

بررسی عملکرد و مشخصات مکانیکی مخلوط بتن غلتکی (RCC) حاوی مقادیر بالای خاکستر بادی، خرده لاستیک بازیافتی و نانوسیلیس با استفاده از بهینه‌سازی سطح پاسخ

علیرضا عاملی، گروه مهندسی عمران، واحد قزوین، دانشگاه آزاد اسلامی، قزوین، ایران

ابراهیم پرورش کاران*، گروه مدیریت ساخت، دانشکده مهندسی کاربردی، فناوری و ایمنی، تهران، ایران

دانشگاه میلرزویل، میلرزویل، پنسیلوانیا، ایالات متحده آمریکا

سیدامیرحسین هاشمی، گروه مهندسی عمران، واحد قزوین، دانشگاه آزاد اسلامی، قزوین، ایران

*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: ebrahim.karan@millersville.edu

دریافت: ۹۷/۰۴/۰۹ - پذیرش: ۹۷/۰۸/۰۵

صفحه ۳۹۵-۳۸۱

چکیده

در این مقاله سعی شده تا خصوصیات مکانیکی نوعی بتن غلتکی دوسطار محیط زیست مورد بررسی قرار گیرد. به این منظور از نوعی آنالیز به عنوان آنالیز سطح پاسخ (RSM) استفاده شده است تا طرح مخلوط بهینه مورد بررسی قرار گیرد. متغیرهای مورد استفاده در این مطالعه شامل خاکستر بادی بعنوان جایگزین حجمی مصالح به میزان ۵۰٪، ۶۰٪ و ۷۰٪، خرده لاستیک بازیافتی به میزان ۱۰، ۲۰ و ۳۰٪ جایگزین مصالح ریز دانه و نانو سیلیس به میزان ۰ تا ۲ درصد جایگزین سیمان می باشند. بر اساس نتایج بدست آمده از ماکسیمم سازی مقاومت فشاری ۲۸ روزه نمونه ها و مقاومت فشاری و کششی آنها و با استفاده از روش بهینه سازی چند متغیره تحلیل ها انجام پذیرفته است. در نهایت نتایج حاکی از این بود که میزان بهینه جایگزینی ۱۰٪ حجمی خرده لاستیک بازیافتی، جایگزینی ۵۳/۷۲٪ سیمان با خاکستر بادی و افزودن ۱/۲۲٪ نانوسیلیس در مصالح سیمانی میتواند بیان کننده خصوصیات مخلوط بهینه باشد. بمنظور مطالعه بیشتر تاثیر خرده لاستیک بازیافتی و نانوسیلیس بر خصوصیات بتن غلتکی، از مخلوطهای شاهد با درصد خاکستر بادی ثابت (۵۰٪ سیمان) با میزان درصد متغیر خرده لاستیک ۰ تا ۳۰٪ و میزان نانوسیلیس ۰ تا ۳٪ استفاده شده است. در مقایسه با روسازیهای بتن غلتکی متداول، بتن غلتکی مورد مطالعه دارای چگالی، زمان وی بی، مقاومت فشاری و کششی و مدول الاستیسیته پایین تری می باشد. در هر حال پس از یک سال این بتن غلتکی از مقاومت فشاری بالاتری برخوردار شده است. در اثر جایگزینی خرده لاستیک با بخشی از مصالح ریزدانه، کاهش محسوسی در کلیه خصوصیات مکانیکی ذکر شده مشاهده گردید. با افزودن مواد نانوسیلیس کلیه خصوصیات مکانیکی بتن غلتکی افزایش یافته است.

واژه‌های کلیدی: بتن غلتکی، خاکستر بادی، نانو سیلیس، مقاومت فشاری، مقاومت کششی، مقاومت خمشی، آنالیز سطح پاسخ

۱- مقدمه

کارخانجات تولید سیمان بوجود می‌آید. بدین ترتیب نوعی بتن سازگار با محیط زیست در صنعت ساخت و ساز پدیدار گردیده

تمرکز جهان کنونی بر روی مسایل زیست محیطی بوده که با کاهش میزان دی اکسید کربن تا ۱۰٪ که بر اثر تولید سیمان در

کاهش تشکیل عنصر C-S-H و در نتیجه کاهش مقاومت شود. در مطالعه مشابه دیگری از همین ترکیب برای استفاده از خاکستر بادی در بتن غلتکی استفاده شد (Mardani-Aghabaglou *et al.* 2013). بر اساس نتایج بدست آمده مقاومت فشاری، کششی و خمشی تمامی نمونه‌ها تا سن ۱۸۰ روز کاهش یافت ولی روند کاهش مقاومت با افزایش سن نمونه‌ها متوقف شد. در مطالعه ای که توسط بابو و همکاران انجام گرفت، تأیید مقادیر بالای خاکستر بادی (HVFA) بر دوام عملکردی بتن غلتکی مورد مطالعه قرار گرفت (Yerramala and Babu 2011). آنها مقادیر ۴۰ و ۸۵٪ خاکستر بادی را جایگزین سیمان کردند. بر این اساس پایداری بتن غلتکی با افزایش میزان خاکستر بادی افزایش یافت. بر خلاف پایداری، نفوذپذیری و جذب آب تمامی نمونه‌ها تا سن ۹۰ روز افزایش یافت. در نهایت آنها گزارش نمودند که بتن غلتکی نفوذناپذیرتری با بکارگیری ۶۰ تا ۷۰٪ خاکستر بادی تولید خواهد شد. قابل مشاهده است که خاکستر بادی باعث کاهش مقاومت اولیه و دوام روسازی بتن غلتکی و در نتیجه کاهش قابلیت باربری اولیه می‌گردد. بنابراین برای استفاده موثر از خاکستر بادی در بتن غلتکی بایستی از مواد نانو سیلیس نیز بعنوان جایگزین مصالح سیمانی بهره گرفت (Singh *et al.* 2013). نتایج مطالعات قبلی حاکی از این بود که با افزودن نانو سیلیس به بتن غلتکی، مخلوطی چگالتر با میزان حفرات کمتر پدید می‌آید که قطرشان کمتر می‌باشد. نانو سیلیس واکنش سریع‌تری در مقایسه با خاکستر بادی با آهک در هنگام هیدراسیون دارد. همچنین مواد نانو سیلیس میزان ژل CS-H بیشتری تولید می‌نماید که هم خمیر سیمان و سنگدانه‌ها را چگال‌تر می‌نماید و هم حفرات مخلوط را پر می‌نماید (Supit and Shaikh 2015). به این ترتیب ژانگ و ایسلام میزان ۱٪ وزنی سیمان مواد نانو سیلیس با میزان ۵۰٪ خاکستر بادی را به بتن غلتکی اضافه نمودند. مواد نانو سیلیس هیدراسیون خمیر سیمان را سرعت بخشیده که نتایج نشان داد که هر دو مقاومت اولیه و دراز مخلوط برای نمونه‌های ۳ روزه و ۷ روزه به میزان ۲۵٪ و ۳۰٪ افزایش یافت. این مقادیر برای نمونه‌های ۲۸ و ۹۰ روزه به میزان ۱۳ و ۱۸٪ افزایش داشته که در مقایسه با مخلوط‌های حاوی مقادیر بالای خاکستر بادی بدون مواد نانو سیلیس چشمگیر بوده است. در مطالعه مشابه دیگری از

تا از طریق کاهش میزان استفاده از سیمان در بتن، آلودگی‌های ناشی از تولید سیمان را به حداقل برساند. برای نیل به این هدف از مواد سیمانی شامل خمیر سیلیس، خاکستر سبوس برنج، خاکستر آتشفشانی، سرباره کوره ذوب آهن به عنوان جایگزین بخشی از سیمان داخل بتن حین اختلاط بتن یا در هنگام تولید یمان پوزولانی، استفاده می‌شود (Juenger and Siddique 2015). بتنی که بیشتر از ۵۰٪ خاکستر آتشفشانی داشته باشد را بتن خاکستر بالا (HVFA) معرفی می‌شود (Monteiro 2006). بتن غلتکی (RCC) نوعی بتن با اسلامپ صفر است که در کارگاه مرکزی تولید و اختلاط شده و توسط کامیون حمل و نقل و با دستگاه فینیش در محل پخش می‌گردد. بتن غلتکی پخش شده توسط غلتک فلزی و بیره و غلتک لاستیکی متراکم می‌شود (Shoenberger 1994). میزان دوام و افزایش مقاومت و سرعت هیدراسیون بتن غلتکی به انتخاب مصالح مربوطه بستگی دارد. استفاده از سیمان نوع II بعلاوه میزان حرارت هیدراسیون ایجاد شده کمتر و زمان گیرش طولانی‌تر، متداول‌تر و مقرون بصرفه‌تر است.

مواد پوزولانی نظیر خاکستر آتشفشانی و سرباره عموماً بعنوان مواد سیمانی افزودنی و یا فیلر معدنی در بتن غلتکی استفاده می‌شوند. این گونه مواد نوعی روانی در هنگام پخش بوجود می‌آورند و حفرات مابین خمیر سیمان و مصالح را در مخلوط پر می‌نمایند. خاکستر بادی نوع F باعث بهبود کارایی و افزایش زمان پخش شده و تا بالای ۵۰٪ حجمی بتن غلتکی استفاده می‌شوند (Fuhrman, 2000). استفاده از خاکستر بادی در تهیه بتن غلتکی بطور چشمگیری متداول شده است زیرا باعث کاهش هزینه‌های تولید، افزایش دوام و مقاومت دراز مدت و کاهش دمای هیدراسیون در حین اختلاط می‌شود (Rao *et al.* 2016a). در یک مطالعه سه مخلوط با مقادیر مختلف خاکستر بادی (۰، ۲۰، ۴۰ و ۶۰٪) جایگزین بخشی از سیمان ساخته شدند (Rao *et al.* 2016b). براساس مشاهدات آزمایشات انجام گرفته مقاومت فشاری و کششی، تاب سایشی و سرعت موج اولتراسونیک رد بتن غلتکی برای هر سری از مخلوط‌ها با افزایش مقادیر خاکستر بادی (تا ۹۰ روز) کاهش میابد. آنها این کاهش را مرتبط با واکنش کند مواد پوزولانی درون خاکستر بادی در سنین اولیه بتن دانسته‌اند و معتقدند که این می‌تواند باعث

شد. نیروهای اعمالی از سوی وسایل نقلیه باعث ایجاد تنش خستگی و ترک خوردگی شده و در نهایت باعث کاهش طول عمر و افزایش هزینه نگهداری می‌شود (Adamu et al. 2017). اثر خستگی بر بتن غلتکی با افزایش انعطاف‌پذیری بتن غلتکی بهبود خواهد یافت. این موضوع با بکارگیری الیاف‌ها، پلیمرها یا خرده لاستیک‌ها در بتن غلتکی حاصل خواهد شد. وجود افزودنی‌های ذکر شده باعث جذب انرژی کرنشی و تغییر شکل‌های ناشی از بارهای ترافیکی می‌شود (Moghaddam et al. 2011). طی مطالعات گسترده‌ای که بر روی استفاده از خرده لاستیک در بتن غلتکی صورت گرفته است، نتیجه اینگونه بدست آمده که نرمی و جذب انرژی مخلوط افزایش یافته و تردی آن کاهش می‌یابد. همچنین خمر خستگی، هدایت گرمایی، جذب صدا نیز افزایش یافته و در برابر سرعت انتشار ترک در برابر تنشهای کششی و خمشی کاهش خواهد یافت.

ولیکن تنها نقطه ضعف بکارگیری خرده لاستیک در بتن، کاهش مشخصات مکانیکی و دوام آن می‌باشد (Rashad 2016).

در این مطالعه سعی شده است تا با استفاده از مواد نانوسیلیس، خاکستر بادی و خرده لاستیک امکان تولید بتن غلتکی اقتصادی و دوستار محیط زیست را بررسی نماید. خرده لاستیک جایگزین بخشی از مواد ریز دانه شده و خاکستر بادی نیز جایگزین بخشی از سیمان شده تا هزینه‌های تولید را پایین آورده و مزایای محیط زیستی را افزایش داده و احتمال ترک خوردگی حرارتی را کاهش دهد. نانو سیلیس به عنوان افزودنی مصالح سیمانی برای جبران کاهش در خصوصیات مکانیکی و دوام مخلوط در اثر استفاده از خرده لاستیک به مخلوط اضافه شده است. همچنین کاهش مقاومت اولیه بتن در اثر استفاده از خاکستر بادی بعلاوه در خصوصیات پوزولانی خاکستر در سنین اولیه نیز با بکارگیری مواد نانو سیلیس برطرف خواهد شد.

مقادیر ۲ و ۴٪ مواد نانو سیلیس به همراه ۴۰ و ۶۰ درصد خاکستر بادی در مواد سیمانی استفاده شد و بهبود محسوسی در مقاومت فشاری کوتاه مدت بتن غلتکی مشاهده گردید. مقاومت فشاری ۳ روزه و ۷ روزه بتن حاوی ۴۰٪ خاکستر بادی و ۲٪ نانو سیلیس به میزان ۱۵۲۵٪ افزایش داشت ولی برای مخلوط حاوی ۶۰٪ خاکستر بادی و ۲٪ نانو سیلیس تنها مقاومت فشاری ۳ روزه تحت تاثیر قرار گرفت و افزایش یافت و در سایر سنین افزایشی مشاهده نگردید. نتایج مشابهی برای نمونه‌های حاوی ۶۰٪ خاکستر بادی و ۴٪ نانو سیلیس گزارش شده است. این به دلیل واکنش پوزولانی بالاتر خمیر سیلیس نسبت به خاکستر بادی در سنین اولیه است زیرا دارای ذرات کوچکتر و سطح مخصوص بالاتر است (Supit and Shaikh 2015). آنان در ادامه ۲٪ نانو سیلیس به مخلوط حاوی ۶۰٪ خاکستر بادی اضافه نمودند (Shaikh and Supit 2015b). آنان دریافتند که کارایی بتن با افزایش خاکستر بادی افزایش یافته و با افزایش نانو سیلیس بعلاوه آب دوستی بیشتر آن در اثر سطح مخصوص بالاتر، این کارایی کاهش خواهد یافت. مقاومت بتن حاوی خاکستر بادی به ترتیب به میزان ۱۶۷،۰۰ و ۴/۵۵٪ طی ۳،۷،۲۸ و ۹۰ روز با افزودن نانوسیلیس، افزایش یافت. نرخ جذب آب با افزودن نانوسیلیس به بتن حاوی مقادیر بالای خاکستر بادی به میزان ۷/۳۲ و ۲۳٪ برای بتنهای ۲۸ و ۹۰ روزه کاهش یافت. نانو سیلیس همچنین حجم حفرات بتن حاوی خاکستر بادی را به میزان ۵۳٪ با بکارگیری نانو سیلیس کاهش داد. یکی از مزایای استفاده از بتن غلتکی در راهسازی اینست که این بتن به علت میزان سیمان پایین تر دوستار محیط زیست است. ولیکن بزرگترین معضل اینگونه بتن‌ها صلبیت بالای آنها و ترک خوردگی آنها در اثر مقاومت کششی پایین تر و خزش پلاستیک آنهاست (Mohammed and Adamu 2018). بعلاوه به دلیل روش پخش و تراکم آنها، بکارگیری آرماتور و داول بارها در آنها غیر ممکن است. از آنجا که اینگونه روسازی‌ها در معرض تنش‌های کششی-خمشی و خستگی ناشی از بارگذاری سنگین می‌باشند، تنها باربری از طریق خود بتن بدون هرگونه تسلیح در آن صورت پذیرفته و این انتقال بار به واسطه تماس و قفل و بست سنگدانه‌ای و خمیر سیمان ایجاد خواهد

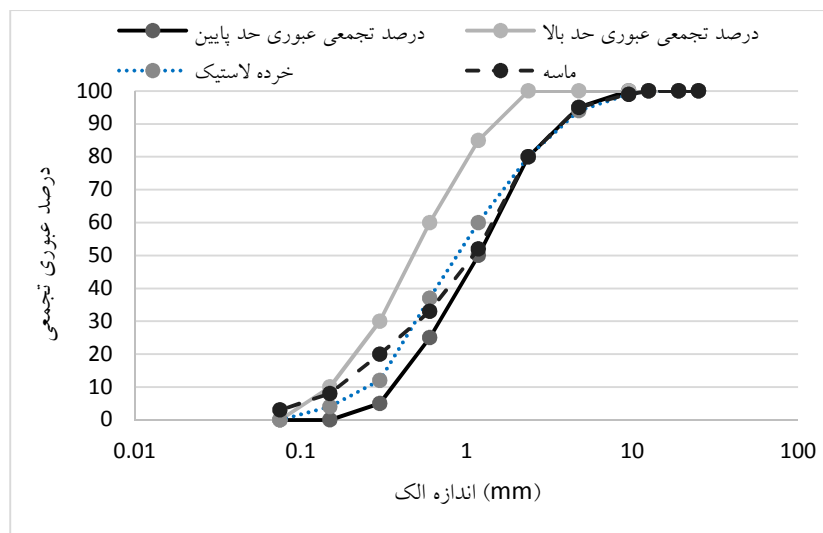
۲- مصالح و طرح اختلاط

۲-۱- مصالح

در این تحقیق برای ساخت نمونه های بتن غلتکی از سیمان نوع II شرکت سیمان تهران بر اساس مشخصات ذکر شده در ASTM C150M استفاده شده است. وزن مخصوص سیمان ۳/۱۵ و مشخصات شیمیایی آن در جدول ۱ آورده شده است.

در این تحقیق از مصالح سنگدانه ای کوهی معدن اسبچران واقع در دماوند استفاده شده است. مشخصات دانه بندی مصالح سنگی به همراه حدود پیشنهادی آیین نامه ای در شکل ۱ نشان داده شده است. وزن مخصوص مصالح سنگی (حالت اشباع با سطح خشک) برابر ۲/۶۵، مدول نرمی ۲/۸۶ و جذب آب ۱/۲۴٪ برای مصالح ریز دانه گزارش شده است. ۲ گروه مصالح سنگی درشت دانه (شن) با حداکثر اندازه اسمی ۱۹ میلیمتر و وزن مخصوص ۲/۶۶ و جذب آب ۰/۴۸٪ و حداکثر اندازه اسمی ۶/۳۵ میلیمتر و وزن مخصوص ۲/۵۵ با جذب آب ۲/۵۵٪ برای درشت دانه

مورد استفاده قرار گرفتند. برای ایجاد دانه بندی مناسب در خرده لاستیک از دو گروه خرده لاستیک با حداکثر اندازه اسمی ۴ و ۱۲ میلی متر استفاده شد تا جایگزین مناسبی برای مصالح ریزدانه باشند. بر اساس دانه بندی انجام شده و آنالیز الکها بر اساس استاندارد ASTM D5644، مقادیر ۴۰٪ درصد مانده روی الک ۰/۵۹۵ میلیمتر (شماره #۳۰)، ۴۰٪ رده از الک ۳ میلیمتر و مانده روی ۱ میلیمتر و ۲۰٪ زیر ۵ میلی متر برای حصول به دانه بندی مورد نیاز، انتخاب شدند. منحنی دانه بندی نهایی در شکل ۱ نشان داده شده است. خاکستر بادی بر اساس مشخصات استاندارد ASTM C311، ASTM C612 و با خصوصیات مندرج در جدول ۱ به عنوان جایگزین سیمان با درصدهای انتخابی مورد استفاده قرار گرفتند. مواد نانو سیلیس با اندازه ۱۰-۲۵ نانو متر و با خصوصیات به شدت آبرگیر به عنوان افزودنی سیمان مورد استفاده قرار گرفت.



شکل ۱. منحنی دانه بندی مصالح سنگی ریز دانه ASTM C33

۲-۲- طرح اختلاط

تهیه و ساخت نمونه های بتن غلتکی بر اساس استاندارد ACI 211.3R و بر اساس روش تراکم خاک انجام پذیرفت. در این راستا بر اساس مراحل زیر نسبت به تهیه طرح اختلاط نمونه ها اقدام شد.

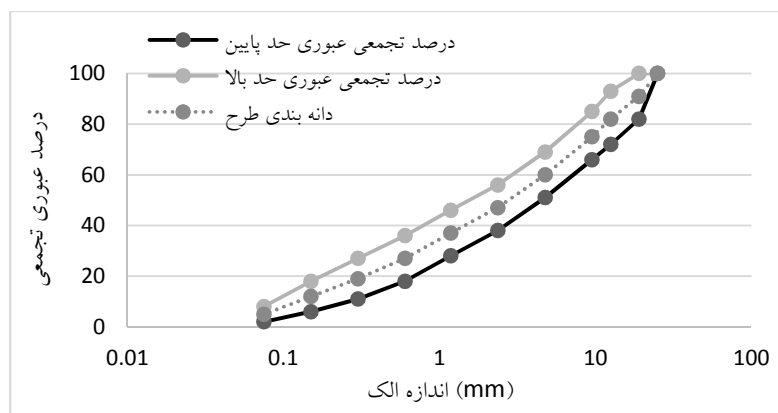
۱- تعیین مقادیر بهینه ریزدانه و درشت دانه و فیلر تا رسیدن به دانه بندی مورد نظر مابین حدود دانه بندی استاندارد (در این تحقیق از استاندارد انجمن مهندسان آمریکا استفاده شده است) (۱۶۲ ۱۹۹۲). منحنی دانه بندی نهایی که در شکل ۲ نشان داده شده است با درصد اختلاط ۵۵٪ ریز دانه، ۲۰٪ مصالح ۱۲-۱۹ میلی متر و ۲۰٪ مصالح ۶-۱۲ میلی متر و ۵٪ فیلر خاکستر بادی

جدول ۱. مشخصات شیمیایی سیمان و خاکستر بادی

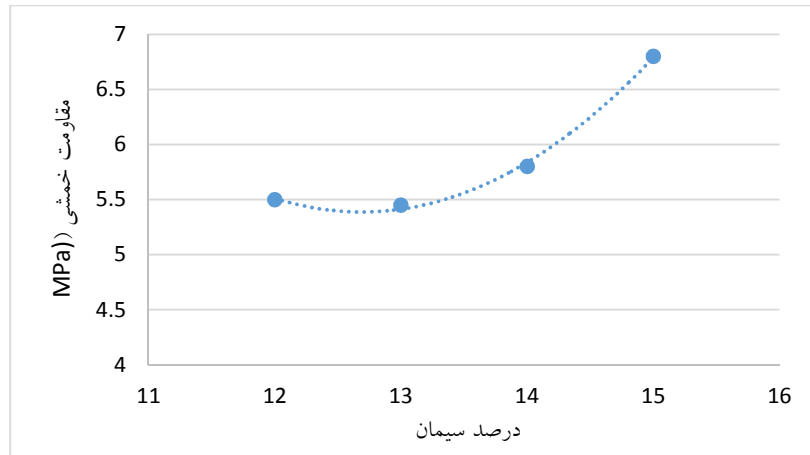
درصد موجود در ترکیب	سیمان	خاکستر بادی
SiO ₂	۲۰/۷۶	۵۷/۰۶
Al ₂ O ₃	۵/۵۴	۲۰/۹۶
Fe ₂ O ₃	۳/۳۵	۴/۱۵
MnO	-	۰/۰۳۳
CaO	۶۱/۴	۹/۷۹
MgO	۲/۴۸	۱/۷۵
Na ₂ O	۰/۱۹	۲/۲۳
K ₂ O	۰/۷۸	۱/۵۳
TiO ₂	-	۰/۶۸
افت حرارتی	۲/۲	۱/۲۵
وزن مخصوص	۳/۱۵	۲/۳
نرمی (m ² /kg)	۳۲۵	۲۹۰

حاصل شده است. میزان درصد رطوبت بهینه و حداکثر چگالی خشک بر اساس استاندارد ASTM D1557 محاسبه و گزارش گردیده است (Soil and Rock 2009). در ساخت نمونه ها از ۴ درصد متفاوت سیمان ۱۳، ۱۲، ۱۰ و ۱۵٪ وزن خشک مصالح سنگی استفاده شده است. برای هر درصد سیمان از ۵ ترکیب متفاوت بر اساس درصد آب مابین ۴/۵٪ تا ۶/۵٪ وزن خشک سنگدانه ها برای تعیین میزان رطوبت بهینه و ترسیم منحنی وزن مخصوص-درصد رطوبت استفاده شده است.

۲- در مرحله بعد که البته مرحله ای تعیین کننده نیز می باشد، میزان درصد سیمان بر اساس مقاومت فشاری- خمشی نمونه های بتنی محاسبه و تعیین گردید. بدین منظور منحنی مقاومت فشاری- خمشی نمونه ها بر حسب درصدهای سیمان متفاوت مابین ۱۲ تا ۱۵٪ و میزان رطوبت بهینه بدست آمده برای هر کدام بر اساس آزمایشات مرحله قبل، ترسیم می گردد. در ادامه مقاومت خمشی ۲۸ روزه نمونه ها تعیین شده و رابطه مابین درصد سیمان و مقاومت فشاری-خمشی نمونه ها استخراج گردیده است که در شکل ۳ آورده شده است. بر اساس مقاومت خمشی ۲۸ روزه ۴/۸ MPa، ۱۳٪ سیمان برای ساخت نمونه ها تعیین گردید. بر اساس درصد سیمان انتخاب شده، میزان درصد آب به سیمان ۰/۴۲ برای مخلوط نهایی مورد استفاده قرار می گیرد. به منظور کاهش میزان آب نمونه های بتن، می توان از فوق روان کننده به میزان ۱٪ وزن سیمان استفاده نمود. بر این اساس می توان ۱۲٪ میزان آب را کاهش داده و درصد آب به سیمان را به ۰/۳۷ تقلیل داد.



شکل ۲. دانه بندی مخلوط بتن غلتکی



شکل ۳. رابطه مابین مقاومت خمشی و درصد سیمان مخلوط بتن غلتکی

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

در این رابطه y پاسخ مدل، x_i متغیرهای مستقل، i ثابت خطی، j ثابت غیرخطی، β ثابت رگرسیون، β_0 ثابت عرض از مبدا، k تعداد متغیرهای مورد استفاده در آنالیز و ε خطای رابطه برازش شده می‌باشد (Montgomery 2017).

برای تعیین روابط از نرم افزار طراحی آزمایشات (DOE) ویرایش ۱۰ برای بهینه‌سازی روش سطح پاسخ استفاده شده است. و برای طراحی آزمایشات از روش باکس-بنکن و بر اساس متغیرهای خرده لاستیک، نانو سیلیس و خاکستر بادی استفاده شده است. هر متغیر از سه سطح تغییر برخوردار است: خرده لاستیک (۱۰٪-۲۰٪-۳۰٪ مصالح ریزدانه)، نانو سیلیس (۰٪-۱٪-۲٪) وزنی سیمان اضافه شده به مواد سیمانی و خاکستر بادی به میزان (۵۰٪-۶۰٪-۷۰٪ جایگزین سیمان). پاسخ‌های در نظر گرفته شده عبارتند از: مقاومت فشاری، کششی و خمشی ۲۸ روزه بر اساس طرح آزمایشات ۱۹ مخلوط مورد مطالعه و بررسی قرار گرفتند. میزان فیلر موجود در نمونه‌ها برابر کیلوگرم بر متر مکعب ۱۰۴ انتخاب شد. جزئیات ترکیب و طرح اختلاط نمونه‌ها در جدول ۲ نشان داده شده است.

۲-۳- روش پاسخ سطح

روش سطح پاسخ مناسب‌ترین و متداول‌ترین تکنیک ریاضی-آماري برای آنالیز و ارایه مدل مابین یک یا چند متغیر مستقل و پاسخ می‌باشد. علاوه بر این، روش سطح پاسخ برای مدل‌سازی و بهینه‌سازی چند متغیره با تعریف اهداف بر اساس پاسخ‌هایشان، نیز مورد استفاده قرار می‌گیرد (Montgomery 2017). مدل‌های طراحی گوناگونی برای آنالیز و محاسبه سطح پاسخ در این روش وجود دارد که می‌توان برای استخراج رابطه ریاضی مابین متغیرهای مستقل و پاسخ‌ها مورد استفاده قرار گیرد. از متداول‌ترین آنها می‌توان به روش ترکیب مرکزی، سوابق داده‌ای، باکس-بنکن و ... اشاره نمود. انتخاب هر یک از این روش‌ها به تعداد متغیرها و سطح تغییرات هر یک بستگی دارد (Montgomery 2017).

از آنجایی که رابطه مابین پاسخ و متغیرهای مستقل نامشخص است، در ابتدا یک مدل خطی درجه یک بر اساس معادله شماره ۱ به متغیرها برازش می‌شود.

در این رابطه y پاسخ مدل، β_0 ثابت معادله و $\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_n$ ضرایب متغیرهای مستقل و ε خطای رابطه برازش شده می‌باشد. در صورت وجود انحنا در داده‌ها برازش مدل خطی برای پاسخ‌ها

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_n x_n + \varepsilon \quad (1)$$

مناسب نخواهد بود. در این صورت ایجاد رابطه از درجات بالاتر به شکل رابطه ۲ مناسبتر خواهد بود.

جدول ۲. مشخصات ترکیب مخلوط‌های بتن غلتکی

RUN	خرده لاستیک	خاکستر بادی	خاکستر بادی	نانوسیلیس	سیمان	نانوسیلیس	فیلمر	ماسه	درشت دانه	آب	خرده لاستیک
1	20	50	1	134.58	102.54	2.37	103.94	920.06	833.34	96.87	229.78
2	10	70	2	80.81	143.66	4.49	103.94	1135.07	833.93	96.31	114.89
3	20	60	1	107.7	123.09	2.31	103.94	920.06	833.63	96.59	229.78
4	30	60	1	107.7	123.09	2.31	103.94	805.05	833.63	96.87	344.67
5	20	60	1	107.7	123.09	2.31	103.94	920.06	833.63	96.59	229.78
6	10	60	1	107.7	123.09	2.31	103.94	1135.07	833.63	96.87	114.89
7	10	50	0	134.58	102.54	0	103.94	1135.07	833.34	96.87	114.89
8	20	60	0	107.7	123.09	0	103.94	920.06	833.63	96.87	229.78
9	30	50	0	134.58	102.54	0	103.94	805.05	833.34	96.87	344.67
10	30	70	2	80.81	143.66	4.49	103.94	805.05	833.93	96.87	344.67
11	20	60	1	107.7	123.09	2.31	103.94	920.06	833.63	96.59	229.78
12	20	60	1	107.7	123.09	2.31	103.94	920.06	833.63	96.59	229.78
13	10	70	0	80.81	143.66	0	103.94	1135.07	833.93	96.87	114.89
14	20	60	1	107.7	123.09	2.31	103.94	920.06	833.63	96.59	229.78
15	20	60	2	107.7	123.09	4.62	103.94	920.06	833.63	96.87	229.78
16	20	70	1	80.81	143.66	2.24	103.94	920.06	833.93	96.87	229.78
17	30	50	2	134.58	102.54	4.74	103.94	805.05	833.34	96.87	344.67
18	10	50	2	134.58	102.58	4.74	103.94	1135.07	833.34	96.87	114.89
19	30	70	0	80.81	143.66	0	103.94	805.05	833.93	96.87	344.67

۲-۴- تهیه و ساخت نمونه‌ها و روش آزمایش

نیز بر اساس همین استاندارد و با استفاده از نمونه‌های استوانه‌ای به قطر ۱۰۰ میلی‌متر و ارتفاع ۲۰۰ میلی‌متر انجام پذیرفت. نمونه‌ها در سنین ۳،۷،۲۸ و ۹۰ روز پس از عمل آوری مورد آزمایش قرار گرفتند. آزمایش مقاومت خمشی بر اساس استاندارد **ASTM C293** و با استفاده از نمونه‌های تیرچه به ابعاد ۱۰۰×۱۰۰×۵۰۰ میلی‌متر انجام پذیرفت. مقاومت خمشی نمونه‌ها نیز در سنین ۷،۲۸ و ۹۰ روزه تعیین گردید.

برای شبیه سازی لرزش واقعی در محل اجرا و رسیدن به حداکثر تراکم، از چکش ویبره با فرکانس هرتز ۵۰ بر اساس استاندارد **ASTM C1435** استفاده شده است. هر نمونه در سه سطح مساوی ریخته و متراکم شده است. تراکم کامل زمانی حاصل می‌گردد که خمیر سیمان در بالای صفحه فولادی پدیدار گردد. روانی و چگالی بر اساس روش استاندارد **ASTM C1170** تعیین گردید. مقاومت فشاری براساس مشخصات مندرج در استاندارد **BS 12390** و با استفاده از نمونه مکعبی ۱۰۰ میلی‌متری تعیین گردید. نمونه‌ها در سنین متفاوت ۳،۷،۲۸،۹۰ و ۳۶۵ روزه مورد آزمایش قرار گرفتند. مقاومت کششی نمونه‌ها

۳- نتایج و بحث

۳-۱- روش سطح پاسخ

ماتریس طرح آزمایشات و طرح اختلاط نمونه‌ها در جدول ۳ آورده شده است.

جدول ۳. نتایج آزمایشات نمونه‌های بتن غلتکی و ترکیب مخلوط‌ها برای طرح آزمایشات و بهینه‌سازی

RUN	خرده	خاکستر	نانوسیلیس	مقاومت	مقاومت
	لاستیک (%)	بادی (%)	(%)	مقاومت فشاری (MPa)	کششی (MPa)
1	20	50	1	43.13	4.32
2	10	70	2	33.53	3.14
3	20	60	1	32.38	3.33
4	30	60	1	33.28	3.07
5	20	60	1	32.07	3.02
6	10	60	1	38.88	3.72
7	10	50	0	38.21	3.36
8	20	60	0	22.71	2.72
9	30	50	0	30.25	2.72
10	30	70	2	24.43	2.4
11	20	60	1	30.37	3.28
12	20	60	1	34.78	3.41
13	10	70	0	26.69	2.56
14	20	60	1	33.61	3.11
15	20	60	2	29.45	3.15
16	20	70	1	28.08	2.95
17	30	50	2	33.29	2.84
18	10	50	2	44.46	4.22
19	30	70	0	21.86	2.05

۰/۰۶٪ معنی دار است. معناداری مدل و کلیه عناصرش را در بازه اطمینان ۹۵٪ مورد بررسی قرار می‌دهیم. بنابراین با پذیرش مقادیر دارای $P < 0.05$ نتایج مدل به شکل روابط ۴ تا ۶ ارائه می‌گردد.

۳-۱-۱- نتایج آنالیز واریانس

خلاصه نتایج آنالیز واریانس (ANOVA) برای پاسخ مقاومت فشاری در جدول ۴ آورده شده است. مقادیر کمیت F-value برای مقاومت فشاری، خمشی و کششی نمونه‌ها بیانگر این واقعیت است که مدل به ترتیب در سطح ۰/۰۱٪، ۰/۰۱٪ و ۰/۰۱٪

$$F_C = 171.13 - 163A - 3.71B + 16.33C + 0.031A^2 + 0.026B^2 - 6.89C^2 \quad (6)$$

$$F_T = -21.82 + 0.13A + 0.9B + 1.89C - 0.0044A^2 - 0.0077B^2 - 0.79C^2 \quad (7)$$

$$F_S = 6.08 - 0.039A - 0.044B + 1.12C - 0.44C^2 \quad (8)$$

که در این رابطه F_C مقاومت فشاری، F_T مقاومت خمشی، F_S مقاومت کششی در واحد MPa، A: درصد خرده لاستیک، B: درصد خاکستر بادی و C: درصد نانو سیلیس می‌باشد.

جدول ۴. نتایج آنالیز واریانس برای مدل اراده شده برای نمونه‌های بتن غلتکی

	Source	Sum of Squares	DF	mean		
				Square	F-value	P-value
مقاومت فشاری	Model	656.1365822	9	72.90406	24.67928	2.68E-05
	A-Crumb rubber	149.45956	1	149.4596	50.59464	5.59E-05
	B-Fly Ash	299.75625	1	299.7563	101.4727	3.37E-06
	C-Nano silica	64.71936	1	64.71936	21.90862	0.001151
	AB	3.38	1	3.38	1.144188	0.312617
	AC	6.9938	1	6.9938	2.367522	0.158266
	BC	0.0018	1	0.0018	0.000609	0.980845
	A ²	26.38245625	1	26.38246	8.930916	0.015239
	B ²	18.93305132	1	18.93305	6.409164	0.032149
	C ²	129.8134422	1	129.8134	43.94409	9.6E-05
	Lack of Fit	15.52065361	5	3.104131	1.122055	0.468665
مقاومت خمشی	Model	18.05068106	9	2.005631	23.55958	3.26E-05
	A-Crumb rubber	2.25625	1	2.25625	26.50353	0.000605
	B-Fly Ash	0.60025	1	0.60025	7.050966	0.026244
	C-Nano Silica	0.92416	1	0.92416	10.85585	0.009306
	AB	0.2628125	1	0.262813	3.087184	0.112787
	AC	0.2628125	1	0.262813	3.087184	0.112787
	BC	0.0378125	1	0.037813	0.444173	0.521831
	A ²	0.521211914	1	0.521212	6.122528	0.035316
	B ²	1.606400646	1	1.606401	18.86993	0.001867
	C ²	1.712861914	1	1.712862	20.1205	0.00152
	Lack of Fit	0.584291572	5	0.116858	2.570009	0.190712
مقاومت کششی	Model	5.190656751	9	0.57674	11.57551	0.00059
	A-Crumb rubber	1.53664	1	1.53664	30.8413	0.000355
	B-Fly Ash	1.90096	1	1.90096	38.15342	0.000163
	C-Nano Silica	0.54756	1	0.54756	10.98986	0.00901
	AB	0.0741125	1	0.074112	1.487483	0.253604
	AC	0.1176125	1	0.117613	2.360554	0.158814
	BC	0.0003125	1	0.000312	0.006272	0.938609
	A ²	0.008374299	1	0.008374	0.168077	0.691413
	B ²	0.093151764	1	0.093152	1.869612	0.204693
	C ²	0.725715144	1	0.725715	14.56554	0.004112
	Lack of Fit	0.345016933	5	0.069003	2.669377	0.18138

مقاومت فشاری، خمشی و کششی نمونه‌های بتن غلتکی از طریق مدل برازش نشده‌اند. به عبارت دیگر مدل‌ها از لحاظ آماری مناسب هستند. علاوه بر این برای مدل‌های برازش شده بر مقاومت فشاری و خمشی، مقادیر R^2 پیش‌بینی شده و تعدیل شده با یکدیگر تطابق داشته و اختلافی کمتر از ۰/۲ دارند.

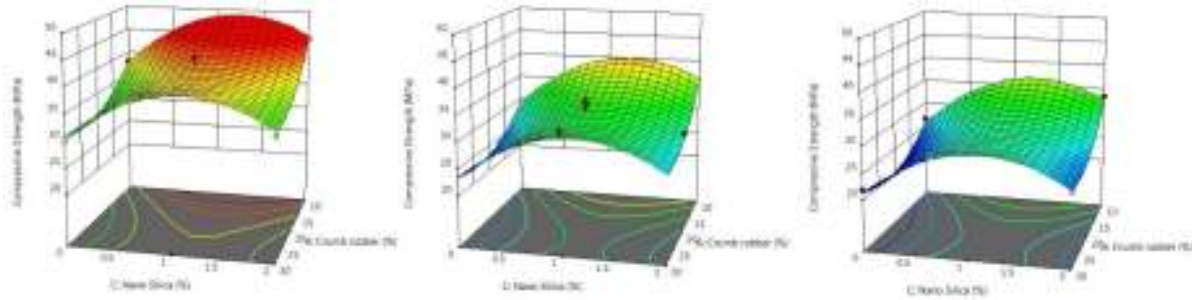
برای بررسی دقت، انطباق و کفایت مدل برازش شده از آزمون درجه همبستگی استفاده شد. همانگونه که در جدول ۵ مشخص شده است، تمامی مدل‌ها از مقادیر بالای R^2 برخوردارند که تماماً از مقدار ۰/۹ بیشتر هستند. بدین معنا که به ترتیب تنها تعداد داده‌های ۳/۹٪، ۴/۱٪ و ۷/۹٪ از

جدول ۵. جدول ضرایب مدل برازش شده به نمونه های بتن غلتکی برای مقاومت فشاری، خمشی و کششی

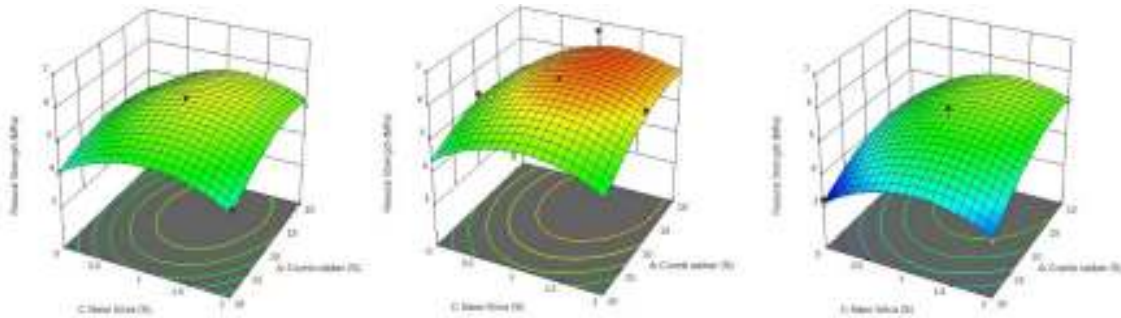
	مقاومت فشاری		مقاومت خمشی		مقاومت کششی	
	اولیه	اصلاح شده	اولیه	اصلاح شده	اولیه	اصلاح شده
Intercept	+177.14707	+171.12707	-23.94230	-21.81730	+13.27914	+6.08200
A-Crumb rubber	-1.92603	-1.62953	+0.254076	+0.127201	-0.062681	-0.039200
B-Fly Ash	-3.83778	-3.70628	+0.924978	+0.895603	-0.283792	-0.043600
C-Nano silica	+18.10936	+16.32936	+1.83751	+1.88751	+1.54472	+1.11533
AB	+0.006500	0	-0.001812	0	+0.000962	0
AC	-0.093500	0	-0.018125	0	-0.012125	0
BC	+0.001500	0	+0.006875	0	-0.000625	0
A ²	+0.031073	+0.031073	-0.004368	-0.004368	-0.000554	0
B ²	+0.026323	+0.026323	-0.007668	-0.007668	+0.001846	0
C ²	-6.89268	-6.89268	-0.791753	-0.791753	-0.515361	-0.440667
R ²	0.961058	0.9459	0.959283	0.9293	0.92048	0.8698
Adjusted R ²	0.922116	0.9188	0.918565	0.8940	0.840961	0.8326
Predicted R ²	0.79844	0.8486	0.720319	0.7949	0.501982	0.7483
Adeq Precision	19.06323	22.3136	14.76928	15.1330	13.11631	18.0817
S.D	-	1.72	-	0.29	-	0.23
Mean	-	32.18	-	5.16	-	3.12

با افزایش درصد خاکستر بادی و خرده لاستیک، کاهش یافته و با افزودن نانوسیلیس افزایش خواهد یافت. به همین گونه در روابط ۴ تا ۶ می توان این مطلب را به صورت ضرایب مثبت و منفی پارامترها مشاهده نمود. کاهش مقاومت در اثر استفاده از خاکستر بادی در بتن را می توان در اثر واکنش پوزولانی کمتر در سنن اولیه عمر بتن جستجو نمود. حال آنکه این کاهش مقاوت در اثر بکارگیری خرده لاستیک به دلیل این است که خرده لاستیک دارای سختی و مقاومت کمتری در مقایسه با مصالح سنگی است که در نهایت منجر به باربری پایین تری می گردد. البته چسبندگی کمتر مابین ملات سیمان و خرده لاستیک نیز مزید بر علت می گردد. افزایش مقاومت در اثر افزودن نانوسیلیس به علت واکنش پوزولانی بیشتر آن در خمیر سیمان و مصرف بیشتر هیدرات کلسیم ناشی از هیدراسیون سیمان است که در نتیجه میزان هیدرات کلسیم سیلیکات بیشتری تولید شده و باعث افزایش مقاومت می گردد.

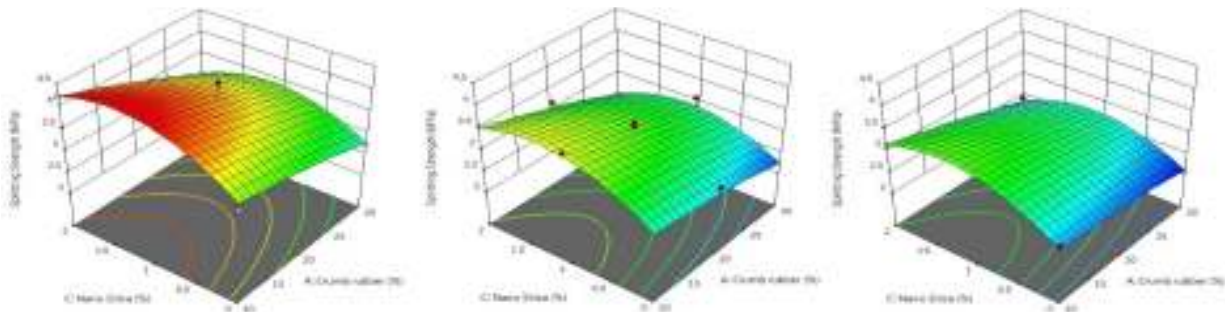
در صورتی که اختلاف مابین R^2 تعدیل شده و تخمین زده شده بیشتر از ۰/۲ باشد مدل بخوبی برازش نشده و بهتر است که مقادیر ضرایب دارای $P > 0.1$ از مدل کنار گذاشته شوند. بنابراین با حذف گزینه هایی که با این معیار تفاوت دارند و آنالیز دوباره مدل، مدلی که بهترین برازش را داشته به دست خواهد آمد که در جدول ۵ آورده شده است. با بررسی مجدد مقادیر R^2 تفاوت مابین هر گروه کمتر از ۰/۲ می باشد که بیانگر برازش صحیح مدل می باشد. هرچه مقادیر انحراف استاندارد در مقایسه با میانگین کمتر باشد، مدل از انطباق بیشتری برخوردار بوده و نتایج حاصل از مدل به داده ها نزدیک ترند. از مدل سه بعدی سطح پاسخ برای ترسیم رابطه مابین دو متغیر و یک پاسخ به ازای تغییر سایر پارامترها استفاده می شود. در اشکال ۴ تا ۶ مودار ۳ بعدی سطح پاسخ برای مقاومت فشاری، خمشی و کششی آورده شده است. دیاگرام های مربوط برای هر یک از پاسخ ها در برابر دو متغیر درصد نانوسیلیس و درصد خرده لاستیک، در سه سطح ۵۰٪ و ۶۰٪ و ۷۰٪ خاکستر بادی، ترسیم شده است. کلیه پاسخها



شکل ۴. نمودار سه بعدی سطح پاسخ مقاومت فشاری به ترتیب از چپ به راست برای سطوح ۵۰، ۶۰، ۷۰ درصد خاکستر بادی



شکل ۵. نمودار سه بعدی سطح پاسخ مقاومت خمشی به ترتیب از چپ به راست برای سطوح ۵۰، ۶۰، ۷۰ درصد خاکستر بادی



شکل ۶. نمودار سه بعدی سطح پاسخ مقاومت کششی به ترتیب از چپ به راست برای سطوح ۵۰، ۶۰، ۷۰ درصد خاکستر بادی

۳-۱-۲- بهینه سازی چند متغیره

نتایج بهینه سازی متغیرها در جدول ۶ آورده شده است. بنابراین با جایگزینی ۱۴/۱۲٪ خرده لاستیک در ریزدانه مصالح سنگی و ۵۳/۷۲٪ خاکستر بادی در سیمان و اضافه کردن ۱/۲۲٪ نانو سیلیس در وزن مصالح سیمانی بهترین نتایج حاصل خواهد شد. مخلوط بهینه با مقاومت فشاری ۴۴/۴۶ مگاپاسکال، مقاومت خمشی ۶/۱۳ مگاپاسکال و مقاومت کششی ۴/۰۵ مگاپاسکال در سن ۲۸ روز با مطلوبیت ۹۰/۲٪ به دست خواهد آمد.

هدف از بهینه سازی چند متغیره، تعیین مقادیر بهینه متغیرها در مخلوط با توجه به خصوصیات و کمیتهای پاسخها است. در حقیقت بهینه سازی بر اساس ماکزیمم سازی متغیرهای وابسته نظیر مقاومت فشاری، خمشی و کششی و در نتیجه بهترین عملکرد مدلهاست. این عمل از طریق تعیین ترکیب بهینه صورت خواهد پذیرفت. در این تحقیق از نرم افزار **Design expert11-1** برای بهینه سازی استفاده شده است.

جدول ۶. مشخصات مخلوط بهینه

مطلوبیت (%)	مقاومت کششی (MPa)	مقاومت خمشی (MPa)	مقاومت فشاری (MPa)	نانوسیلیس (%)	خاکستر بادی (%)	خرده لاستیک (%)
۹۰/۲	۴/۰۵	۶/۱۳	۴۴/۴۶	۱/۲۲	۵۳/۷۲	۱۰

۳-۱-۳- سنجش عملکرد مدل

برای سنجش عملکرد مدل‌های برازش شده و همچنین بررسی مشخصات مخلوط بهینه، از آزمایشات تکمیلی بر روی نمونه‌های ساخته شده از ترکیب بهینه استفاده شد. مقاومت‌های فشاری، خمشی و کششی مخلوط‌های ۲۸ روزه ساخته شده از ترکیب بهینه در آزمایشگاه اندازه‌گیری شده و از طریق مدل‌ها

بررسی و محاسبه گردید. در نهایت درصد خطای مدل برازش شده از طریق رابطه ۷ محاسبه گردید.

(۷) نتایج آزمایشگاهی / (نتایج آزمایشگاهی - مقادیر مدل) = درصد خطا
نتایج سنجش مقادیر آزمایشگاهی و مدل در جدول ۷ آورده شده که مقادیر خطای موجود بیانگر پذیرش مدل‌ها در حد قابل قبول است.

جدول ۷. مقایسه نتایج مشخصات بتن غلتکی با ترکیب بهینه و دو ترکیب تصادفی

پاسخ	خرده لاستیک (%)	خاکستر بادی (%)	نانوسیلیس (%)	نتایج مدل	نتایج آزمایشات	درصد خطا
مقاومت فشاری (MPa)	۱۰	۵۳/۷۲	۱/۲۲	۴۴/۴۶	۴۲/۸۷	۳/۷۱
۱۵	۶۰	۱/۵	۳۵/۰۵	۳۷/۱۱	۵/۵۵	
۲۰	۵۵	۱	۳۶/۱۸	۴/۶۴	۳۷/۹۵	
مقاومت خمشی (MPa)	۱۰	۵۳/۷۲	۱/۲۲	۶/۱۳	۵/۸۸	۴/۲۵
۱۵	۶۰	۱/۵	۶/۲۹	۵/۹۷	۵/۳۶	
۲۰	۵۵	۱	۶/۰۴	۵/۸۱	۳/۹۶	
مقاومت کششی (MPa)	۱۰	۵۳/۷۲	۱/۲۲	۴/۰۱	۳/۸۳	۴/۷۰
۱۵	۶۰	۱/۵	۳/۵۶	۳/۷۲	۴/۳۰	
۲۰	۵۵	۱	۳/۴۷	۳/۳۶	۳/۲۷	

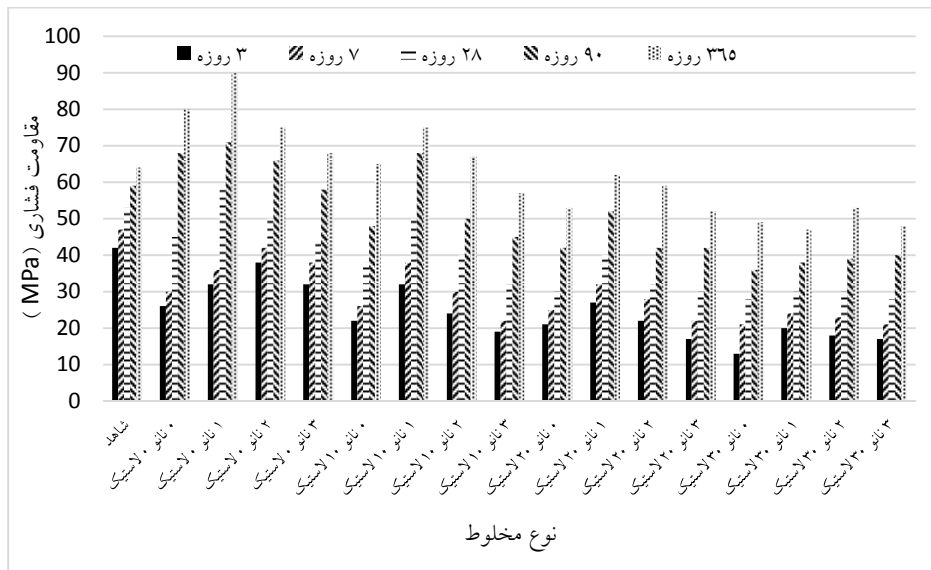
۲-۲- مقاومت فشاری

شکل ۷ تغییرات مقاومت خمشی نمونه‌ها در مقایسه با نمونه شاهد نشان می‌دهد. در تمامی نمونه‌ها بجز نمونه شاهد، از ۵۰٪ خاکستر بادی استفاده شده است. در استفاده از خاکستر بادی شاهد کاهش مقاومت فشاری در سنین ۳، ۷ و ۲۸ روز بوده‌ایم. این پدیده در اثر واکنش پوزولانی کمتر خاکستر بادی در افر کاهش ایجاد هیدرات سیلیکات کلسیم در سنین پایین بتن بوده است. ولی در نهایت پس از

۹۰ روز افزایش مقاومت بوجود آمده است. به عنوان مثال مقاومت فشاری نمونه حاوی ۵۰٪ خاکستر بادی و ۰٪ نانوسیلیس در مقایسه با نمونه شاهد پس از ۳۶۵ روز افزایش یافته است (Shaikh and Supit 2015a). برخلاف این پدیده با افزودن خرده لاستیک به نمونه‌های بتن غلتکی مقاومت فشاری کاهش می‌یابد. این دلیل چسبندگی کمتر لاستیک با خمیر سیمن، انعطاف‌پذیری بالاتر

خاکستر بادی و خرده لاستیک باعث بهبود مقاومت نمونه‌ها و برطرف ساختن ضعف ناشی از بکارگیری مواد بازیافتی در بتن می‌شود.

آن و باربری کمتر آن در مقایسه با سنگدانه‌های مخلوط می‌باشد. (Karahan et al. 2012, Youssef et al. 2017). افزودن ۲٪ نانوسیلیس به مخلوط حاوی ۵۰٪

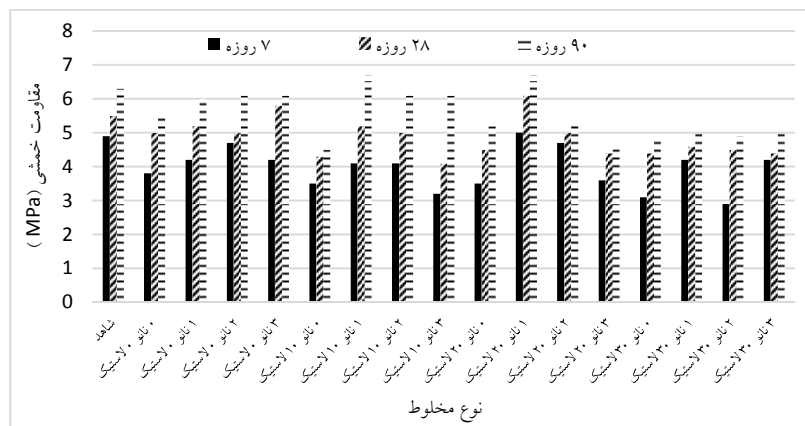


شکل ۷. نمودار تغییرات مقاومت فشاری برای مخلوط‌های حاوی ۵۰٪ خاکستر بادی در مقایسه با نمونه شاهد

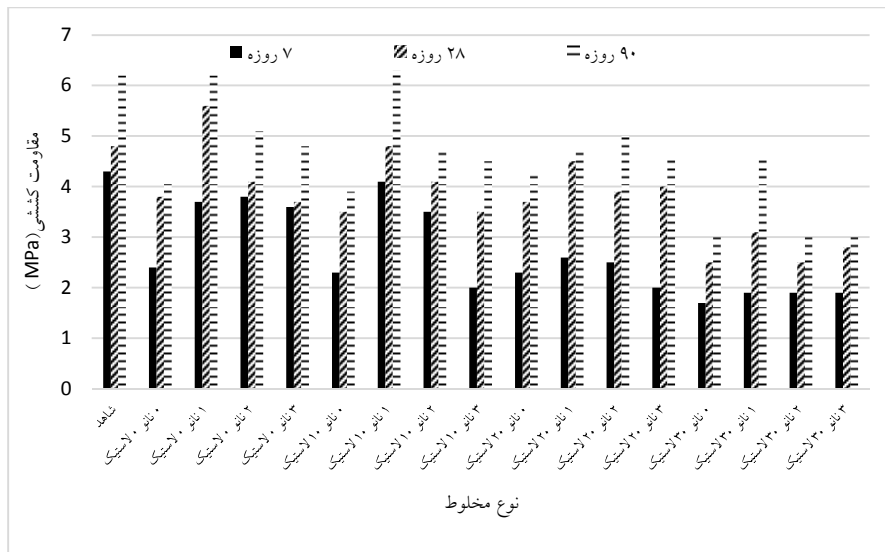
۳-۲- مقاومت خمشی و کششی

مقاومت خمشی و کششی در سنین ۷، ۲۸ و ۹۰ روزه از نمونه‌های بتن غلتکی به دست آمده و در اشکال ۸ و ۹ نشان داده شده است. ترکیب مخلوط‌های این نمونه‌ها نیز همانند ترکیب مخلوط نمونه‌های آزمایش شده برای مقاومت فشاری است. نتایج این آزمایشات مشابهت زیادی با نتایج آزمایشات مقاومت فشاری دارد.

مواد نانو حفرات ریزدرون بتن را پر ساخته و مخلوط چگالتری به وجود می‌آورند. در حین عمل هیدراسیون مواد نانو سیلیس میزان بیشتری خمیر C-S-H بیشتری تولید کرده و ضعف ناشی از بکارگیری خرده لاستیک و خاکستر بادی را برطرف ساخته و باعث افزایش مقاومت می‌شوند (Norhasri et al. 2017).



شکل ۸. نمودار تغییرات مقاومت خمشی برای مخلوط‌های حاوی ۵۰٪ خاکستر بادی در مقایسه با نمونه شاهد



شکل ۹. نمودار تغییرات مقاومت کششی برای مخلوط‌های حاوی ۰.۵٪ خاکستر بادی در مقایسه با نمونه شاهد

۴- نتیجه گیری

نتایج مدل‌های برازش شده بر نتایج آزمایشات انجام شده بر روی نمونه‌های بتن غلتکی حاوی مقادیر مختلف خرده لاستیک بازیافتی، خاکستر بادی و نانوسیلیس بر اساس آزمایشات مقاومت فشاری، خمشی و کششی مورد بررسی قرار گرفته است. همچنین مدلها بر اساس آزمایشات تکمیلی با درصدهای ترکیب مخلوط بهینه و دو ترکیب تصادفی صحت سنجی شد. نتایج زیر بر اساس ارزیابی‌های انجام شده حاصل گردید:

- ۱- درصد خطای صحت سنجی مدلها کمتر از ۰.۵٪ بوده که بیانگر پذیرش مدل‌های برازش شده می باشد.
- ۲- مخلوط بهینه بتن غلتکی مطالعه شده، حاوی ۵۳/۷۲٪ خاکستر بادی، ۱۰٪ خرده لاستیک بازیافتی و ۱/۲۲٪ نانو سیلیس گزارش گردید.
- ۳- افزودن خرده لاستیک بازیافتی و خاکستر بادی به نمونه‌های بتن غلتکی باعث کاهش مقاومت مخلوط بتن غلتکی گردید.
- ۴- بکارگیری نانو سیلیس باعث بهبود مشخصات مکانیکی مخلوط بتن غلتکی گردید و برای بهینه سازی مصرف مصالح بازیافتی در بتن قابل استفاده خواهد بود.

۵- مراجع

- Adamu, M., Mohammed, B.S. & Shafiq, N., (2017), "Flexural performance of nano silica modified roller compacted rubbercrete". International Journal of Advanced and Applied Sciences, 4 (9), pp.6-18.
- (1992), "Standard practice for selecting proportions for roller compacted concrete (rcc) pavement mixtures using soil compaction concepts". Department of the Army, Corps of Engineers Washington, DC.
- Fuhrman, R.L., (2000), "Engineering and design roller compacted concrete, department of the army us army corps of engineers". US Department of the Army, Corps of Engineers, Washington DC, USA.
- Juenger, M.C. & Siddique, R., (2015), "Recent advances in understanding the role of supplementary cementitious materials in concrete". Cement and Concrete Research, 78, pp.71-80.
- Karahan, O., Özbay, E., Hossain, K., Lachemi, M. & Atiş, C.D., (2012), "Fresh, mechanical,

- Rashad, A.M., (2016), "A comprehensive overview about recycling rubber as fine aggregate replacement in traditional cementitious materials". *International Journal of Sustainable Built Environment*, 5 (1), pp.46-82.
- Shaikh, F.U. & Supit, S.W. ,(2015a), Compressive strength and durability properties of high volume fly ash (hvfa) concretes containing ultrafine fly ash (uffa). *Construction and building materials*, 82, pp.192-205.
- Shaikh, F.U.A. & Supit, S.W., (2015b), "Chloride induced corrosion durability of high volume fly ash concretes containing nano particles". *Construction and Building Materials*, 99, pp. 208-225.
- Shoenberger, J. E., (1994), "User's guide: Roller-compacted concrete pavement".
- Singh, L., Karade, S., Bhattacharyya, S., Yousuf, M. & Ahalawat, S., (2013), "Beneficial role of nanosilica in cement based materials—a review". *Construction and Building Materials*, 47, pp.1069-1077.
- Soil, A.C.D.-O. & Rock, (2009), "Standard test methods for laboratory compaction characteristics of soil using modified effort (56,0ft-lbf/ft³ (2,700 kn-m/m³)) 1: ASTM international".
- transport, and durability properties of self-consolidating rubberized concrete. *ACI Materials Journal*, 109.
- Mardani-Aghabaglou, A., Andiç-Çakir, Ö. & Ramyar, K., (2013), "Freeze–thaw resistance and transport properties of high-volume fly ash roller compacted concrete designed by maximum density method". *Cement and Concrete Composites*, 37, pp.259-266.
- Moghaddam, T.B., Karim, M.R. & Abdelaziz, M., (2011), "A review on fatigue and rutting performance of asphalt mixes". *Scientific Research and Essays*, 6 (4), pp.670-682.
- Mohammed, B.S. & Adamu, M., (2018), "Mechanical performance of roller compacted concrete pavement containing crumb rubber and nano silica". *Construction and Building Materials*, 159, pp.234-251.
- Monteiro, P., (2006), "Concrete: Microstructure, properties, and materials: McGraw-Hill Publishing.
- Montgomery, D.C., (2017), "Design and analysis of experiments: John wiley & sons".
- Norhasri, M.M., Hamidah, M. & Fadzil, A.M., (2017), "Applications of using nano material in concrete: A review. *Construction and Building Materials*", 133, pp.91-97.
- Rao, S.K., Sravana, P. & Rao, T.C., (2016a), "Experimental studies in ultrasonic pulse velocity of roller compacted concrete pavement containing fly ash and m-sand". *International Journal of Pavement Research and Technology*, 9 (4), pp.289-301.
- Rao, S.K., Sravana, P. & Rao, T.C., (2016b), "Investigating the effect of m-sand on abrasion resistance of fly ash roller compacted concrete (frcc)". *Construction and Building Materials*, 118, pp.352-363.