان جایگزین بخشی از سیمان در بتن‌های حاوی سنگدانه‌های طبیعی به‌کار رفته و بهبود مناسبی در خصوصیات مکانیکی و دوام نمونه‌ها داده است (دادستان و بای، ۲۰۱۷؛ نوآکلونگ و همکاران، ۲۰۱۸؛ صیدیق و کلاوس، ۲۰۰۹؛ ویملگوا و همکاران، ۲۰۱۰). متاکائولن طی واکنش با هیدروکسید کلسیم در شکل‌گیری ثانویه ژل C-S-H، باعث ارتقاء عملکرد بتن می‌گردد (دینگ و لی، ۲۰۰۲). استفاده از متاکائولن منجر به کاهش میزان جذب آب و حجم فضاهای خالی موجود در بتن می‌شود (مودولی و موخارجی، ۲۰۱۹؛ سایبر و همکاران، ۲۰۰۱). این ماده سبب بهبود خصوصیات انتقالی از قبیل نفوذ آب، نفوذ گاز، جذب آب، مقاومت الکتریکی و پراکنش یون‌ها و در نتیجه پایداری مخلوط‌های بتنی می‌شود (شکرچی و همکاران، ۲۰۱۰). همچنین، استفاده از متاکائولن به‌عنوان جایگزین بخشی از سیمان و یا ماسه، می‌تواند بهبود مقاومت در برابر خوردگی برای آرماتورها را نتیجه دهد (باتیس و همکاران، ۲۰۰۵).

استفاده از الیاف تقویت‌کننده داخل مخلوط بتن، منجر به بهبود محسوس خواص مقاومتی بتن و اصطکاک سطح رویه بتنی می‌گردد. الیاف مورد استفاده برای تسلیح بتن، توانایی کنترل انتشار ترک‌ها را دارد (چانگ و چای، ۱۹۹۵؛ لی و بار، ۲۰۰۴؛ لی و ماتسوموتو، ۱۹۹۸؛ روسی و پرنت، ۲۰۰۸). مهم‌ترین نقطه ضعف این پیشنهاد را می‌توان افزایش هزینه‌های ناشی از کاربرد فولاد برای دستیابی به خصوصیات مکانیکی مطلوب برشمرده (شاه و رنگان، ۱۹۷۱) که در صورت به‌کارگیری الیاف فولادی بازیافتی، این معضل مرتفع خواهد گردید. براساس نتایج تحقیقات گوناگون، عملکرد سازه‌های بتن‌های مسلح شده با الیاف فولادی بازیافت شده از لاستیک فرسوده و وسایل نقلیه، مشابه با بتن‌های مسلح شده با الیاف فولادی اولیه می‌باشد (آیلو و همکاران، ۲۰۰۹؛ پیلاکوتاس و همکاران، ۲۰۰۴؛ تلمات، ۲۰۰۴).

^۱- Response surface methodology

سیمان پرتلند تیپ II (سیمان شرق مشهد) و متاکائولن تولید شده در کشور هندوستان در جدول ۱ ارائه شده است. وزن مخصوص سیمان و متاکائولن مصرفی به ترتیب ۳۱۰۰ و ۲۶۳۰ کیلوگرم بر متر مکعب می باشد. در این تحقیق، پودر متاکائولن نشان داده شده در شکل ۲-الف به میزان صفر تا ۲۰ درصد وزن سیمان جایگزین شده است.

مصالح پت نمایش داده شده در شکل ۲-ب، از کارخانجات بازیافت تولید پرک پت تهیه شده است. خرده های پت پولکی استفاده شده، در فرایند آسیاب بطری های نوشیدنی و به عنوان مصالح عبوری از غربال های چندگانه نصب شده در کارخانه بازیافت به دست آمده است. وزن مخصوص این مصالح 1093 kg/m^3 و با توجه به بررسی تحقیقات پیشین، بزرگترین اندازه استفاده شده به عنوان جایگزین ریزدانه بتن، ۴ میلی متر انتخاب شده است. دانه بندی مصالح اولیه به دست آمده از آسیاب، در جدول ۲ ارائه شده است. ذرات پت بازیافتی به عنوان جایگزین صفر تا ۵۰ درصد حجمی مصالح ریزدانه طبیعی (بین الک های شماره ۲۰۰ و ۴) در نظر گرفته شده است. خرده الیاف بازیافتی فولادی (SRSF^1) نمایش داده شده در شکل ۲-ج، طی فرایند مکانیکی بازیافت لاستیک فرسوده وسایل نقلیه در کارخانه بازیافت لاستیک به دست آمده است. به منظور حذف مواد زائد مانند خرده های لاستیک و جدا نمودن قطعات بزرگتر الیاف، مصالح تهیه شده از الک شماره ۸ عبور داده شده اند (تلمات، ۲۰۰۴). الیاف مصرفی به طور متوسط دارای قطر $0/2$ میلی متر و طول متغیر ۳ تا ۵۰ میلی متر بوده اند. خرده الیاف بازیافتی به عنوان افزودنی و به میزان صفر تا ۲ درصد از وزن مخلوط (معادل صفر تا $0/72$ درصد حجمی) استفاده شده است.

تکرارهای مورد نیاز- تقلیل بخشیده و صرفه جویی قابل توجهی در زمان و هزینه مطالعات آزمایشگاهی به دنبال داشته است.

۲. فرایند آزمایش ها

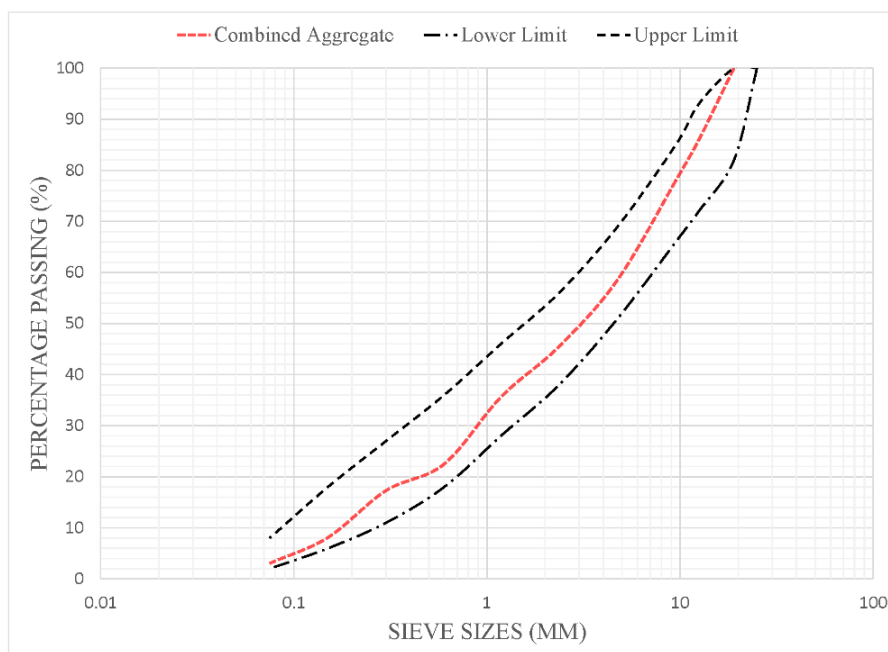
۲-۱. خصوصیات مصالح

مصالح اصلی استفاده شده برای تهیه نمونه های آزمایشگاهی RCCP تحقیق حاضر از سنگدانه های شکسته ریز و درشت، سیمان پرتلند معمولی تیپ II و آب آشامیدنی شهری می باشد. به عنوان جایگزین مصالح سنگی ریزدانه، از ذرات پت و از پودر متاکائولن به عنوان جایگزین بخشی از سیمان بهره گرفته شده است. همچنین، الیاف فولادی به دست آمده از بازیافت لاستیک فرسوده وسایل نقلیه، با هدف تسلیح بتن به مخلوط اضافه شده است.

مصالح سنگی مورد نیاز از معادن سنگ حومه شهر مشهد، با بزرگترین اندازه 19 mm تهیه شده است. بر اساس روش های ASTM C127 و ASTM C128 مقدار جذب آب مصالح سنگی درشت دانه و ریزدانه به ترتیب $0/64$ و $3/08$ درصد و وزن مخصوص توده ای آن ها به ترتیب 2550 و 2680 کیلوگرم بر متر مکعب می باشد. وزن مخصوص ظاهری مصالح فیلر بنا به روش ASTM D854 به میزان 2720 kg/m^3 به دست آمده است. به منظور دستیابی به حدود دانه بندی مشخص شده در ACI 211.3R برای ساخت نمونه های RCCP، دپوهای مصالح به تفکیک دانه بندی شده و درصدهای مورد نیاز از هر کدام برآورد گردیده است. نتیجه ی ترکیب مصالح سنگی در شکل ۱ ارائه شده است.

مصالح چسباننده در ساخت نمونه های RCCP شامل سیمان و متاکائولن بوده است. مشخصات شیمیایی

^۱- Shredded Recycled Steel Fiber



شکل ۱. دانه بندی ترکیب مصالح سنگی

جدول ۱. آنالیز شیمیایی ترکیبات سیمان و متاکائولن

| L.O.I | K ₂ O | Na ₂ O | SO ₃ | MgO | CaO | Fe ₂ O ₃ | Al ₂ O ₃ | SiO ₂ | |
|-------|------------------|-------------------|-----------------|------|-------|--------------------------------|--------------------------------|------------------|---------------|
| ۱/۶ | ۰/۴۵ | ۰/۵ | ۲/۱ | ۲/۹ | ۶۲/۵ | ۳/۸۵ | ۴/۶۵ | ۲۱/۱ | سیمان (/) |
| ۳/۵۳ | ۱/۴۱ | <۰/۱۰ | - | ۰/۸۱ | <۰/۱۰ | ۴/۲۱ | ۳۶/۳ | ۵۲/۸ | متاکائولن (/) |



شکل ۲. مصالح مورد استفاده برای ساخت نمونه های مورد آزمایش: الف) متاکائولن، ب) پت و ج) الیاف

جدول ۲. مشخصات دانه بندی ذرات پت بازیافتی

| | | | | | | | | | | |
|-----|-------|-------|-------|-------|------|------|------|------|-------|-----------------------|
| ۱۹ | ۱۲/۵ | ۹/۵ | ۴/۷۵ | ۲/۳۶ | ۱/۱۸ | ۰/۶ | ۰/۳ | ۰/۱۵ | ۰/۰۷۵ | اندازه الک (میلی متر) |
| ۱۰۰ | ۹۹/۸۹ | ۹۹/۷۴ | ۸۵/۷۰ | ۵۶/۴۰ | ۶/۱۳ | ۲/۵۳ | ۱/۴۷ | ۰/۸۴ | ۰/۳۴ | درصد عبوری ذرات پت |

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} x_i^2 + \sum_i \sum_j \beta_{ij} x_i x_j + \varepsilon \quad (1)$$

در این رابطه، y پاسخ برآورد شده، x_i و x_j مقادیر کد شده ی متغیرهای مورد مطالعه، i ضریب خطی، ii ضریب مرتبه دوم، ij ضریب اندرکنش ها، β ضریب رگرسیون، k تعداد متغیرهای مستقل مورد مطالعه و بهینه شده در آزمایش ها و ε خطای تصادفی می باشد (آلداده و همکاران، ۲۰۱۳؛ مونتگومری، ۲۰۱۳).

مدل های به دست آمده از روش RSM در این مطالعه، برای مخلوط های RCCP با جایگزینی متاکائولن به مقدار صفر تا ۲۰ درصد از وزن سیمان، خرده ذرات پت بازیافتی به میزان صفر تا ۵۰ درصد حجمی ریزدانه و افزودن صفر تا ۲ درصد وزن مخلوط الیاف فولادی بازیافتی معتبر خواهند بود. این نسبت های جایگزینی براساس توصیه تحقیقات پیشین و انجام آزمایش ها اولیه انتخاب شده اند. معیارهایی از قبیل نکات اقتصادی، مسائل تکنیکی و قابلیت دستیابی به نمونه های اجرایی مهم ترین موارد مد نظر بوده است. همچنین، پاسخ های مدل سازی شده نیز شامل جذب آب بتن، سرعت امواج التراسونیک و مقاومت فشاری نمونه در سنین ۷ و ۲۸ روز بوده اند.

دسته بندی نسبت های اختلاط در روش CCD در سه بخش معرفی می گردد: بخش فاکتوریل جزئی، بخش مرکزی و بخش محوری. این دسته بندی، معرف چگونگی تغییرات پارامترهای مستقل و تعیین کننده تعداد نسبت های مورد نیاز آزمایش ها هستند. شماره طرح های متناظر با این سه بخش و همچنین مقادیر کد شده و کران های متغیرهای X_1 تا X_3 در جدول ۳ ارائه شده است.

در تحقیق حاضر، فرایند RSM، مشتمل بر مراحل طراحی آزمایش ها، تحلیل های آماری پاسخ ها و بهینه سازی مدل ها، با استفاده از نرم افزار Design Expert 11.0.4 انجام پذیرفته است. در این فرایند، ارزیابی اندرکنش های بین پارامترهای مختلف، در کنار تأثیرات هر پارامتر مستقل با استفاده از آنالیز واریانس (ANOVA) صورت گرفته است.

۲-۲. طراحی آزمایش ها

روش سطح پاسخ (RSM) توسط باکس و ویلسون در ۱۹۵۱ به منظور کمک به ارتقای فرایندهای تولید در صنعت شیمی توسعه یافته است. روش سطح پاسخ مجموعه ای از تکنیک های آماری و ریاضی است که برای فرمولاسیون و بهینه سازی عوامل دخیل در تولید محصولات جدید قابل استفاده است (میرز و همکاران، ۲۰۰۹). کاربرد این روش در فرایند پژوهش، امکان پیش بینی طرح نهایی را با تعداد آزمایش های کمتر فراهم ساخته، منجر به کاهش تعداد سعی و خطاها و در نتیجه هزینه های مواد و ساخت خواهد گردید.

هدف از طراحی سطح پاسخ، دو نکته است: (۱) مکانیابی یک درمان ممکن از اختلاط متغیرهای مستقل که در آن میانگین پاسخ ماکزیمم (یا مینیمم، یا مساوی مقدار معینی برای هدف) باشد و (۲) تخمین سطح پاسخ در مجاورت این موقعیت یا محدوده مناسب، به منظور فهم بهتر تأثیرات "موضعی" متغیرها بر میانگین پاسخ (دین و ووس، ۱۹۹۱). یکی از راهکارهای دستیابی به اهداف، شامل جمع آوری مشاهدات در محل هر یک از نقاط شبکه ترکیب های متغیرها می باشد. این شبکه، به گستردگی کل محدوده مورد توجه آزمایش ها می باشد.

RSM یک ارتباط تقریبی (تابع F) بین پاسخ های صحیح y و چندین متغیر طراحی، براساس داده های مشاهده شده در فرایند تحقیق را در اختیار قرار می دهد (لپاداتو و همکاران، ۲۰۰۵ و ۲۰۰۶). رایج ترین روش طراحی مورد استفاده برای یافتن این تابع ارتباطی بین پاسخ و متغیرها با استفاده از RSM، روش 1^{11} CCD می باشد (آلداده و همکاران، ۲۰۱۳).

در بسیاری از حالات و به طور معمول، تابع تقریب F برای پاسخ های صحیح y به صورت یک مدل چند جمله ای درجه یک و یا درجه دو انتخاب می شود. به منظور افزایش دقت پیش بینی، عمدتاً مدل درجه دوم به دست آمده از توزیع سری تیلور تابع F (میرز و همکاران، ۲۰۰۹) برای تخمین منحنی های پاسخ به شرح زیر استفاده می شود:

^۱- Central Composite Design

جدول ۳. حدود و مقادیر کد شده متغیرها

| مقدار کد شده | | | | | بازه تغییرات (%) | متغیر |
|--------------|------|----|------|----|------------------|------------------------------|
| +۲ | +۱ | ۰ | -۱ | -۲ | | |
| ۲۰ | ۱۵ | ۱۰ | ۵ | ۰ | (۰-۲۰) | X ₁ = (متاکائولن) |
| ۵۰ | ۳۷/۵ | ۲۵ | ۱۲/۵ | ۰ | (۰-۵۰) | X ₂ = (پت) |
| ۲ | ۱/۵ | ۱ | ۰/۵ | ۰ | (۰-۲) | X ₃ = (الیاف) |

| دسته بندی اختلاطها | | | | |
|--------------------|----------------|----------------|-----------|---------------|
| X ₃ | X ₂ | X ₁ | شماره طرح | اجزای CCD |
| ±۱ | ±۱ | ±۱ | ۱-۸ | فاکتوریل جزئی |
| ۰ | ۰ | ۰ | ۱۵-۲۰ | نقطه مرکزی |
| ۰ و ±۲ | ۰ و ±۲ | ۰ و ±۲ | ۹-۱۴ | بخش محوری |

۳-۲. سهم ترکیبات

با توجه به هدف طراحی روسازی بتن غلتکی راه‌ها، از بین روش‌های تعیین نسبت‌های مخلوط، بر اساس آزمایش‌های روانی بتن و روش‌های تراکم خاک، روش دوم برای نمونه‌های با حداکثر اندازه سنگدانه ۱۹ میلی‌متر استفاده شده است. نسبت‌های اختلاط، با استفاده از روش تراکم خاک و مطابق استاندارد ACI 211.3R-02 R09 تعیین شده است. بدین منظور، برای تعیین رطوبت بهینه مورد نیاز ساخت نمونه‌های RCCP، روش استاندارد ASTM

D1557 مورد استفاده قرار گرفته است. میزان سیمان مصرفی در RCCP بین ۱۰ تا ۱۷ درصد وزن خشک مصالح سنگی می‌باشد که متناظر با ۲۰۸-۳۵۶ kg/m³ خواهد بود (کمیته ACI 211، ۲۰۰۹). در تحقیق حاضر، این نسبت برابر با ۱۵٪ در نظر گرفته شده است. برای انتخاب درصد‌های استفاده از مصالح افزودنی، طراحی آزمایش‌ها براساس روش CCD انجام شده است. نسبت‌های اجزای اصلی و مصالح جایگزین شده در طرح‌های به‌دست آمده از این روش در جدول ۴ ارائه شده است.

جدول ۴. نسبت‌های مخلوط در نمونه‌های RCCP

| شماره طرح | X ₁ متاکائولن (درصد وزنی) | X ₂ پت (درصد حجمی) | X ₃ الیاف (درصد وزنی) | کیلوگرم برای یک متر مکعب بتن | | | |
|-----------|--|-------------------------------------|--|------------------------------|---------|--------|--------|
| | | | | درشت‌دانه | ریزدانه | سیمان | آب |
| ۱ | ۱۵ | ۳۷/۵ | ۰/۵ | ۴۹۳/۸۶ | ۸۷۸/۵۱ | ۲۴۲/۱۸ | ۱۵۲/۵۹ |
| ۲ | ۵ | ۳۷/۵ | ۱/۵ | ۵۰۰/۴۵ | ۸۹۰/۲۲ | ۲۷۴/۲۸ | ۱۴۱/۵۶ |
| ۳ | ۱۵ | ۱۲/۵ | ۰/۵ | ۴۹۸/۳۲ | ۱۲۴۱/۰۱ | ۲۴۴/۳۷ | ۱۴۵/۱۲ |
| ۴ | ۵ | ۳۷/۵ | ۰/۵ | ۴۹۷/۹۶ | ۸۸۵/۸۰ | ۲۷۲/۹۲ | ۱۴۵/۷۳ |
| ۵ | ۵ | ۱۲/۵ | ۰/۵ | ۵۰۰/۱۰ | ۱۲۴۵/۴۴ | ۲۷۴/۰۹ | ۱۴۲/۱۵ |
| ۶ | ۱۵ | ۳۷/۵ | ۱/۵ | ۴۹۸/۶۳ | ۸۸۶/۹۹ | ۲۴۴/۵۲ | ۱۴۴/۶۰ |
| ۷ | ۵ | ۱۲/۵ | ۱/۵ | ۴۹۹/۴۱ | ۱۲۴۳/۷۳ | ۲۷۳/۷۲ | ۱۴۳/۲۹ |
| ۸ | ۱۵ | ۱۲/۵ | ۱/۵ | ۴۹۹/۲۰ | ۱۲۴۳/۲۰ | ۲۴۴/۸۰ | ۱۴۳/۶۵ |
| ۹ | ۱۰ | ۰ | ۱ | ۴۹۷/۹۷ | ۱۴۱۷/۳۱ | ۲۵۸/۵۶ | ۱۴۵/۷۱ |
| ۱۰ | ۰ | ۲۵ | ۱ | ۴۹۹/۹۷ | ۱۰۶۷/۲۴ | ۲۸۸/۴۴ | ۱۴۲/۳۶ |
| ۱۱ | ۱۰ | ۲۵ | ۰ | ۵۰۰/۴۴ | ۱۰۶۸/۲۵ | ۲۵۹/۸۵ | ۱۴۱/۵۷ |
| ۱۲ | ۱۰ | ۵۰ | ۱ | ۴۹۹/۹۸ | ۷۱۱/۵۱ | ۲۵۹/۶۱ | ۱۴۲/۳۴ |
| ۱۳ | ۲۰ | ۲۵ | ۱ | ۵۰۰/۳۳ | ۱۰۶۸/۰۱ | ۲۳۰/۹۲ | ۱۴۱/۷۶ |
| ۱۴ | ۱۰ | ۲۵ | ۲ | ۴۹۹/۹۰ | ۱۰۶۷/۱۰ | ۲۵۹/۵۷ | ۱۴۲/۴۷ |

| | | | | | | | | | | |
|-------|-------|--------|--------|--------|---------|--------|---|----|----|----|
| ۲۱/۳۵ | ۲۸/۴۷ | ۱۵۰/۵۱ | ۱۵۳/۱۹ | ۲۵۶/۲۴ | ۱۰۵۳/۴۴ | ۴۹۳/۵۰ | ۱ | ۲۵ | ۱۰ | ۱۵ |
| ۲۱/۳۵ | ۲۸/۴۷ | ۱۵۰/۵۱ | ۱۵۳/۱۹ | ۲۵۶/۲۴ | ۱۰۵۳/۴۴ | ۴۹۳/۵۰ | ۱ | ۲۵ | ۱۰ | ۱۶ |
| ۲۱/۳۵ | ۲۸/۴۷ | ۱۵۰/۵۱ | ۱۵۳/۱۹ | ۲۵۶/۲۴ | ۱۰۵۳/۴۴ | ۴۹۳/۵۰ | ۱ | ۲۵ | ۱۰ | ۱۷ |
| ۲۱/۳۵ | ۲۸/۴۷ | ۱۵۰/۵۱ | ۱۵۳/۱۹ | ۲۵۶/۲۴ | ۱۰۵۳/۴۴ | ۴۹۳/۵۰ | ۱ | ۲۵ | ۱۰ | ۱۸ |
| ۲۱/۳۵ | ۲۸/۴۷ | ۱۵۰/۵۱ | ۱۵۳/۱۹ | ۲۵۶/۲۴ | ۱۰۵۳/۴۴ | ۴۹۳/۵۰ | ۱ | ۲۵ | ۱۰ | ۱۹ |
| ۲۱/۳۵ | ۲۸/۴۷ | ۱۵۰/۵۱ | ۱۵۳/۱۹ | ۲۵۶/۲۴ | ۱۰۵۳/۴۴ | ۴۹۳/۵۰ | ۱ | ۲۵ | ۱۰ | ۲۰ |

۲-۴. آماده سازی نمونه ها

نسبت های اختلاط اجزای تشکیل دهنده بتن ارائه شده در جدول ۴، با استفاده از میکسر آزمایشگاهی مخلوط شده است. ترتیب اختلاط شامل ابتدا اختلاط سنگدانه های ریز و درشت و خرده ذرات پت (در صورت وجود)، سپس ماده چسباننده و در انتها الیاف بود. آب طرح نیز در سه مرحله و قبل از افزودن الیاف به مصالح اضافه گردیده است. تراکم مناسب نمونه های بتن غلتکی در آزمایشگاه، مهم ترین وجه تمایز فرایند تولید آن با بتن های معمولی

است. بدین منظور، از چکش و بیراتور مطابق ASTM C1435 استفاده شده است. قالب های مکعبی ۱۰×۱۰×۱۰ سانتی متر در سه لایه ی مجزا و با کمک صفحه فولادی متصل به چکش لرزاننده متراکم گردیده است. قالب های بتن ریزی شده شکل ۳، به مدت ۲۴ ساعت در محیط استاندارد و با پوشش گونی مرطوب و روکش پلاستیک نگهداری شده و پس از خروج از قالب، در حوضچه آب تا سن مورد نظر نگهداری گردیده اند.



شکل ۳. فرایند ساخت نمونه ها؛ الف) نمونه های RCCP متراکم شده و ب) نمونه خروجی حوضچه عمل آوری

۲-۵. روش انجام آزمایش ها

تعیین مقاومت های فشاری و سرعت امواج التراسونیک نمونه ها در سنین ۷ و ۲۸ روز مورد بررسی قرار گرفته است (شکل ۴). تست مخرب مقاومت فشاری بر نمونه های مکعبی، مطابق BS-1881-Part-116 انجام گردیده است. آزمایش غیرمخرب سرعت امواج التراسونیک نیز براساس ASTM C597 صورت پذیرفته است. به منظور تعیین سرعت امواج عبوری از نمونه های مکعبی مورد آزمایش، دستگاه شکل ۴ و رابطه ۲ استفاده شده است:

$$V = L/T \quad (2)$$

که در آن V، سرعت امواج التراسونیک بر حسب متر بر ثانیه، L فاصله بین مرکز وجوه مبدل های دستگاه بر حسب متر و T زمان انتقال بر حسب ثانیه می باشد. میزان جذب آب نمونه های مورد آزمایش مطابق ASTM C642 و براساس رابطه ۳ تعیین شده است:

$$\text{درصد جذب آب} = [(B - A)/A] \times 100 \quad (3)$$

که در آن A جرم نمونه ی خشک شده توسط گرمکن بر حسب گرم و B جرم نمونه با سطح خشک بعد از غوطه وری و اشباع است.

در نهایت، برای ارزیابی تخلخل طرح های مورد آزمایش و شناخت تغییرات آن با استفاده از مواد افزوده

با W_2 جرم نمونه خشک شده در گرمکن برحسب کیلوگرم و W_1 جرم نمونه غوطه‌ور در آب می‌باشد.

شده، میزان تخلخل نمونه‌های RCCP مطابق رابطه ۴ برآورد گردیده است:

$$P = \left(1 - \left(\frac{W_2 - W_1}{V \cdot \rho_w} \right) \right) \times 100 \quad (4)$$

در این رابطه، P درصد کل تخلخل نمونه بتن غلتکی، V حجم نمونه مورد آزمایش (cm^3)، ρ_w چگالی آب که برابر



شکل ۴. مراحل انجام آزمایش‌ها بر نمونه‌ها: الف) آزمایش مقاومت فشاری و ب) اندازه‌گیری سرعت امواج التراسونیک

پیش‌بینی شده است، بایستی برای یک مدل مشخص به اندازه کافی به عدد ۱ نزدیک باشد تا آن مدل به صورت معنی‌دار شناخته شود.

اطلاعات کلی مدل و نحوه اثرگذاری هر کدام از متغیرهای مستقل بر مقدار پاسخ، در جدول ۵ ارائه شده است. مدل‌سازی نتایج آزمایشگاهی و تحلیل ANOVA در سطح خطای ۵٪ انجام شده است. مقدار p-value نشان داده شده در جدول ۵ بیانگر معنی‌داری پارامترهای تعریف شده مورد آزمایش در مقادیر نتایج می‌باشد. چنانچه مدلی دارای p-value کمتر از ۰/۰۵ باشد، به-عنوان یک متغیر معنی‌دار بر نتایج آزمایش شناخته شده و نشان می‌دهد مشارکت متغیر پیشنهادی دارای تأثیر قابل توجهی بر پاسخ مورد آزمایش خواهد بود. همچنین، ضرایب مربوط به مدل‌های رگرسیونی در جدول ۶ مشاهده می‌شود. در جدول ضرایب، متغیرهای مدل‌ها در قالب مقادیر واقعی خود ارائه شده‌اند. ضرایب مدل، با استفاده از آنالیز رگرسیون چندگانه و با فرض توزیع نرمال تعیین گردیده است.

۳. نتایج و بحث

مدل‌سازی آماری نتایج آزمایش‌ها همراه با تحلیل ANOVA و با کمک نرم‌افزار انجام پذیرفته است. بدین منظور، تابع چندجمله‌ای دارای بهترین برازش به مقادیر پاسخ‌های نمونه‌های آزمایشگاهی توسط نرم‌افزار تخمین زده شده است. به منظور تعیین مدل مناسب برای پاسخ‌های به‌دست آمده از فرایند آزمایشگاهی، آنالیز رگرسیون براساس یک مدل جزئی^۱ که شامل عباراتی است که به لحاظ آماری در سطح ۰/۰۵ معنی‌دار هستند، اجرا می‌گردد. بدین منظور، آماره t^2 محاسبه شده و عباراتی که از لحاظ آماری بی‌معنی هستند، حذف می‌گردند. مادامی که مدل جزئی فقط حاوی عبارات معنی‌دار گردد، این فرایند تکرار می‌شود. داده‌های آزمایشگاهی با کمک آنالیز رگرسیون در یک مدل ریاضی متشکل از عبارات معنی‌دار در سطح ۰/۰۵ برازش داده می‌شوند. همچنین، ضریب تعیین R^2 که ارائه‌دهنده همبستگی بین داده‌های آزمایشگاهی و پاسخ‌های

^۱- Partial model

^۲- T-statistics

جدول ۵. نتایج ANOVA برای پاسخ های RCCP

| متغیر وابسته | متغیر مستقل | درجه آزادی | متغیرهای آماری | | | | ضریب تعیین شده | معنی-داری |
|-------------------------------|--------------------------|------------|----------------|--------|----------------|--------------|----------------|-----------|
| | | | p-value | F | میانگین مربعات | مجموع مربعات | | |
| جذب آب | متاکائولن | ۱ | <۰/۰۰۰۱ | ۲۱/۰۹ | ۷/۱۷ | ۷/۱۷ | ✓ | |
| | پت | ۱ | <۰/۰۰۰۱ | ۲۲/۴۱ | ۷/۶۲ | ۷/۶۲ | ✓ | |
| | الیاف | ۱ | ۰/۴۰۷۵ | ۰/۷۰۹۰ | ۰/۲۴۱۱ | ۰/۲۴۱۱ | × | |
| | پت×متاکائولن | ۱ | ۰/۰۰۰۹ | ۱۴/۰۴ | ۴/۷۷ | ۴/۷۷ | ✓ | |
| | الیاف×متاکائولن | ۱ | ۰/۰۳۲۸ | ۵/۰۹ | ۱/۷۳ | ۱/۷۳ | ✓ | |
| | الیاف×پت | ۱ | ۰/۰۳۳۹ | ۵/۰۲ | ۱/۷۱ | ۱/۷۱ | ✓ | |
| | (پت) ^۲ | ۱ | ۰/۰۰۰۵ | ۱۵/۹۰ | ۵/۴۱ | ۵/۴۱ | ✓ | |
| تخلخل | متاکائولن | ۱ | ۰/۵۴۲۱ | ۰/۳۸۱۷ | ۰/۵۳۰۵ | ۰/۵۳۰۵ | × | |
| | پت | ۱ | <۰/۰۰۰۱ | ۸۱/۰۰ | ۱۱۲/۵۸ | ۱۱۲/۵۸ | ✓ | |
| | الیاف | ۱ | ۰/۷۳۷۴ | ۰/۱۱۴۸ | ۰/۱۵۹۶ | ۰/۱۵۹۶ | × | |
| | پت×متاکائولن | ۱ | ۰/۰۰۵۶ | ۹/۱۴ | ۱۲/۷۱ | ۱۲/۷۱ | ✓ | |
| | الیاف×متاکائولن | ۱ | ۰/۰۰۵۷ | ۹/۰۹ | ۱۲/۶۴ | ۱۲/۶۴ | ✓ | |
| | الیاف×پت | ۱ | <۰/۰۰۰۱ | ۲۲/۰۸ | ۳۰/۶۹ | ۳۰/۶۹ | ✓ | |
| | (پت) ^۲ | ۱ | ۰/۰۰۴۷ | ۹/۵۷ | ۱۳/۳۱ | ۱۳/۳۱ | ✓ | |
| سرعت امواج التراسونیک ۷ روزه | متاکائولن | ۱ | ۰/۰۶۴۱ | ۳/۷۲ | ۹۳۰۵۵/۸۱ | ۹۳۰۵۵/۸۱ | × | |
| | پت | ۱ | <۰/۰۰۰۱ | ۲۷۲/۶۵ | ۶/۸۵۴E+۰۶ | ۶/۸۵۴E+۰۶ | ✓ | |
| | الیاف | ۱ | ۰/۷۷۲۴ | ۰/۰۸۵۳ | ۲۱۳۷/۱۰ | ۲۱۳۷/۱۰ | × | |
| | الیاف×پت | ۱ | ۰/۰۰۱۵ | ۱۲/۳۷ | ۳/۰۹۷E+۰۵ | ۳/۰۹۷E+۰۵ | ✓ | |
| | (متاکائولن) ^۲ | ۱ | ۰/۰۴۳۷ | ۴/۴۶ | ۱/۱۱۸E+۰۵ | ۱/۱۱۸E+۰۵ | ✓ | |
| سرعت امواج التراسونیک ۲۸ روزه | متاکائولن | ۱ | ۰/۱۰۹۹ | ۲/۷۳ | ۳۹۸۵۹/۱۵ | ۳۹۸۵۹/۱۵ | × | |
| | پت | ۱ | <۰/۰۰۰۱ | ۵۸۶/۱۹ | ۸/۵۵۲E+۰۶ | ۸/۵۵۲E+۰۶ | ✓ | |
| | الیاف | ۱ | ۰/۰۳۳۹ | ۵/۰۰ | ۷۲۸۷۵/۷۵ | ۷۲۸۷۵/۷۵ | ✓ | |
| | پت×متاکائولن | ۱ | <۰/۰۰۰۱ | ۳۱/۲۳ | ۴/۵۵۶E+۰۵ | ۴/۵۵۶E+۰۵ | ✓ | |
| | الیاف×متاکائولن | ۱ | <۰/۰۰۰۱ | ۲۱/۴۰ | ۳/۱۲۲E+۰۵ | ۳/۱۲۲E+۰۵ | ✓ | |
| | (متاکائولن) ^۲ | ۱ | ۰/۰۳۷۴ | ۴/۷۹ | ۶۹۹۰۱/۳۵ | ۶۹۹۰۱/۳۵ | ✓ | |
| مقاومت فشاری ۷ روزه | متاکائولن | ۱ | ۰/۵۰۲۸ | ۰/۴۶۲۳ | ۵/۲۸ | ۵/۲۸ | × | |
| | پت | ۱ | <۰/۰۰۰۱ | ۲۴۳/۸۶ | ۲۷۸۵/۷۵ | ۲۷۸۵/۷۵ | ✓ | |
| | الیاف | ۱ | ۰/۰۶۴۴ | ۳/۷۵ | ۴۲/۷۸ | ۴۲/۷۸ | × | |
| | پت×متاکائولن | ۱ | ۰/۰۰۲۷ | ۱۱/۰۸ | ۱۲۶/۵۶ | ۱۲۶/۵۶ | ✓ | |
| | الیاف×پت | ۱ | ۰/۰۰۰۹ | ۱۴/۲۳ | ۱۶۲/۵۶ | ۱۶۲/۵۶ | ✓ | |
| | (متاکائولن) ^۲ | ۱ | <۰/۰۰۰۱ | ۲۷/۳۰ | ۳۱۱/۸۲ | ۳۱۱/۸۲ | ✓ | |
| | (الیاف) ^۲ | ۱ | ۰/۰۰۰۵ | ۱۵/۹۷ | ۱۸۲/۴۳ | ۱۸۲/۴۳ | ✓ | |
| مقاومت فشاری ۲۸ روزه | متاکائولن | ۱ | ۰/۳۱۷۵ | ۱/۰۴ | ۲۲/۷۸ | ۲۲/۷۸ | × | |
| | پت | ۱ | <۰/۰۰۰۱ | ۱۵۹/۶۷ | ۳۵۰۷/۰۳ | ۳۵۰۷/۰۳ | ✓ | |
| | الیاف | ۱ | ۰/۵۳۸۳ | ۰/۳۸۸۵ | ۸/۵۳ | ۸/۵۳ | × | |
| | پت×متاکائولن | ۱ | ۰/۰۱۱۳ | ۷/۴۰ | ۱۶۲/۵۶ | ۱۶۲/۵۶ | ✓ | |

| مقاومت فشاری ۲۸ روزه (مگا پاسکال) | مقاومت فشاری ۷ روزه (مگا پاسکال) | سرعت امواج التراسونیک ۲۸ روزه (متر بر ثانیه) | سرعت امواج التراسونیک ۷ روزه (متر بر ثانیه) | تخلخل (درصد) | جذب آب (درصد) | پارامترها |
|-----------------------------------|----------------------------------|--|---|--------------|---------------|--------------------------|
| +۴۵/۸۸۹۱۳ | +۲۹/۹۳۶۹۸ | +۶۷۳۸/۱۳۳۵۴ | +۴۴۷۹/۱۱۳۰۹ | +۲/۰۴۹۷۶ | -۰/۲۴۴۵۸۰ | مقدار ثابت |
| -۱/۱۰۶۲۵ | +۰/۹۲۰۴۰۳ | -۱۶۰/۳۸۱۹۷ | -۲۷/۰۹۱۲۸ | +۰/۶۸۶۲۵۰ | +۰/۲۵۵۳۳۰ | متاکائولن |
| -۰/۸۱۷۵۰۰ | -۰/۷۴۲۸۹۳ | -۶۸/۳۵۸۳۶ | -۱۴/۷۶۳۱۶ | -۰/۰۹۴۲۳۳ | +۰/۱۷۹۵۴۴ | پت |
| +۱۴/۳۵۶۵۲ | +۲۶/۷۰۴۰۳ | -۶۵۴/۱۸۷۲۹ | +۵۷۲/۸۵۰۴۳ | -۲/۱۲۶۲۵ | -۰/۱۶۴۶۳۰ | الیاف |
| +۰/۰۵۱۰۰۰ | +۰/۰۴۵۰۰۰ | +۲/۷۰۰۰۶ | - | -۰/۰۱۴۲۶۰ | -۰/۰۰۸۷۴۰ | پت×متاکائولن |
| - | - | +۵۵/۸۷۴۳۸ | - | -۰/۳۵۵۵۰۰ | -۰/۱۳۱۴۹۴ | الیاف×متاکائولن |
| -۰/۵۳۰۰۰۰ | -۰/۵۱۰۰۰۰ | - | -۲۲/۲۶۰۲۴ | +۰/۲۲۱۶۰۰ | +۰/۰۵۲۲۳۹ | الیاف×پت |
| - | -۰/۱۰۶۳۳۳ | +۱/۴۹۷۳۷ | +۱/۸۹۳۸۲ | - | - | (متاکائولن) ^۲ |
| - | - | - | - | +۰/۰۰۳۳۰۶ | -۰/۰۰۲۱۰۷ | (پت) ^۲ |
| - | -۸/۱۳۳۲۶ | - | - | - | - | (الیاف) ^۲ |

۱-۳. جذب آب

نتایج، استفاده مقادیر قابل توجه پت و متاکائولن در مخلوط RCCP، باعث کاهش جذب آب بتن در سن ۲۸ روز را نتیجه داده است. افزایش جذب آب به معنای وجود هوا در ریزساختار بتن حاوی این افزودنی‌ها می‌باشد. استفاده از پت به‌عنوان جایگزین ماسه طبیعی می‌تواند حفرات بیشتری ناشی از شکل باریک و ورقه‌ای آن به‌وجود آورد. همچنین، آب اضافی موجود در مخلوط که در واکنش آب و سیمان استفاده نمی‌شود، کانال‌های کوچک و در نتیجه حفرات بیشتری را به‌وجود می‌آورد (رحمانی و همکاران، ۲۰۱۳). این فضاها خالی، جذب آب بیشتر را در پی خواهند داشت.

مطابق مدل ارائه شده در جدول ۵، مقدار جذب آب نمونه‌های RCCP در سن ۲۸ روز با استفاده از یک تابع چندجمله‌ای درجه دو قابل برآورد خواهد بود. ضریب تعیین ۰/۷۶ بیانگر قابلیت بالای پیش‌بینی پاسخ در محدوده مطالعات انجام شده می‌باشد. معنی‌داری آماری مدل‌های به‌دست آمده، به ازای مقادیر زیاد و نزدیک به یک این ضریب قابل اثبات می‌باشد. ضریب تعیین زیاد برای پاسخ‌ها نشان‌دهنده همبستگی مطلوب می‌باشد که مطابق آن حداقل ۹۵٪ از مقادیر اندازه‌گیری شده دارای قابلیت محاسبه توسط مدل پیشنهاد شده خواهد بود.

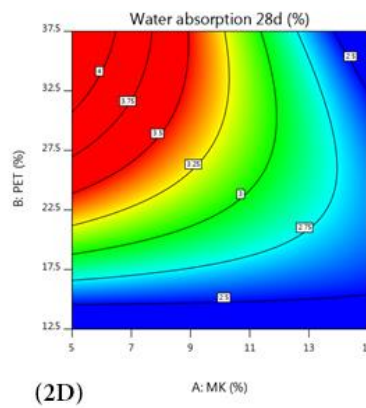
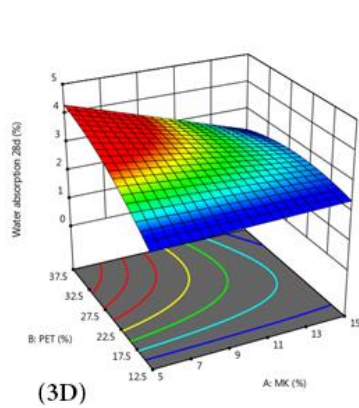
استفاده از پودر متاکائولن به‌عنوان جایگزین سیمان، در شرایط استفاده از مقادیر زیاد پت در مخلوط، منجر به کنترل جذب آب بتن گردیده است. نتیجه‌ای که در تحقیقات مشابه نیز به‌دست آمده است (مودولی و موخارجی، ۲۰۱۹؛ رضایی‌فر و همکاران، ۲۰۱۶؛ سایبر و همکاران، ۲۰۰۱). با توجه به ساختار نامنظم متاکائولن، طی فرایند هیدراتاسیون سیمان پرتلند، واکنش بسیار سریعی بین متاکائولن و هیدروکسید کلسیم رخ می‌دهد که می‌تواند بهبود جذب آب را در پی داشته باشد. لذا، جایگزینی سیمان با متاکائولن در مخلوط حاوی ذرات

مدل و ضرایب ارائه شده در جدول ۶، با مقدار P- $value < 0.05$ سطح معنی‌دار هستند. مقدار متاکائولن و پت جایگزین شده‌ی سیمان و ریزدانه به‌صورت خطی، کلیه اندرکنش‌های بین متغیرهای مستقل و متغیر مرتبه دوم پت مجموعه متغیرهای تأثیرگذار بر مقدار پاسخ تابع معرفی شده هستند.

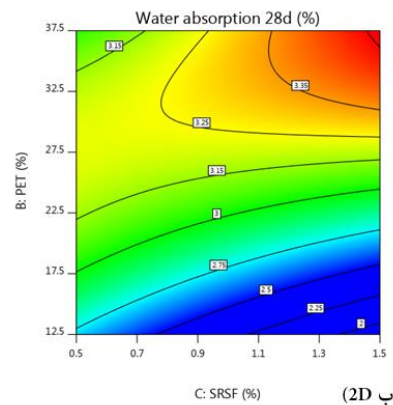
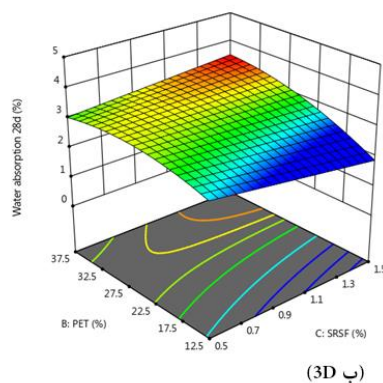
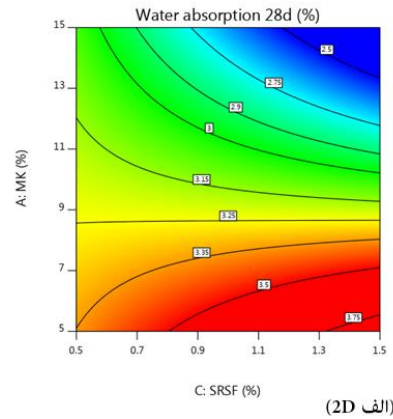
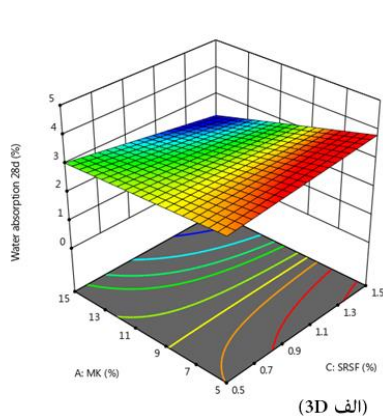
آنالیز پارامترهای آماری مدل به‌دست آمده ارائه دهنده‌ی اهمیت نسبی هر یک از متغیرها بر مقدار پاسخ می‌باشد. همانطور که در شکل ۵ مشاهده می‌شود، مقدار پاسخ جذب آب، بیشترین حساسیت را نسبت به مقدار پت اضافه شده به مخلوط نشان می‌دهد. همچنین، مطابق

با توجه به فرم پولکی شکل ذرات پت و هندسه نامنظم الیاف بازیافتی فولادی، استفاده همزمان این مواد در مخلوط، منجر به افزایش اصطکاک شده و تجمع الیاف و حبس میزان هوای بیشتر در مخلوط نهایی را در پی داشته است. تجربه ای که مشابه آن توسط السیف و همکاران (۲۰۱۸) نیز گزارش شده است. وجود فضاهای خالی بیشتر، منجر به افزایش درصد جذب آب مخلوط گردیده است.

پت، منجر به کاهش میزان فضاهای خالی و در نتیجه کاهش جذب آب محصول نهایی خواهد گردید. همچنین، مطابق مدل ارائه شده در جدول ۵، تأثیر افزودن الیاف بازیافتی بر مقدار پاسخ، متأثر از میزان پت و متاکائولن مورد استفاده بوده است. در واقع، این متغیر به تنهایی تأثیری بر مقدار پاسخ نشان نداده است. مطابق نمودارهای تراز شکل ۶، استفاده همزمان الیاف بازیافتی و پت، منجر به افزایش جذب آب و کاربرد همزمان آن با پودر متاکائولن، منجر به کاهش این پاسخ گردیده است.



شکل ۵. تأثیر میزان پت و متاکائولن بر جذب آب RCCP (2D و 3D) به ازای ۱٪ وزنی الیاف



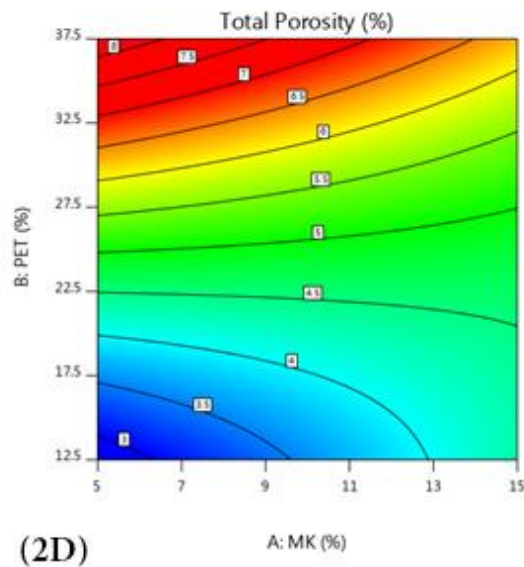
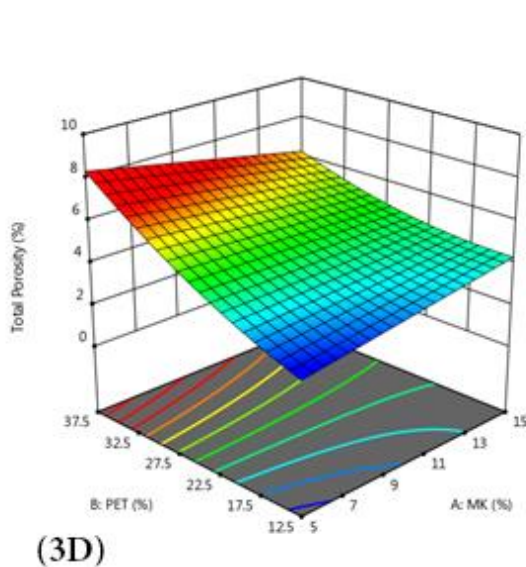
شکل ۶. تأثیر الیاف بر جذب آب (RCCP: الف) با وجود متغیر متاکائولن و به ازای ۲۵٪ حجمی پت و ب) با وجود متغیر پت و به ازای ۱۰٪ وزنی متاکائولن

۳-۲. میزان تخلخل

میزان تخلخل نمونه‌های RCCP معرف میزان یکپارچگی مخلوط بوده و ارزش تحلیلی بالایی دارد. مخلوط‌های دارای میزان تخلخل زیاد، فضاهای خالی بیشتری داشته و شاخص‌های مکانیکی و دوام نامطلوبی خواهند داشت. مطابق آنچه نتایج ANOVA در جدول ۵ به دست داده است، تنها متغیر خطی تأثیرگذار بر درصد تخلخل مخلوط، میزان پت مورد استفاده می‌باشد. این متغیر، با مرتبه دوم در مدل تخمین زده شده تأثیرگذار بوده است. همچنین، کلیه اندرکنش‌های ممکن بین متغیرهای سه‌گانه این تحقیق، بر مقدار این پاسخ مؤثر شناخته شده‌اند. مدل به دست آمده با ضرایب معرفی شده در جدول ۶، از ضریب تعیین قابل قبول ۰/۸۳ برخوردار می‌باشد.

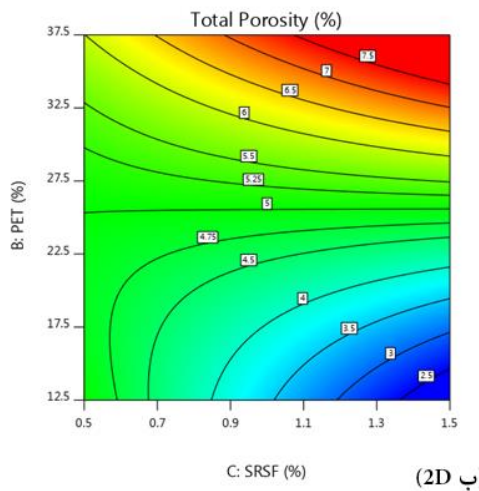
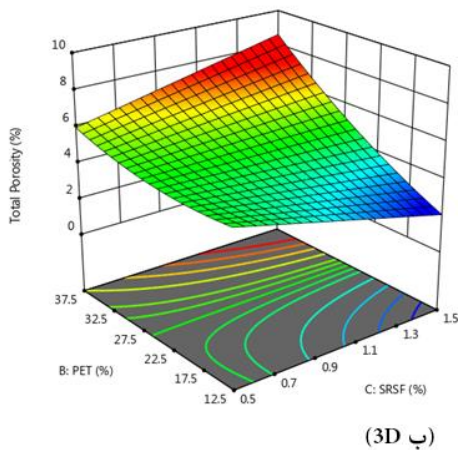
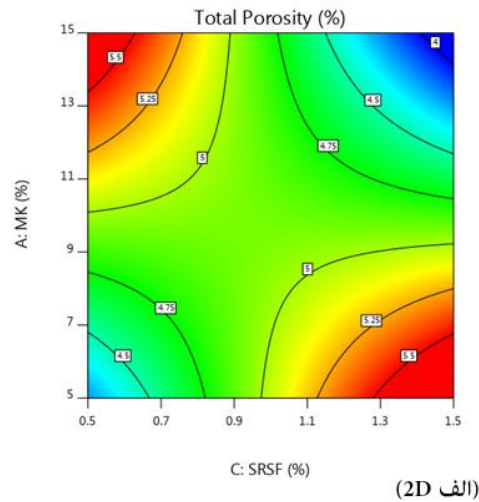
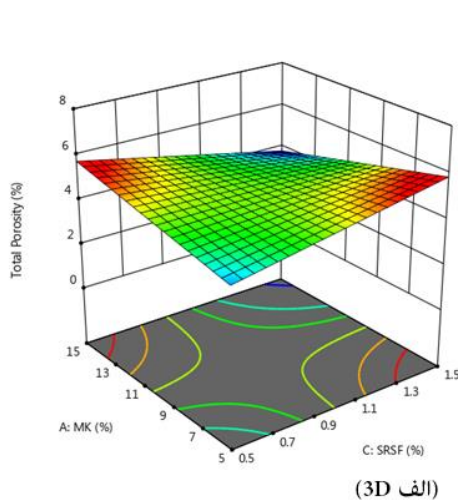
نتایج تحلیل نشان می‌دهد که مؤثرترین متغیر بر مقدار پاسخ تخلخل نمونه‌ها، میزان پت بوده است. مطابق آنچه در شکل ۷ ارائه شده است، با افزایش سهم این متغیر در مخلوط، درصد تخلخل افزایش قابل توجهی داشته است. افزایش فضاهای خالی در مخلوط را می‌توان ناشی از افت چسبندگی به وجود آمده بین سنگدانه‌های پت و خمیر سیمان در مقایسه با چسبندگی مناسب بین مصالح طبیعی در شرایط معمول دانست که در تحقیقات پیشین، ناشی از افت هیدراتاسیون سیمان- به واسطه طبیعت آب‌گریز پلاستیک- گزارش شده است (سایکیا و دبریتو،

۲۰۱۲؛ صدیق و همکاران، ۲۰۰۸). این ویژگی باعث می‌شود تا میزان هوای محبوس در مخلوط بیشتر شده (السیف و همکاران، ۲۰۱۸) و در نتیجه درصد تخلخل افزایش یابد. آنچنان که در نمودارهای تراز شکل ۷ مشخص است، جایگزینی سیمان با پودر متاکائولن، باعث کاهش میزان تخلخل نمونه‌های حاوی پت شده است. موضوعی که ناشی از خاصیت پوزولانی این ماده، افزایش چسبندگی خمیر به دست آمده و در نتیجه تراکم بیشتر ماتریس نهایی می‌باشد. آثار مثبت استفاده از این ماده بر کنترل میزان حفرات موجود در بتن طی تحقیقات بررسی شده در (صدیق و کلاوس، ۲۰۰۹) نیز به اثبات رسیده است. اندرکنش‌های تأثیرگذار بر مدل تخلخل، ارائه شده در جدول ۵، بیانگر تأثیرگذاری افزودن الیاف بازیافتی بر مقدار پاسخ، متأثر از میزان پت و متاکائولن می‌باشد. آن گونه که تحقیقات نشان داده‌اند، افزودن الیاف فولادی به مخلوط بتن به تنهایی، تغییر قابل توجهی در میزان هوای مخلوط به وجود نمی‌آورد (السیف و همکاران، ۲۰۱۸). لذا، این متغیر به تنهایی تأثیری بر میزان تخلخل نشان نداده است. مطابق نمودارهای تراز شکل ۸، استفاده همزمان الیاف بازیافتی و پت، منجر به افزایش تخلخل و کاربرد همزمان آن با پودر متاکائولن، منجر به کاهش فضاهای خالی مخلوط گردیده است. لذا، خاصیت پوزولانی و نقش پرکنندگی متاکائولن در کنار الیاف بازیافتی مشهود است.



شکل ۷. تأثیر میزان پت و متاکائولن بر میزان تخلخل RCCP (2D و 3D) به ازای ۱٪ وزنی الیاف

گوناگونی از نمونه مورد آزمایش را معرفی کند. مدل پیش بینی مقدار سرعت امواج التراسونیک در سنین ۷ و ۲۸ روز نمونه های مورد آزمایش، با دقت زیاد و ضریب تعیین بیش از ۰/۹ برآورد شده است.



شکل ۸. تأثیر الیاف بر میزان تخلخل RCCP: (الف) با وجود متغیر متاکائولن و به ازای ۲۵٪ حجمی پت و (ب) با وجود متغیر پت و به ازای ۱۰٪ وزنی متاکائولن

در مدل ۷ روزه این پاسخ، اندرکنش بین پت و الیاف بازیافتی بوده است و اندرکنش متاکائولن با پت و الیاف در پاسخ ۲۸ روزه مشاهده می گردد. بررسی نمودارهای سطوح پاسخ نشان می دهد که تأثیرگذارترین متغیر بر پاسخ، سهم پت در مخلوط می باشد. در شکل های ۹ و ۱۰ شیب تغییرات محور افقی پت، بسیار بیشتر از محور متاکائولن می باشد، که نشانگر اثرپذیری پاسخ از متغیر مورد نظر است.

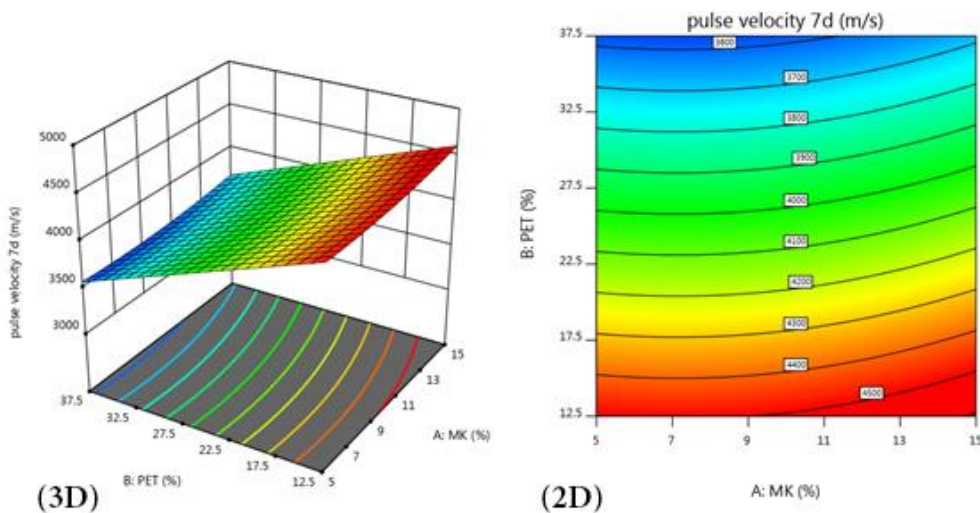
از بین متغیرهای سه گانه ارائه شده در جدول ۳، در سطح خطای ۵٪، فرم خطی متغیر مستقل متاکائولن در مدل های ۷ و ۲۸ روزه سرعت امواج التراسونیک بی معنی شده و متغیر پت در هر دو مدل معنی دار شناخته شده است. فرم خطی افزودنی الیاف بازیافتی نیز تنها در پاسخ ۲۸ روزه معنی دار می باشد. همچنین، توان دوم متغیر متاکائولن در هر دو مدل به عنوان تنها متغیر مرتبه دوم معنی دار به دست آمده است. تنها اندرکنش دارای ضریب

است. این نکته، تأیید کننده اهمیت استفاده از مواد فعال - کننده در صورت استفاده از پت بازیافتی از جنبه سرعت امواج التراسونیک در بتن می باشد. در برخی تحقیقات (آکچائوژغلو و اولو، ۲۰۱۴) تأثیر کاهش استفاده از متاکائولن بر سرعت امواج و در برخی (کو و همکاران، ۲۰۱۱؛ مودولی و موخارجی، ۲۰۱۹) آثار افزایشی آن قابل استناد است.

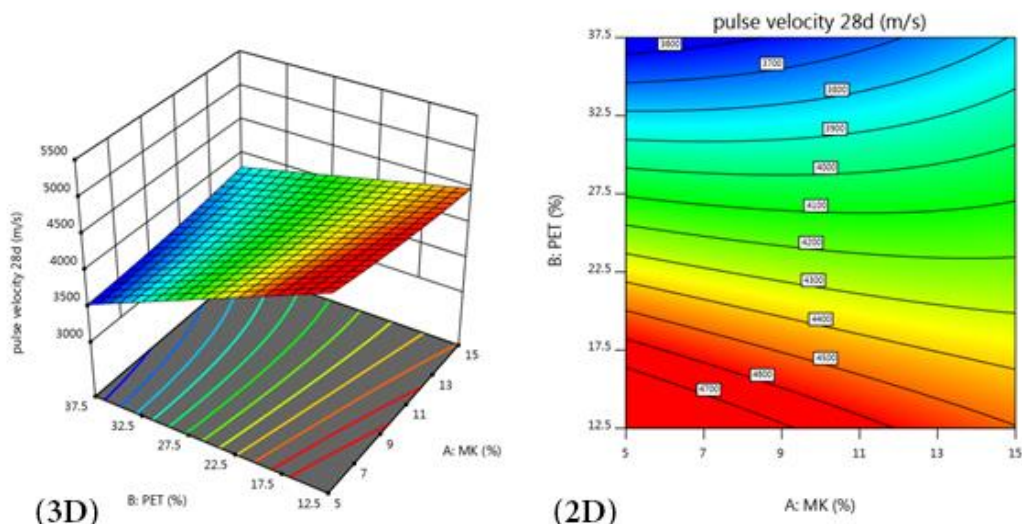
مطابق نتایج مدل سازی های آماری صورت پذیرفته، کاربرد الیاف در مخلوط های حاوی کران های پایین پت، سرعت امواج نمونه های ۷ روزه را ارتقا بخشیده و در کران های بالای استفاده از پت، نقشی معکوس ایفا نموده است. لذا، استفاده از الیاف بازیافتی تأثیر مطلوبی بر سرعت امواج التراسونیک در سنین کم نمونه های حاوی ذرات پلاستیکی نداشته است. این امر می تواند ناشی از تشدید میزان فضاهای خالی موجود در مخلوط در اثر به- کارگیری همزمان این مواد باشد (السیف و همکاران، ۲۰۱۸). همچنین، بررسی مقادیر سرعت امواج در نمونه های ۲۸ روزه نشان می دهد که استفاده از الیاف فولادی همزمان با کران های پایین استفاده از متاکائولن منجر به کاهش پاسخ گردیده و در کران های بالای استفاده از متاکائولن، تأثیری معکوس دارد. نقش پرکنندگی و ریزی ذرات متاکائولن در مخلوط های با سهم بیشتر الیاف خودنمایی می کند. نکته ای که بیانگر آثار مثبت استفاده همزمان متاکائولن و الیاف بازیافتی در مخلوط های حاوی درصدهای زیاد جایگزینی پت می باشد.

بررسی نمودارهای تراز ارائه شده در شکل های ۹ و ۱۰ نشان می دهد که با افزایش درصد پت مصرفی، سرعت امواج التراسونیک دچار کاهش شده است. کاهش سرعت امواج می تواند ناشی از کاهش قابلیت تراکم و اندازه چگالی بتن بوده و کاهش مقاومت بتن را نتیجه دهد (وایت هرس، ۱۹۵۱). کاهش سرعت امواج التراسونیک با افزایش مقدار پت مصرفی در تحقیقات مختلفی مشاهده شده است (آکچائوژغلو و اولو، ۲۰۱۴؛ آلبانو و همکاران، ۲۰۰۹؛ رحمانی و همکاران، ۲۰۱۳). در واقع، استفاده از پت در مخلوط RCCP منجر به پیدایش فضاهای خالی در ساختار ترکیب شده و از طرفی قابلیت ارتجاعی این ذرات، باعث میرایی انرژی تراکم نمونه می شود. این تراکم ناقص، باعث پیدایش تخلخل شده و در نتیجه سرعت امواج را کاهش می دهد.

همچنین، مطابق شکل ۹، استفاده از متاکائولن باعث افزایش مقدار سرعت امواج التراسونیک در سن ۷ روز می گردد. سطح جانبی بزرگتر ذرات ریزتر متاکائولن، سرعت هیدراتاسیون سیمان معمولی را افزایش داده و نرخ واکنش پوزولانی را بهبود می بخشد (کادری و همکاران، ۲۰۱۱). این فعالیت پوزولانی، منجر به بهبود مقاومت در سنین اولیه خواهد گردید. این در حالی است که مطابق شکل ۹، کاربرد این ماده همزمان با استفاده از مقدار کم جایگزینی پت (۱۰٪ و ۲۰٪)، منجر به کاهش سرعت امواج و در مقادیر بالای استفاده از پت (۳۰٪ و ۴۰٪)، افزایش سرعت امواج در سن ۲۸ روز را به دنبال داشته



شکل ۹. تأثیر میزان پت و متاکائولن بر سرعت امواج التراسونیک در سن ۷ روز (2D و 3D) به ازای ۱٪ وزنی الیاف



شکل ۱۰. تأثیر میزان پت و متاکائولن بر سرعت امواج التراسونیک در سن ۲۸ روز (2D و 3D) به ازای ۱٪ وزنی الیاف

۳-۴. مقاومت فشاری

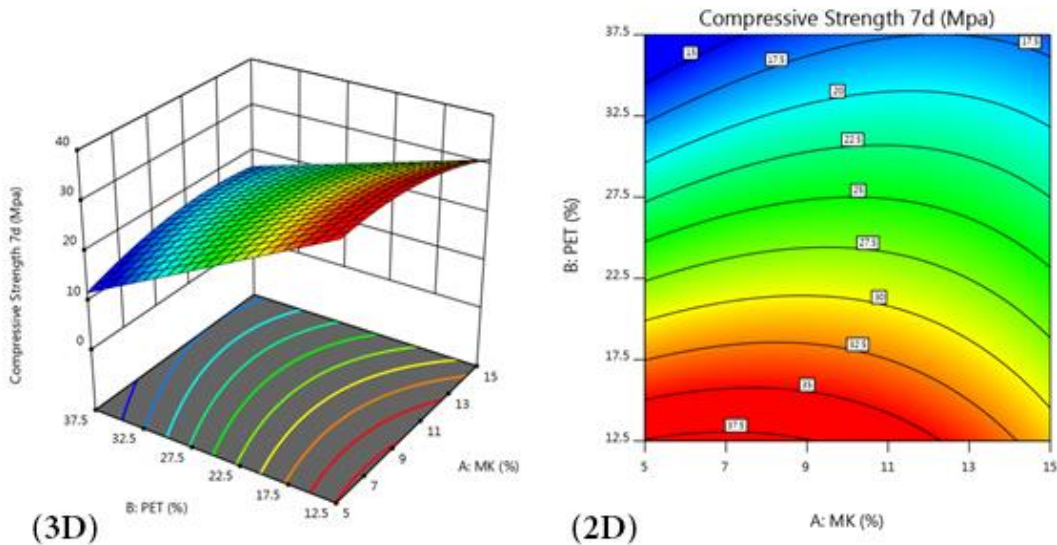
مدل مقاومت فشاری نمونه های ۷ و ۲۸ روزه RCCP، مطابق جدول ۵ ارائه شده است. نتایج حاصل از تحلیل ANOVA نشان می دهد که از بین افزودنی های مورد مطالعه، پت به عنوان تأثیرگذارترین متغیر شناسایی شده و فرم خطی دو متغیر دیگر در هر دو مدل بی معنی شناخته شده اند. از سوی دیگر، توان دوم متغیرهای متاکائولن و الیاف بازیافتی تنها بر مقاومت فشاری ۷ روزه تأثیرگذار شده و اندرکنش های پت با اجزای متاکائولن و الیاف در هر دو مدل معنی دار شده اند. افزایش سهم پت باعث کاهش قابل توجه مقاومت فشاری ۷ و ۲۸ روز گردیده است. موضوعی که در تحقیقات گوناگون نیز به اثبات رسیده است (آکچائوژغلو و همکاران، ۲۰۱۰؛ فریجیون، ۲۰۱۰؛ هناوی و همکاران، ۲۰۱۰؛ سایکیا و دبریتو، ۲۰۱۴). این ضعف، به خاطر عدم حصول چسبندگی مناسب بین بافت و ذرات پت می باشد. ذرات پت، مانع از چسبندگی خمیر سیمان به سنگدانه های طبیعی می شوند (رحمانی و همکاران، ۲۰۱۳). اندرکنش ضعیف سنگدانه های پت با خمیر سیمان، منجر به تشکیل ITZ^۱ ضعیف گردیده (سایکیا و دبریتو، ۲۰۱۴) و این محل به عنوان نقطه آغازین فروپاشی نمونه تحت اثر بار وارده عمل می کند. همچنین، وجود پت در مخلوط تازه

RCCP، باعث میرایی و هدررفت بخش قابل توجهی از انرژی تراکم شده و از یکپارچگی مخلوط می کاهد. مطابق نمودارهای تراز شکل های ۱۱ و ۱۲، استفاده از متاکائولن در مخلوط، تأثیرات مثبتی بر مقاومت فشاری داشته است. افزایش سهم متاکائولن به طور ویژه در نمونه های دارای درصدهای بیشتری از پت، منجر به رشد مقاومت فشاری در سنین ۷ و ۲۸ روز شده است. این رفتار می تواند ناشی از وجود فضاهای خالی بیشتر در نمونه های دارای سهم بیشتری از پت باشد. وجود این فضاهای خالی باعث افزایش وجود $Ca(OH)_2$ در ملات چسباننده سنگدانه ها شده و با بهبود عملکرد ITZ، چسبندگی وجه اشتراک آن ها را بهبود می دهد. آثار مثبت استفاده از متاکائولن بر مقاومت فشاری در پژوهش های متعددی به اثبات رسیده است (بروکز و جوهری، ۲۰۰۱؛ دوآن و همکاران، ۲۰۱۶؛ لی و دینگ، ۲۰۰۳؛ مدندوست و موسوی، ۲۰۱۲؛ مودولی و موخارجی، ۲۰۱۹؛ نوکلونگ و همکاران، ۲۰۱۸). بهبود مقاومت مشاهده شده ناشی از سه ویژگی ذاتی این افزودنی شامل خصوصیت پرکنندگی، واکنش پوزولانی با $Ca(OH)_2$ و شتابدهی هیدراتاسیون سیمان پرتلند معمولی ناشی از افزودن متاکائولن به عنوان بخشی از ماده چسباننده مخلوط می باشد (سعیدمنصور و همکاران، ۲۰۱۱؛ ویلد و همکاران، ۱۹۹۶). عملکرد پرکنندگی و پوزولانی ذرات

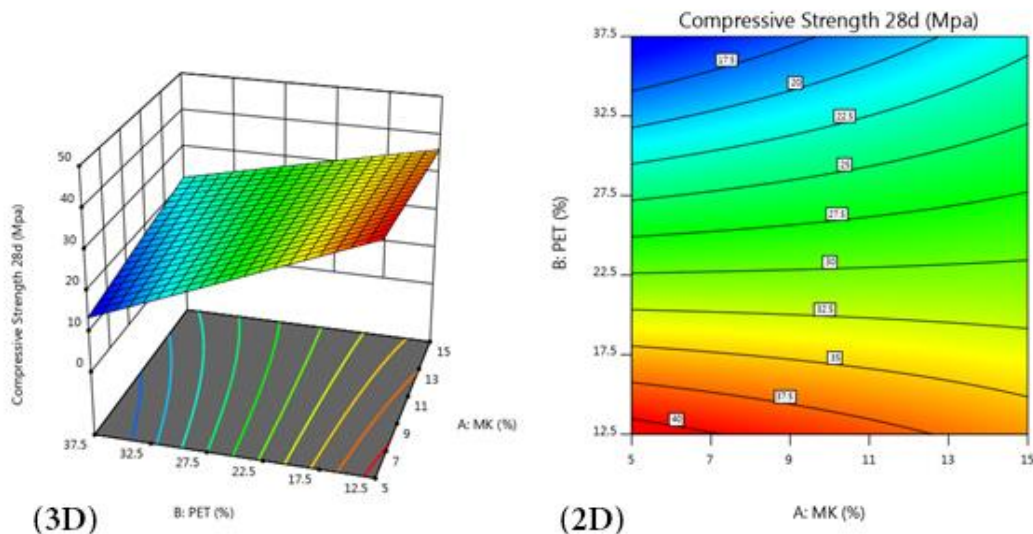
^۱- Interfacial Transition Zone

مطابق نتایج مدل سازی انجام شده، استفاده از الیاف بازیافتی به ازای درصد های کم جایگزینی پت، باعث افزایش مقاومت فشاری نمونه در سنین ۷ و ۲۸ روز شده و به ازای مقادیر بیشتر جایگزینی پت، تأثیر معکوس می گذارد. این امر می تواند ناشی از مقاومت فشاری زیاد فولاد در مقایسه با سایر اجزای بتن و در عین حال شدت بخشیدن به تشکیل حفرات و فضاهای خالی در ساختار بتن غلتکی حاوی ذرات پلاستیکی باشد.

متاکائولن در مطالعه خصوصیات ریزساختاری انجام شده توسط باربھویا و همکاران (۲۰۱۵) و دوآن و همکاران (۲۰۱۳) به اثبات رسیده است. اندازه کوچکتر ذرات متاکائولن در مقایسه با ذرات سیمان پرتلند، باعث پرشدن فضاهای خالی شده، بازشدگی های بین ماتریس و سنگدانه ها را پل می زند و در نتیجه تراکم^۱ مناسب تری از ذرات را در وجه اشتراک سنگدانه ها با خمیر نتیجه می دهد. لذا، ITZ با تراکم بیشتری تشکیل شده و میکروترک ها به تدریج کاهش می یابند.



شکل ۱۱. تأثیر میزان پت و متاکائولن بر مقاومت فشاری در سن ۷ روز (3D و 2D) به ازای ۱٪ وزنی الیاف



شکل ۱۲. تأثیر میزان پت و متاکائولن بر مقاومت فشاری در سن ۲۸ روز (3D و 2D) به ازای ۱٪ وزنی الیاف

^۱- Particle Packing

۳-۵. بهینه‌سازی چندهدفه

وضعیت قرارگیری بهینه پاسخها از نقاط آغازین تصادفی شروع شده و بر مبنای تندترین شیب^۱ تا رسیدن به مقدار ماکزیمم تابع ادامه می‌یابد. بدین منظور، با هدف استفاده حداکثری از ذرات پت به عنوان جایگزین مصالح سنگی در مخلوط RCCP شرط قابلیت استفاده از بتن حاصل در روسازی راه‌ها بنا به توصیه ارائه شده در مرجع کمیته ACI 325 (۲۰۰۱) مبنای بهینه‌سازی قرار گرفت. لذا، حداقل مقدار مقاومت به شرح جدول ۷ لحاظ شده است.

یکی از مؤثرترین کاربردهای مدل‌های آماری ساخته شده، تعیین رابطه بین متغیرهای مستقل و پاسخهای RCCP است که در بندهای پیشین معرفی گردید. همچنین، امکان تعریف قیدها و بهینه‌سازی متغیرهای وابسته و مستقل استفاده شده در مدل‌ها در قالب یک تابع هدف-دار، تحت عنوان تابع مطلوبیت وجود دارد (مونته‌گومری، ۲۰۱۳). این تابع، معرف موقعیت پاسخهای منتخب در یک بازه مطلوبیت، از صفر تا ۱، می‌باشد. جستجوی

جدول ۷. تبیین متغیرها و پاسخها در فرایند بهینه‌سازی

| متغیرها و پاسخها | واحد | هدف | کران پایین | کران بالا |
|-------------------------------|--------------|-----------|------------|-----------|
| متاکائولن | % | حداکثر | ۰ | ۲۰ |
| پت | % | حداکثر | ۰ | ۵۰ |
| الیاف فولادی بازیافتی | % | حداکثر | ۰ | ۲ |
| جذب آب | % | حداقل | ۰/۹ | ۴/۲ |
| میزان تخلخل | % | حداقل | ۱/۱ | ۱۱/۶ |
| سرعت امواج التراسونیک ۲۸ روزه | متر بر ثانیه | حداکثر | ۳۰۵۸ | ۵۱۲۸ |
| مقاومت فشاری ۲۸ روزه | مگاپاسکال | در محدوده | ۲۷/۵ | ۴۹ |

۲٪ وزن مخلوط وجود دارد. در این شرایط، محصول RCCP قابلیت استفاده در روسازی راه (از حیث مقاومت فشاری) را خواهد داشت. در این حالت، مقدار تابع مطلوبیت برابر با ۰/۸۴۳ به دست آمده است.

نتیجه فرایند بهینه‌سازی در جدول ۸ ارائه شده است. مطابق نتایج، امکان جایگزینی حدود ۲۰٪ وزن سیمان با متاکائولن، حدود ۲۹٪ مصالح ریزدانه با ذرات بازیافتی پت و استفاده از الیاف فولادی بازیافتی به میزان

جدول ۸. نسبت‌های بهینه و پاسخهای پیش‌بینی شده

| متغیرها و پاسخها | واحد | نسبت‌های بهینه و پاسخها |
|-------------------------------|--------------|-------------------------|
| متاکائولن | % | ۲۰ |
| پت | % | ۲۹/۱۳ |
| الیاف فولادی بازیافتی | % | ۲ |
| جذب آب | % | ۰/۶۷ |
| میزان تخلخل | % | ۱/۹۶ |
| سرعت امواج التراسونیک ۲۸ روزه | متر بر ثانیه | ۴۶۳۷/۸۵ |
| مقاومت فشاری ۲۸ روزه | مگاپاسکال | ۲۷/۵۰ |
| مطلوبیت | - | ۰/۸۴۳ |

پرداخته شده است. بدین منظور، به ترتیب خرده ذرات پت به دست آمده از بازیافت بطری‌های نوشیدنی، متاکائولن و الیاف فولادی حاصل از بازیافت لاستیک وسایل نقلیه به عنوان متغیرهای پژوهش لحاظ شده است. مجموعه‌ای

۴. جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

در مطالعه حاضر، به بررسی رفتار روسازی بتن غلتکی با جایگزینی مصالح بازیافتی در اجزای ماسه، سیمان و الیاف

^۱ - Steepest slope

کاهش میزان جذب آب و تخلخل نمونه‌های دارای سطوح بالای جایگزینی پت شده است که نشانگر خاصیت پوزولانی و افزایش خصوصیات چسبانندگی خمیر در اثر کاربرد متاکائولن می‌باشد.

- براساس مدل‌سازی‌های انجام شده، نحوه اثرگذاری افزودنی الیاف فولادی بازیافتی بر خصوصیات نمونه‌های RCCP عموماً وابسته به دیگر اجزای مخلوط می‌باشد. استفاده از این ماده در کنار متاکائولن، باعث کاهش جذب آب - و میزان تخلخل بتن - و همراه با پت منجر به افزایش مقدار این پاسخ شده است. این رفتار، در خصوص پاسخ‌های سرعت امواج التراسونیک و مقاومت فشاری نیز تکرار شده است. به طوری که افزودن الیاف بازیافتی در کنار وجود متاکائولن، باعث افزایش سرعت امواج التراسونیک نمونه‌های ۲۸ روزه شده است. با استفاده همزمان آن با پت، کاهش مقاومت فشاری مخلوط را در پی داشته است.

- با توجه به مدل‌های رگرسیونی به دست آمده، به ازای پاسخ‌های روسازی بتن غلتکی در این تحقیق، امکان جایگزینی حدود ۲۹٪ از حجم ماسه، ۲۰٪ از وزن سیمان و ۲٪ از وزن کل مخلوط با مصالح پت بازیافتی، متاکائولن و الیاف فولادی بازیافتی وجود خواهد داشت. تحقیقات آزمایشگاهی و تحلیل‌های صورت پذیرفته نشان می‌دهد که مخلوط حاصل به‌عنوان یک محصول دوست‌دار محیط‌زیست، از مقاومت فشاری کافی برای تحمل بارگذاری‌ها برخوردار خواهد بود.

از آزمایش‌های مخرب و غیرمخرب بر نمونه‌های استاندارد تهیه شده در سنین ۷ و ۲۸ روز انجام شد. به‌منظور بررسی اثر همزمان این متغیرها بر ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی مخلوط RCCP، از روش سطح پاسخ برای تعیین تعداد طرح‌های لازم و مدل‌سازی بهره گرفته شده است. براساس مدل‌سازی‌های صورت پذیرفته، انتخاب محدوده بهینه متغیرهای مورد بررسی و اجرای فرایند بهینه‌سازی، نتایج زیر قابل ارائه خواهد بود:

- رفتار نمونه‌های RCCP مورد تحقیق شامل مقادیر پاسخ‌های جذب آب، تخلخل، سرعت امواج التراسونیک و مقاومت فشاری نمونه‌های ۷ و ۲۸ روزه از قابلیت مناسبی برای مدل‌سازی به‌ازای مقادیر متغیرهای مستقل پت، متاکائولن و الیاف بازیافتی برخوردار می‌باشد. ضرایب تعیین مدل‌ها در سطح معنی‌داری ۵٪ مؤید این موضوع است.

- استفاده از ذرات پت به‌عنوان ریزدانه در مخلوط RCCP، منجر به افت عملکرد محصول نهایی گردیده است. بر این اساس، میزان جذب آب و تخلخل نمونه‌ها افزایش یافته و از سوی دیگر سرعت امواج التراسونیک و مقاومت فشاری آن، فارغ از سن نمونه، دچار کاهش شده است. نکاتی که عمدتاً به‌واسطه چسبندگی ضعیف بین خمیر سیمان و پلاستیک و میرایی انرژی تراکم مخلوط منتج می‌شود.

- استفاده از ماده معدنی و پوزولانی متاکائولن به‌عنوان جایگزین سیمان مخلوط‌های RCCP، نتایج مثبتی را به دست داده است. استفاده از این ماده باعث افزایش نسبی سرعت امواج التراسونیک و مقاومت فشاری و

۵. مراجع

- ACI Committee 211. 2009. "Guide for selecting proportions for no-slump concrete". Reported by ACI Committee 211, Vol. 02.
- ACI Committee 325. 2001. "Report on roller-compacted pavements". Vol. 95.
- Aiello, M. A., Leuzzi, F., Centonze, G. and Maffezzoli, A. 2009. "Use of steel fibres recovered from waste tyres as reinforcement in concrete: Pull-out behaviour, compressive and flexural strength". Waste Manage., 29(6): 1960-1970.
- Akçaözoglu, S. and Atiş, C. D. 2011. "Effect of granulated blast furnace slag and fly ash addition on the strength properties of lightweight mortars containing waste PET aggregates". Constr. Build. Mater., 25(10): 4052-4058. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.04.042>.
- Akçaözoglu, S. and Ulu, C. 2014. "Recycling of waste PET granules as aggregate in alkali-activated blast furnace slag/metakaolin blends". Constr. Build. Mater., 58: 31-37. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.02.011>.
- Akçaözoglu, S., Atiş, C. D. and Akçaözoglu, K. 2010. "An investigation on the use of shredded waste PET bottles as aggregate in lightweight concrete". Waste Manage., 30(2): 285-290. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2009.09.033>.

- Akçaözoglu, S., Akçaözoglu, K. and Atiş, C. D. 2013. "Thermal conductivity, compressive strength and ultrasonic wave velocity of cementitious composite containing waste PET lightweight aggregate (WPLA)". *Comp. Part B: Eng.*, 45(1): 721-726. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2012.09.012>.
- Albano, C., Camacho, N., Hernandez, M., Matheus, A. and Gutierrez, A. 2009. "Influence of content and particle size of waste pet bottles on concrete behavior at different w/c ratios". *Waste Manage.*, 29(10): 2707-2716.
- Aldahdooh, M. A. A., Bunnori, N. M. and Johari, M. A. M. 2013. "Evaluation of ultra-high-performance-fiber reinforced concrete binder content using the response surface method". *Mater. Design*, 52: 957-965. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.matdes.2013.06.034>.
- Alsaif, A., Bernal, S. A., Guadagnini, M. and Pilakoutas, K. 2018. "Durability of steel fibre reinforced rubberised concrete exposed to chlorides". *Constr. Build. Mater.*, 188: 130-142. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.08.122>.
- Barbhuiya, S., Chow, P. and Memon, S. 2015. "Microstructure, hydration and nanomechanical properties of concrete containing metakaolin". *Constr. Build. Mater.*, 95: 696-702. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.07.101>.
- Batis, G., Pantazopoulou, P., Tsivilis, S. and Badogiannis, E. 2005. "The effect of metakaolin on the corrosion behavior of cement mortars". *Cement Concrete Comp.*, 27(1): 125-130. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2004.02.041>.
- Brooks, J. J. and Johari, M. A. M. 2001. "Effect of metakaolin on creep and shrinkage of concrete". *Cement Concrete Comp.*, 23(6): 495-502.
- Chang, D. I. and Chai, W. K. 1995. "Flexural fracture and fatigue behavior of steel-fiber-reinforced concrete structures". *Nucl. Eng. Design*, 156(1): 201-207.
- Dadsetan, S. and Bai, J. 2017. "Mechanical and microstructural properties of self-compacting concrete blended with metakaolin, ground granulated blast-furnace slag and fly ash". *Constr. Build. Mater.*, 146: 658-667. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.04.158>.
- Dean, A. and Voss, D. (1991). "Design and Analysis of Experiments". Springer, New York, NY. <https://doi.org/https://doi-org.ezproxy.uwtsd.ac.uk/10.1007/b97673>.
- Ding, J. T. and Li, Z. J. 2002. "Effects of metakaolin and silica fume on properties of concrete". *ACI Mater. J.*, 99(4): 393-398. <https://doi.org/10.14359/12222>.
- Dormer, A., Finn, D. P., Ward, P., & Cullen, J. 2013. "Carbon footprint analysis in plastics manufacturing". *Journal of Cleaner Production*, 51, 133–141. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2013.01.014>.
- Duan, P., Shui, Z., Chen, W. and Shen, C. 2013. "Effects of metakaolin, silica fume and slag on pore structure, interfacial transition zone and compressive strength of concrete". *Constr. Build. Mater.*, 44: 1-6. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.02.075>.
- Duan, P., Yan, C. and Zhou, W. 2016. "Influence of partial replacement of fly ash by metakaolin on mechanical properties and microstructure of fly ash geopolymer paste exposed to sulfate attack". *Ceram. Int.*, 42(2): 3504-3517. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2015.10.154>.
- Frigione, M. 2010. "Recycling of PET bottles as fine aggregate in concrete". *Waste Manage.*, 30(6): 1101-1106.
- Garforth, A. A., Ali, S., Hernández-Martínez, J., & Akah, A. 2004. "Feedstock recycling of polymer wastes". *Current Opinion in Solid State and Materials Science*, 8(6), 419–425.
- Gavela, S., Karakosta, C., Nydriotis, C., Kaselouri-Rigopoulou, V., Koliass, S., Tarantili, P. A., Magoulas, C., Tassios, D. and Andreopoulos, A. 2004. "A study of concretes containing thermoplastic wastes as aggregates". In: *Proceedings of International RILEM Conference on the Use of Recycled Materials in Buildings and Structures*, Barcelona, Spain, pp. 911-918.
- Hannawi, K., Kamali-Bernard, S. and Prince, W. 2010. "Physical and mechanical properties of mortars containing PET and PC waste aggregates". *Waste Manage.*, 30(11): 2312-2320.
- Ilić, B. R., Mitrović, A. A. and Miličić, L. R. 2010. "Thermal treatment of kaolin clay to obtain metakaolin". *Hemijaska Industrija*, 64(4): 351-356. <https://doi.org/10.2298/HEMIND100322014I>.
- Jo, B. W., Tae, G. H. and Kim, C. H. 2007. "Uniaxial creep behavior and prediction of recycled-PET polymer concrete". *Constr. Build. Mater.*, 21(7): 1552-1559.
- Kadri, E. H., Kenai, S., Ezziane, K., Siddique, R. and De Schutter, G. 2011. "Influence of metakaolin and silica fume on the heat of hydration and compressive strength development of mortar". *Appl. Clay Sci.*, 53(4): 704-708.
- Khatib, J. M., Baalbaki, O. and ElKordi1, A. A. 2018. "Metakaolin". In: *Waste and Supplementary Cementitious Materials in Concrete*. Vol. 25, Elsevier Ltd. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102156-9.00015-8>.
- Kou, S. C., Poon, C. S. and Agrela, F. 2011. "Comparisons of natural and recycled aggregate concretes prepared with the addition of different mineral admixtures". *Cement Concrete Comp.*, 33(8): 788-795. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2011.05.009>.

- Kumar, S., Panda, A. K., & Singh, R. K. 2011. "A review on tertiary recycling of high-density polyethylene to fuel". *Resources, Conservation and Recycling*, 55(11), 893–910.
- Lee, M. K. and Barr, B. I. G. 2004. "An overview of the fatigue behaviour of plain and fibre reinforced concrete". *Cement Concrete Comp.*, 26(4): 299-305. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0958-9465\(02\)00139-7](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0958-9465(02)00139-7).
- Lepadatu, D., Hambli, R., Kobi, A. and Barreau, A. 2005. "Optimisation of springback in bending processes using FEM simulation and response surface method". *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, 27(1-2): 40-47. <https://doi.org/10.1007/s00170-004-2146-z>.
- Lepadatu, D., Hambli, R., Kobi, A. and Barreau, A. 2006. "Statistical investigation of die wear in metal extrusion processes". *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, 28(3-4): 272-278.
- Li, V. C. and Matsumoto, T. 1998. "Fatigue crack growth analysis of fiber reinforced concrete with effect of interfacial bond degradation". *Cement Concrete Comp.*, 20(5): 339-351.
- Li, Z. and Ding, Z. 2003. "Property improvement of Portland cement by incorporating with metakaolin and slag". *Cement Concrete Res.*, 33(4): 579-584.
- Madandoust, R. and Mousavi, S. Y. 2012. "Fresh and hardened properties of self-compacting concrete containing metakaolin". *Constr. Build. Mater.*, 35: 752-760. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.04.109>.
- Marzouk, O. Y., Dheilily, R. M. and Queneudec, M. 2007. "Valorization of post-consumer waste plastic in cementitious concrete composites". *Waste Manage.*, 27(2): 310-318.
- Montgomery, D. C. 2013. "Design and Analysis of Experiments". 8th ed., John Wiley & Sons. Retrieved from https://books.google.com/books?hl=en&lr=&id=Py7bDgAAQBAJ&oi=fnd&pg=PA1&ots=X6t3n-MV-5&sig=HN7nP1mfdL1ppH4809mH8_1C50#v=onepage&q&f=false.
- Muduli, R. and Mukharjee, B. B. 2019. "Effect of incorporation of metakaolin and recycled coarse aggregate on properties of concrete". *J. Clean. Prod.*, 209: 398-414. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.10.221>.
- Myers, R. H., Montgomery, D. C. and Anderson-Cook, C. M. 2009. "Response Surface Methodology: Process and Product Optimization Using Designed Experiments". John Wiley & Sons, Inc., New York.
- Naik, T. R., Chun, Y. M., Kraus, R. N., Singh, S. S., Pennock, L. L. C. and Ramme, B. W. 2001. "Strength and durability of roller-compacted HVFA concrete pavements". *Pract. Period. Struct. Design Constr.*, 6(4): 154-165.
- Neocleous, K., Tlemat, H. and Pilakoutas, K. 2006. "Design issues for concrete reinforced with steel fibers, including fibers recovered from used tires". *J. Mater. Civ. Eng.*, 18(5): 677-685. <https://doi.org/10.1258/itt.2010.100803>.
- Nuaklong, P., Sata, V. and Chindaprasirt, P. 2018. "Properties of metakaolin-high calcium fly ash geopolymer concrete containing recycled aggregate from crushed concrete specimens". *Constr. Build. Mater.*, 161: 365-373. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.11.152>.
- Pilakoutas, K., Neocleous, K. and Tlemat, H. 2004. "Reuse of tyre steel fibres as concrete reinforcement". *Proc. ICE-Eng. Sustain.*, 157(3): 131-138. <https://doi.org/10.1258/itt.2010.100803>.
- Pittman, D. W. and Anderton, G. L. 2009. "The use of roller-compacted concrete (RCC) pavements in the United States". In: Sixth International Conference on Maintenance and Rehabilitation of Pavements and Technological Control (MAIREPAV6), International Society for Maintenance and Rehabilitation of Transportation Infrastructure Transportation Research Board, Retrieved from <https://trid.trb.org/view/899345>.
- Rahimi, S. R., Nikbin, I. M., Allahyari, H. and Habibi, T. S. 2016. "Sustainable approach for recycling waste tire rubber and polyethylene terephthalate (PET) to produce green concrete with resistance against sulfuric acid attack". *J. Clean. Prod.*, 126: 166-177. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.03.074>.
- Rahmani, E., Dehestani, M., Beygi, M. H. A., Allahyari, H. and Nikbin, I. M. 2013. "On the mechanical properties of concrete containing waste PET particles". *Constr. Build. Mater.*, 47: 1302-1308.
- Rezaifar, O., Hasanzadeh, M. and Gholhaki, M. 2016. "Concrete made with hybrid blends of crumb rubber and metakaolin: Optimization using response surface method". *Constr. Build. Mater.*, 123: 59-68. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.06.047>.
- Rossi, P. and Parant, E. 2008. "Damage mechanisms analysis of a multi-scale fibre reinforced cement-based composite subjected to impact and fatigue loading conditions". *Cement Concrete Res.*, 38(3): 413-421.
- Sabir, B. B., Wild, S. and Bai, J. 2001. "Metakaolin and calcined clays as pozzolans for concrete: a review". *Cement Concrete Comp.*, 23(6): 441-454.
- Sadrmomtazi, A., Dolati-Milehsara, S., Lotfi-Omran, O. and Sadeghi-Nik, A. 2016. "The combined effects of waste polyethylene terephthalate (PET) particles and pozzolanic materials on the properties of self-compacting concrete". *J. Clean. Prod.*, 112: 2363-2373.
- Said-Mansour, M., Kadri, E., Kenai, S., Ghrici, M. and Bennaceur, R. 2011. "Influence of calcined kaolin on mortar properties". *Constr. Build. Mater.*, 25(5): 2275-2282. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.11.017>.

- Saikia, N. and De Brito, J. 2012. "Use of plastic waste as aggregate in cement mortar and concrete preparation: A review". *Constr. Build. Mater.*, 34: 385-401. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.02.066>.
- Saikia, N. and de Brito, J. 2014. "Mechanical properties and abrasion behaviour of concrete containing shredded PET bottle waste as a partial substitution of natural aggregate". *Constr. Build. Mater.*, 52: 236-244.
- Shah, S. P. and Rangan, B. V. 1971. "Fiber reinforced concrete properties". In *ACI J. Proc.*, 68: 126-137.
- Shekarchi, M., Bonakdar, A., Bakhshi, M., Mirdamadi, A. and Mobasher, B. 2010. "Transport properties in metakaolin blended concrete". *Constr. Build. Mater.*, 24(11): 2217-2223. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.04.035>.
- Siddique, R., Khatib, J. and Kaur, I. 2008. "Use of recycled plastic in concrete: A review". *Waste Manage.*, 28(10): 1835-1852. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2007.09.011>.
- Siddique, R. and Klaus, J. 2009. "Influence of metakaolin on the properties of mortar and concrete: A review". *Appl. Clay Sci.*, 43(3-4): 392-400. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2008.11.007>.
- Tlemat, H. 2004. "Steel fibres from waste tyres to concrete: testing, modelling and design". University of Sheffield. Retrieved from <https://ethos.bl.uk/OrderDetails.do?jsessionid=B8A9968BF658C1579586EA3836AEF8B9?uin=uk.bl.ethos.506448>.
- Vejmelková, E., Pavlíková, M., Keppert, M., Keršner, Z., Rovnaníková, P., Ondráček, M., Sedlmajer, M. and Černý, R. 2010. "High performance concrete with Czech metakaolin: Experimental analysis of strength, toughness and durability characteristics". *Constr. Build. Mater.*, 24(8): 1404-1411. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.01.017>.
- Whitehurst, E. A. 1951. "Sonoscope tests of concrete structures". *ACI J Proc.* 47(6): 433-444.
- Wild, S., Khatib, J. M. and Jones, A. 1996. "Relative strength, pozzolanic activity and cement hydration in superplasticised metakaolin concrete". *Cement Concrete Res.*, 26(10): 1537-1544.