

ارزیابی آزمایشگاهی خصوصیات مکانیکی روسازی بتن غلتکی با استفاده از روش سطح پاسخ

حسین عرب یارمحمدی، دانشجوی دکتری عمران، دانشکده مهندسی عمران، واحد ساری،

دانشگاه آزاد اسلامی، ساری، ایران

محمد کاظم شربتدار*، استاد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان

حسین نادرپور، استاد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان

Email: msharbatdar@semnan.ac.ir

دریافت: ۱۴۰۰/۰۴/۰۶ - پذیرش: ۱۴۰۰/۰۷/۰۹

چکیده

بتن غلتکی نوعی بتن خشک با اسلامپ صفر است که دارای دو کاربرد اصلی مختلف در سدسازی و روسازی است. با توجه به مزایایی مانند بهره‌وری هزینه، گرمای هیدراتاسیون کم، دوام و سرعت زیاد اجرا، این بتن به ویژه در ساخت باند فرودگاه‌ها، سایت‌های نظامی و نیروگاه‌های هسته‌ای ترجیح داده می‌شود. در این مقاله، چگونگی تأثیر مقدار سیمان، نسبت آب به سیمان (W/C) و نسبت ریزدانه به کل سنگدانه (S/A) بر مشخصات مکانیکی بتن غلتکی روسازی بررسی شده است. نتایج از طریق آزمایش‌های تجربی و تجزیه و تحلیل روش سطح پاسخ (RSM) به دست آمد. بدین منظور، دو مقدار سیمان، سه نسبت آب به سیمان و سه نسبت ریزدانه به کل سنگدانه در نظر گرفته شد و تأثیر این پارامترها بر کارایی، مدول الاستیسیته و مقاومت‌های فشاری، خمشی و کششی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که مؤثرترین راه برای افزایش کارایی (کاهش زمان وی بی)، افزایش نسبت آب به سیمان است. همچنین، مقدار سیمان و نسبت آب به سیمان رابطه‌ی معکوس با زمان وی بی داشتند. در حالی که نسبت ریزدانه به کل سنگدانه به طور مستقیم بر آن تأثیر می‌گذارد. مقدار سیمان بیشترین تأثیر را در مقاومت فشاری داشت و افزایش نسبت آب به سیمان نیز به دلیل افزایش میزان تراکم‌پذیری باعث افزایش مقاومت فشاری گردید. بر مبنای نتایج، مشخص گردید که مدول الاستیسیته تابعی از میزان مصالح سنگی درشت‌دانه است. از دیگر نتایج، تأثیر مقدار سیمان و اولین مقاومت در برابر ترک‌خوردگی خمیرسیمان بر مقاومت خمشی بود. در حالی که در مقاومت کششی، نسبت ریزدانه به کل سنگدانه بیشترین تأثیر را داشت.

واژه‌های کلیدی: زمان وی بی، بتن غلتکی، روسازی، مشخصات مکانیکی، روش سطح پاسخ

شده و در حالتی که بتن هنوز سخت نشده است، قابلیت

تحمل وزن غلتک را دارد (آقایی پور و مدح خوان

۲۰۱۹؛ ACI 207.5R-11؛ سوکونتاسوکول و همکاران

۲۰۱۹). با توجه به مزایایی مانند بهره‌وری هزینه، گرمای

هیدراتاسیون کم، دوام و سرعت زیاد اجرا، بتن غلتکی

۱. مقدمه

بتن غلتکی (RCC) در آیین‌نامه ACI 207.5R-11 و

سایر مراجع به‌عنوان بتنی خشک با اسلامپ صفر معرفی

بی (Vebe) کاهش یافت. همچنین، افزایش نسبت درشت دانه به ریزدانه به $1/2$ منجر به کاهش قابل توجهی در تخلخل RCC گردید و در نهایت مقدار سیمان زیاد منجر به بهبود عملکرد مکانیکی بتن غلتکی گردید.

هزاره و همکاران (۲۰۱۱) تأثیر مقادیر مختلف سیمان بر خصوصیات دوام RCC و همچنین خصوصیات مکانیکی و فیزیکی آن را بررسی کردند. چندین آزمایش شامل مقاومت فشاری، زمان Vebe و مقاومت در برابر انجماد و ذوب انجام گردید. مطالعه دیگر توسط فخری و عموسلطانی (۲۰۱۷) از مقادیر مختلف سیمان و نسبت درشت دانه به کل سنگدانه برای اندازه‌گیری مقاومت بتن غلتکی استفاده کردند. هنگامی که مقدار سیمان افزایش یافت، محققان نه تنها چگالی و مقاومت فشاری بیشتر بلکه مدول گسیختگی بیشتری نیز مشاهده کردند. این نتیجه در تحقیق علی احمد و همکاران (۲۰۱۷) تأیید شد. نتایج به دست آمده توسط شفیق و همکاران (۲۰۱۹) نشان داد که کاهش میزان آب مخلوط باعث افزایش زمان Vebe می‌شود. حداکثر چگالی خشک RCC نیز در میزان رطوبت $5/7$ درصد به دست آمد. همچنین، نتایج نشان داد خصوصیات از جمله کارایی، دوام و مقاومت زیاد زمانی ایجاد شد که میزان رطوبت کمتر از رطوبت بهینه بود. آقایی پور و مدح‌خوان (۲۰۱۷) چگونگی تأثیر مواد سیمانی مانند GGBFS بر دوام و خواص مکانیکی RCC را بررسی کردند. افزایش مقدار مواد سیمانی باعث بهبود مقاومت در برابر کشش و فشار و همچنین مدول گسیختگی در نتیجه‌ی کاهش نسبت آب به سیمان گردید. همچنین، سنگون و همکاران (۲۰۱۹) به مطالعه چگونگی تأثیر نسبت اختلاط و روش‌های تراکم بر خصوصیات RCC پرداختند. نتایج نشان داد که با نسبت آب به سیمان بیشتر، مقاومت فشاری بیشتری

به ویژه در ساخت باند فرودگاه‌ها، سایت‌های نظامی و نیروگاه‌های هسته‌ای ترجیح داده می‌شود (آلژین و جرجینسی، ۲۰۲۰؛ نیلی و ظاهری، ۲۰۱۱). در روند طراحی و ساخت RCC، پارامترهای مختلفی بر خصوصیات تازه و سخت شده آن تأثیر می‌گذارد. این پارامترها شامل میزان و نحوه‌ی تراکم، مقدار آب و مواد سیمانی، میزان مواد ریزتر از 75 میکرومتر، دانه‌بندی و کیفیت سنگدانه‌ها می‌باشد (آدامو و همکاران، ۲۰۱۸).

بسیاری از محققان اثرات پارامترهای مختلف را بر مشخصات بتن غلتکی ارزیابی کرده‌اند. اوسیپوف و همکاران (۱۹۹۲) بیان کردند که مقاومت‌های فشاری، کششی و خمشی بتن غلتکی با افزایش مقدار سیمان و کاهش نسبت آب به سیمان به صورت غیرخطی افزایش می‌یابد. داسمه و همکاران (۲۰۰۰) به بررسی فاصله زمانی بین ساخت و تراکم نمودن بتن غلتکی با در نظر گرفتن زمان‌های 15 ، 45 ، 60 ، 90 ، 120 و 150 دقیقه پرداختند. این محققان، بهبود در برخی مشخصات مکانیکی بتن غلتکی در هنگام تأخیر در تراکم گزارش را نمودند. در تحقیقی دیگر، قسراوی و همکاران (۲۰۰۵) به بررسی تأثیر شرایط آب‌وهوایی گرم بر اثر مقدار سیمان، نسبت آب به سیمان و نسبت میزان درشت دانه به کل سنگدانه بر مشخصات بتن غلتکی پرداختند. در این تحقیق، حداکثر اندازه اسمی سنگدانه-ها 20 میلی‌متر بود. آن‌ها دریافتند که مقدار سیمان بیشترین تأثیر را بر خصوصیات بتن غلتکی تازه و سخت شده دارد. آن‌ها همچنین دریافتند که کاهش نسبت آب به سیمان تفاوتی در مقاومت بتن غلتکی در مقایسه با بتن معمولی ایجاد نمی‌کند. هاشمی و همکاران (۲۰۱۸) مطالعه‌ای را بررسی کردند که چگونه نسبت درشت دانه به ریزدانه بر خصوصیات RCC با در نظر گرفتن دو عیار سیمان متفاوت تأثیر می‌گذارد. نتایج نشان داد که وقتی مقدار سیمان افزایش یافت، زمان وی

(سیامردی و شعبانی، ۲۰۲۱؛ روح الامینی و همکاران، ۲۰۱۸).

۲. ضرورت و ویژگی‌های تحقیق

بتن غلتکی یکی از بادوام‌ترین مصالح ساختمانی می‌باشد که استفاده و کاربرد آن در سال‌های اخیر افزایش یافته است. این بتن دارای مزایای بسیار زیادی از جمله کاهش سیمان مصرفی و به تبع آن کاهش حرارت هیدراتاسیون، استفاده از مصالح دانه‌ای نسبتاً گسترده در بافت بتن و به‌ویژه مزایای اقتصادی و سرعت زیاد اجرا می‌باشد (رحمانی و همکاران، ۲۰۲۰؛ آلژین و جرجینسی، ۲۰۲۰). بنابراین، ارزیابی مشخصات مکانیکی بتن غلتکی و روابط این مشخصات با فاکتورهای طرح اختلاط جهت رسیدن به مشخصات مکانیکی بهینه داری اهمیت فراوانی می‌باشد. اگرچه تلاش‌های زیادی برای ارزیابی خصوصیات RCC انجام شده است، روابط بین پارامترهای طرح اختلاط و خواص مکانیکی آن به ندرت با استفاده از RSM بررسی شده است. بنابراین، این مطالعه بر اثر میزان نسبت مقدار ریزدانه به کل سنگدانه (S/A)، مقدار سیمان (C) و نسبت آب به سیمان (W/C) بر خواص تازه و سخت‌شده‌ی RCC متمرکز است. به طور خاص، آزمایش‌هایی برای تعیین این خواص از جمله زمان Vebe، مدول الاستیسیته، و همچنین مقاومت‌های کششی، فشاری و خمشی انجام گردید و روابط بین متغیرها و نتایج با استفاده از RSM تعیین و مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت.

۳. برنامه آزمایشگاهی

۳-۱. مواد، مصالح و طرح اختلاط

برای مخلوط با محتوای سیمان بیشتر ایجاد گردید. هم نسبت تراکم و هم میزان سیمان تأثیر قابل‌توجهی بر خصوصیات مکانیکی RCC داشتند. رحمانی و همکاران (۲۰۲۰) تأثیر پارامترهای مختلفی را بر عملکرد بتن غلتکی بررسی نمودند. نتایج نشان داد که وقتی نسبت آب به سیمان کاهش یافت، زمان Vebe به شدت افزایش پیدا کرد. برعکس، هرچه نسبت درشت دانه به کل سنگدانه و مقدار سیمان افزایش یافت، بر زمان Vebe تأثیر منفی گذاشت. نتایج مشخص نمود که بالا بردن نسبت آب به سیمان از مقاومت کششی، مدول الاستیسیته و مدول گسیختگی کاست؛ در حالی که نسبت درشت دانه به کل سنگدانه‌ی بیشتر باعث افزایش این خصوصیات گردید.

روش پاسخ سطح^۱ یکی از رویکردهای آماری برای ایجاد رابطه بین متغیرها و پاسخ‌ها است (زاهد و همکاران ۲۰۱۸). این روش می‌تواند بدون تلاش قابل‌توجه، زمان مورد نیاز برای تجزیه و تحلیل و طراحی آزمایش‌ها را کاهش دهد. از آنجا که این روش موجب تسهیل طرح پژوهش، بهینه‌سازی و تجزیه و تحلیل آزمایش‌ها می‌گردد (شفیق و همکاران ۲۰۱۸)، یکی از روش‌های مورد نظر محققان است. غنی زاده و همکاران (۱۳۹۷) به مدل‌سازی مقاومت فشاری بتن غلتکی حاوی خرده آسفالت بازیافتی پرداختند. آن‌ها با استفاده از روش پاسخ سطح مدلی برای پیش‌بینی مقاومت فشاری بتن غلتکی ارائه نمودند. در تحقیقی دیگر، عاملی و همکاران (۱۳۹۷) به ارزیابی مشخصات بتن غلتکی حاوی خاکستر بادی، خرده لاستیک بازیافتی و نانوسیلیس با استفاده از بهینه‌سازی روش پاسخ سطح پرداختند. محققان دیگری نیز تأثیر انواع الیاف در مشخصات مکانیکی بتن غلتکی را با استفاده از طراحی و تجزیه و تحلیل روش پاسخ سطح بررسی نمودند

¹ - Response Surface Methodology (RSM)

نشان می‌دهند. گزارش ACI 325.10R-95 انجمن بتن آمریکا روش‌هایی را برای تعیین نسبت‌های اختلاط بتن غلتکی ارائه کرده است. اساس این روش‌ها بر رویکرد تجربی استوار بوده و بدین لحاظ نیاز به ساخت مخلوط‌های آزمایشی زیادی می‌باشد (-ACI 325.10R 95, 2001). با توجه به موارد ذکر شده و به منظور ارزیابی اثر پارامترهای نسبت آب به سیمان، مقدار سیمان و نسبت ریزدانه به کل سنگدانه بر اساس روش تجربی، ۱۸ سری بتن غلتکی با دو مقدار متفاوت عیار سیمان (۳۰۰ و ۳۵۰ کیلوگرم در متر مکعب)، سه نسبت آب به سیمان (۰/۳۵، ۰/۴۰ و ۰/۴۵) و سه مقدار ریزدانه به کل سنگدانه (۰/۴۰، ۰/۵۰ و ۰/۶۰) ساخته شد که مشخصات آن‌ها در جدول ۳ ارائه شده است. حداکثر قطر سنگدانه‌ی مورد استفاده ۱۹ میلی‌متر و ۲ درصد حفره هوای غیرعمد در نظر گرفته شد. هر طرح اختلاط به صورت S40G60-C300-0.35 نامگذاری گردید. به این معنی که مقدار ماسه ۴۰ درصد و مقدار شن ۶۰ درصد از کل سنگدانه، عیار سیمان ۳۰۰ کیلوگرم در متر مکعب و نسبت آب به سیمان طرح ۰/۳۵ است.

سیمان پرتلند نوع II و سنگدانه‌های خردشده‌ی شن و ماسه، مصالح موجود در مطالعه حاضر هستند. جدول ۱، اجزای شیمیایی سیمان را نشان می‌دهد. خصوصیات فیزیکی سنگدانه‌ها از جمله وزن مخصوص، جذب آب و مدول نرمی در جدول ۲ ارائه شده است. در این تحقیق، از دو نوع سنگدانه درشت خردشده (شن)، یعنی G1 و G2 با اندازه‌های ۱۲/۵ - ۱۹ میلی‌متر و ۴/۷۵ - ۱۲.۵ میلی‌متر و سنگدانه ریز (ماسه) با اندازه ۰ - ۴/۷۵ میلی‌متر استفاده شد. مخلوط RCC برای رسیدن به یک مخلوط کارا تر به سنگدانه‌های ریز عبوری از الک شماره ۲۰۰ نیاز دارد. بر اساس مطالعات انجام شده، از محتوای کل سنگدانه، مقدار ۲ الی ۸ درصد برای این اندازه پیشنهاد شده است (هارینگتون و همکاران، ۲۰۱۰؛ استاندارد PCA، ۲۰۰۴). بدین منظور، از ماسه به همراه فیلر برای رسیدن به درصد مناسب استفاده گردید. برای رسیدن به حدود استاندارد دانه‌بندی سنگدانه‌ها مطابق استاندارد PCA، سنگدانه‌های مورد استفاده با درصد‌های مختلفی با هم ترکیب و استفاده شده‌اند. شکل ۱، منحنی دانه‌بندی سنگدانه‌ها بر اساس استاندارد ASTM C33 (۲۰۰۳) و شکل ۲ ترکیب آنها را به همراه حدود استاندارد PCA

جدول ۱. اجزای شیمیایی سیمان

Compound/ Property	Cement
Chemical analysis (%)	
Calcium oxide (CaO)	۶۳/۳۶
Silica (SiO ₂)	۲۱/۱۱
Alumina (Al ₂ O ₃)	۴/۴۲
Iron oxide (Fe ₂ O ₃)	۳/۹۶
Magnesium oxide (MgO)	۱/۵۱
Sodium oxide (Na ₂ O)	۰/۳۸
Potassium oxide (K ₂ O)	۰/۵۱
Sulfur trioxide (SO ₃)	۲/۶۱
Tri calcium silicate(C ₃ S)	۵۴/۷۰
Di calcium silicate(C ₂ S)	۱۹/۳۰
Tri calcium aluminate (C ₃ A)	۵/۰۰

جدول ۲. خصوصیات فیزیکی سنگدانه‌ها

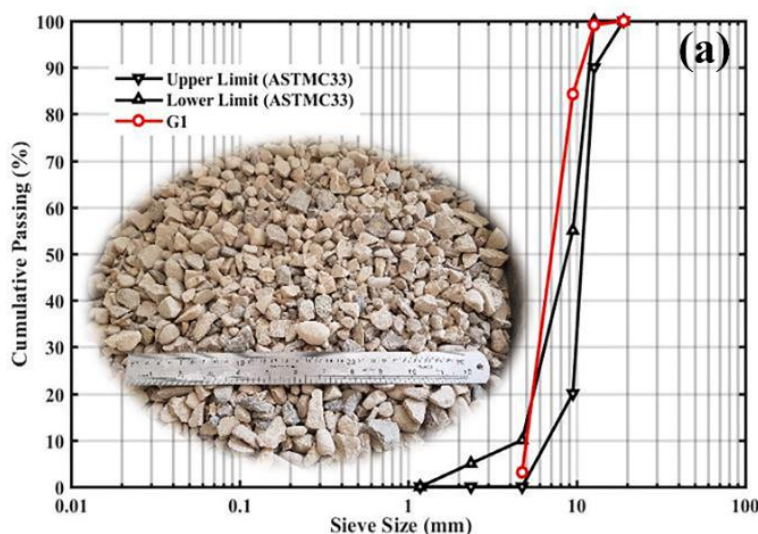
ابعاد سنگدانه‌ها	ماسه (S) (0-4.75 mm)	شن (G1) (12.5-19 mm)	شن (G2) (4.75-12.5 mm)
وزن مخصوص (g/cm ³)	۲/۶۴	۲/۶۵	۲/۶۵
جذب آب (%)	۴/۷۰	۱/۲۱	۱/۴۰
مدول نرمی	۳/۵۵	۸/۲۶	۷/۰۸

۲-۳. روش‌های آزمایش

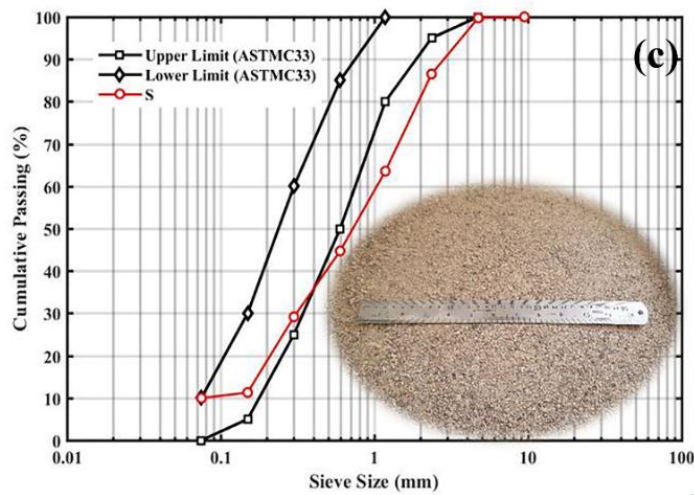
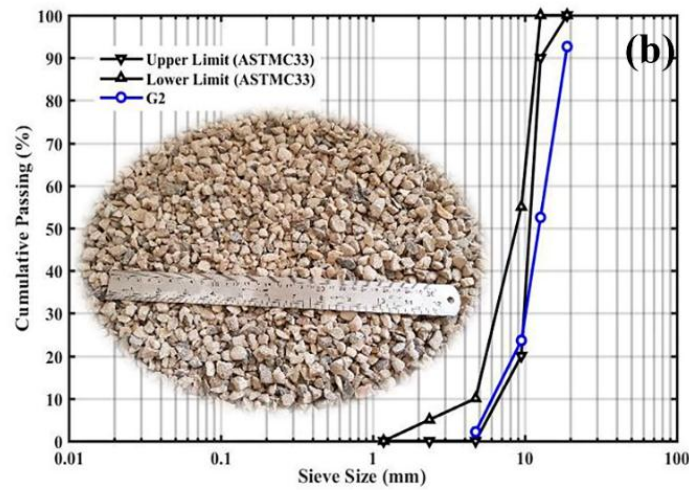
مطابق استاندارد ASTM C1170 (۱۹۹۸) از آزمون Vebe برای اندازه‌گیری کارایی بتن غلتکی استفاده گردید. شکل ۴ تجهیزات آزمون کارایی و نحوه تشکیل شیره بتن در اطراف حلقه دستگاه را نشان می‌دهد. تست‌های مدول الاستیسیته و مقاومت فشاری به ترتیب مطابق استاندارد ASTM C469 (۲۰۱۴) و ASTM C39 (۲۰۱۰) انجام گردید. چیدمان آزمایش‌های فوق در شکل ۵ نشان داده شده است. به منظور ارزیابی مقاومت کششی RCC، به ترتیب دو آزمایش کشش دونیم‌شدن و خمش چهارنقطه‌ای مطابق استانداردهای ASTM C496 (۲۰۰۸) و ASTM C78 (۲۰۱۰) انجام گردید. چیدمان آزمایش‌های کشش در شکل ۶ نشان داده شده است.

۲-۲. آماده سازی نمونه‌ها

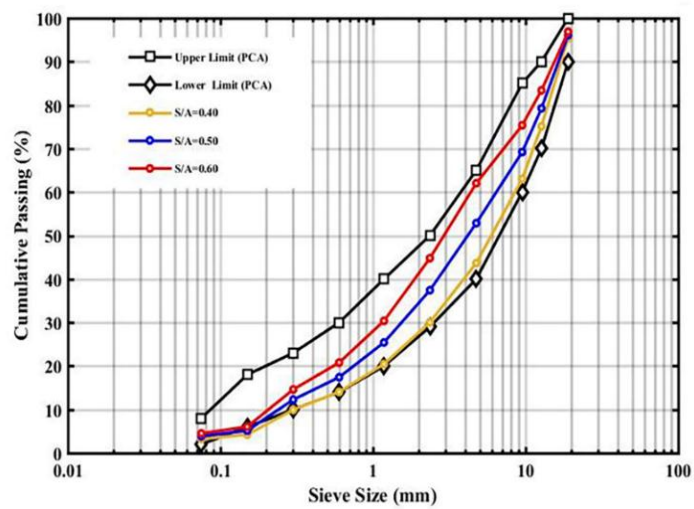
هر طرح اختلاط از ۹ نمونه شامل ۶ نمونه استوانه‌ای به قطر ۱۰۰ میلی‌متر و ارتفاع ۲۰۰ میلی‌متر برای آزمایش‌های مقاومت فشاری، مدول الاستیسیته و مقاومت کششی و ۳ نمونه منشوری به ابعاد ۳۵۰×۱۰۰×۱۰۰ میلی‌متر برای انجام تست مقاومت خمشی تشکیل گردید. کلیه نمونه‌ها در سه لایه با استفاده از میز ویبره و بر اساس استاندارد ASTM C1176 (۲۰۰۸) با استفاده از وزنه تراکم جهت اعمال تنش به میزان ۰/۰۰۴۶ مگاپاسکال ساخته شدند. مطابق شکل ۳، نمونه‌ها پس از ۲۴ ساعت نگهداری و سپس بازکردن قالب، به مدت ۲۸ روز تا زمان آزمایش در حوضچه‌ی آب نگهداری شدند.



ارزیابی آزمایشگاهی خصوصیات مکانیکی روسازی بتن غلتکی با استفاده از روش سطح پاسخ ارزیابی آزمایشگاهی خصوصیات مکانیکی روسازی بتن غلتکی با استفاده از روش سطح پاسخ



شکل ۱. منحنی دانه‌بندی سنگدانه‌ها



شکل ۲. ترکیب سنگدانه‌ها و حدود استاندارد PCA

جدول ۳. نسبت‌های طرح اختلاط در هر متر مکعب

Mix name	W/C Ratio	Combined percentage of aggregates		Cement Weight (kg)	Total water (kg)	Modified water* (kg)	Coarse aggregate (kg)		Sand (kg)
		Sand	Coarse				G1	G2	
S40G60-C300-0.35	0.35			300	105	162.07	867.88	371.95	826.55
S40G60-C300-0.40	0.40	40	60	300	120	175.98	851.18	364.79	810.65
S40G60-C300-0.45	0.45			300	135	189.88	834.49	357.64	794.75
S50G50-C300-0.35	0.35			300	105	162.07	723.23	309.96	1033.19
S50G50-C300-0.40	0.40	50	50	300	120	175.98	709.32	303.99	1013.31
S50G50-C300-0.45	0.45			300	135	189.88	695.40	298.03	993.44
S60G40-C300-0.35	0.35			300	105	162.07	578.58	247.96	1239.82
S60G40-C300-0.40	0.40	60	40	300	120	175.98	567.45	243.19	1215.97
S60G40-C300-0.45	0.45			300	130	189.88	556.32	238.42	1192.12
S40G60-C350-0.35	0.35			350	122.5	177.13	830.73	356.03	791.17
S40G60-C350-0.40	0.40	40	60	350	140	193.35	811.25	347.68	772.62
S40G60-C350-0.45	0.45			350	157.5	209.57	791.88	339.33	754.07
S50G50-C350-0.35	0.35			350	122.5	177.13	692.28	296.69	998.97
S50G50-C350-0.40	0.40	50	50	350	140	193.35	676.04	289.73	965.78
S50G50-C350-0.45	0.45			350	157.5	209.57	659.81	282.78	942.59
S60G40-C350-0.35	0.35			350	122.5	177.13	553.82	237.35	1186.76
S60G40-C350-0.40	0.40	60	40	350	140	193.35	540.84	231.79	1158.93
S60G40-C350-0.45	0.45			350	157.5	209.57	527.85	226.22	1131.11

* مقدار آب با توجه به میزان جذب آب سنگدانه‌ها اصلاح شده است و سنگدانه‌ها در شرایط خشک قرار داشتند.

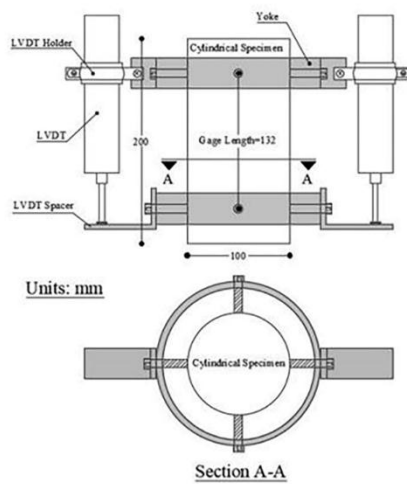


شکل ۳. نحوه‌ی نگهداری نمونه‌ها

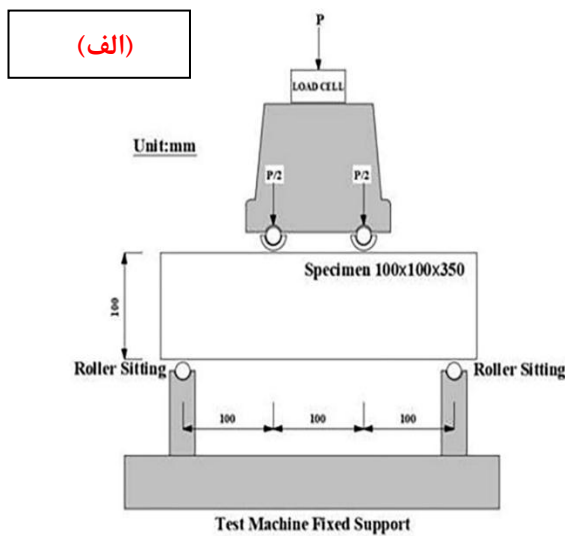
ارزیابی آزمایشگاهی خصوصیات مکانیکی روسازی بتن غلتکی با استفاده از روش سطح پاسخ ارزیابی آزمایشگاهی خصوصیات مکانیکی روسازی بتن غلتکی با استفاده از روش سطح پاسخ



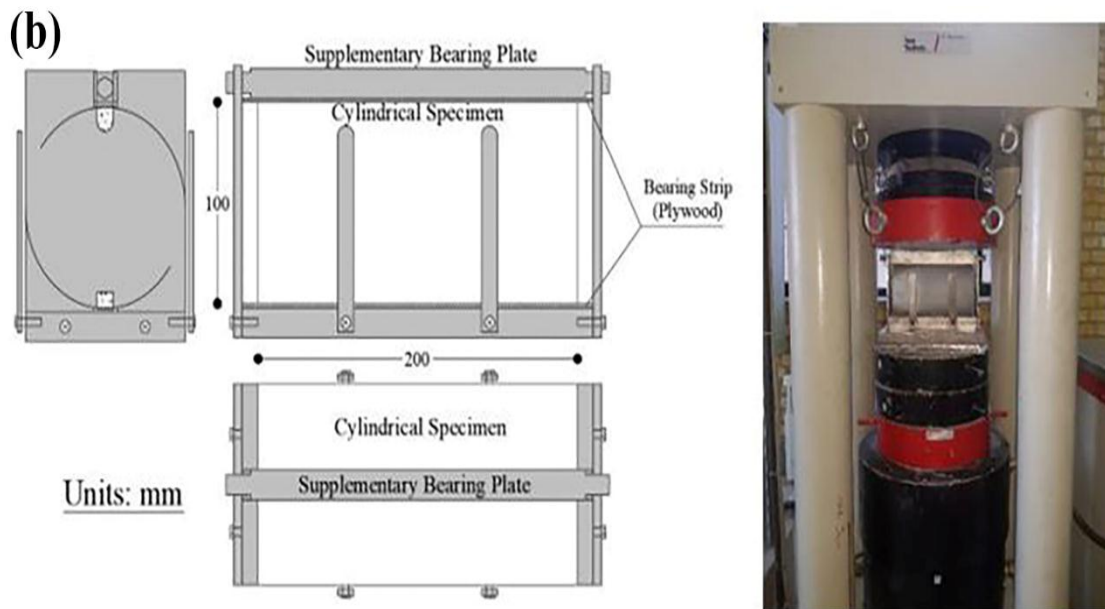
شکل ۴. تجهیزات آزمون کارایی (زمان وی بی)



شکل ۵. چیدمان آزمایش مقاومت فشاری و مدول الاستیسیته



(ب)



شکل ۶. چیدمان آزمایش مقاومت خمشی و کششی: الف) مقاومت خمشی و ب) مقاومت کششی

۵. نتایج و تفسیر آن‌ها

در این مطالعه، تقریباً تمام متغیرهای در نظر گرفته شده به صورت درجه دو بر مدل تأثیر داشتند. تنها استثنا مقدارسیمان بود، زیرا برای این فاکتور دو مقدار در نظر گرفته شده بود چرا که RSM نمی‌تواند اثرات مرتبه بالاتر را برای دو مقدار ارزیابی کند. تجزیه و تحلیل RSM نشان داد که برخی از فاکتورها به طور خطی بر پاسخ‌ها تأثیر می‌گذارند. خلاصه اطلاعات برای مدل-های پاسخ، متغیرها و نتایج ANOVA در جداول ۴ و ۵ ارائه شده است.

۴. روش سطح پاسخ

روش سطح پاسخ (RSM) ترکیبی از روش‌های ریاضی و آماری است به منظور ساخت مدل‌های تجربی که رابطه‌ی بین یک یا چند متغیر پاسخ را با چندین متغیر مستقل (مورد مطالعه) تعیین می‌کند (روح‌الامینی و همکاران، ۲۰۱۸). برای مطالعه حاضر، از نرم‌افزار Design Expert 12.0 برای تجزیه و تحلیل آماری استفاده گردید. تجزیه و تحلیل واریانس (ANOVA) برای مطالعه روابط بین پارامترهای مختلف و همچنین تأثیر هر پارامتر انجام شد. در تحلیل RSM، مقادیر مدل F بیش از ۴ و مقادیر P کمتر از ۰/۰۵ معنی‌دار هستند و همچنین مقادیر بیشتر R^2 بیانگر توانایی مدل در تفسیر بهتر داده‌های پاسخ می‌باشد (ژانگ و همکاران، ۲۰۲۰).

جدول ۴. خلاصه اطلاعات متغیرها و پاسخها

Run	Factor 1	Factor 2	Factor 3	Response 1	Response 2	Response 3	Response 4	Response 5
	A: Cement	B: W/C	C: S/A	Vebe time	Compressive strength	Modulus of elasticity	Flexural strength	Splitting tensile strength
	kg/m ³	-	-	Sec	MPa	GPa	MPa	MPa
1	300	0.35	0.4	50	27.46	33.25	4.25	3.48
2	300	0.40	0.4	32	31.16	30.98	4.59	3.64
3	300	0.45	0.4	11	26.35	29.10	4.60	3.25
4	300	0.35	0.5	60	25.96	27.73	4.22	3.03
5	300	0.40	0.5	40	32.20	28.99	4.84	3.54
6	300	0.45	0.5	14	27.57	27.93	4.62	3.10
7	300	0.35	0.6	70	23.27	25.88	4.12	2.85
8	300	0.40	0.6	45	28.40	26.22	4.26	3.38
9	300	0.45	0.6	24	25.43	28.18	4.74	3.05
10	350	0.35	0.4	31	33.75	32.36	4.97	3.50
11	350	0.40	0.4	10	31.09	29.16	4.71	3.52
12	350	0.45	0.4	5	27.05	26.45	4.40	3.34
13	350	0.35	0.5	43	32.71	28.66	4.90	3.18
14	350	0.40	0.5	13	32.86	27.48	4.66	3.46
15	350	0.45	0.5	7	29.03	28.10	4.44	3.33
16	350	0.35	0.6	50	30.31	26.64	4.74	2.99
17	350	0.40	0.6	25	30.30	27.87	4.68	3.29
18	350	0.45	0.6	9	26.55	26.29	4.59	3.05

جدول ۵. جدول ANOVA مدل

Response	Regression	Source	Sum of Squares	df	F-value	P-value
Vebe time	Quadratic	Model	6638.22	8	60.85	< 0.0001
		A-Cement	1300.50	1	95.37	< 0.0001
		B-W/C	4563.00	1	334.63	< 0.0001
		C-S/A	588.00	1	43.12	0.0001
		A*B	65.33	1	4.79	0.0564
		A*C	5.33	1	0.3911	0.5472
		B*C	60.50	1	4.44	0.0644
		B ²	53.78	1	3.94	0.0783
		C ²	1.78	1	0.1304	0.7264
Compressive strength	Quadratic	Model	138.27	8	12.92	0.0004
		A-Cement	37.12	1	27.75	0.0005
		B-W/C	10.98	1	8.21	0.0186
		C-S/A	13.23	1	9.89	0.0118
		A*B	23.52	1	17.58	0.0023
		A*C	0.8216	1	0.6142	0.4534
		B*C	4.82	1	3.60	0.0901
		B ²	37.17	1	27.78	0.0005
		C ²	10.61	1	7.93	0.0202
Modulus of elasticity	2FI	Model	64.70	6	16.87	< 0.0001
		A-Cement	1.54	1	2.41	0.1491
		B-W/C	5.96	1	9.33	0.0110
		C-S/A	34.07	1	53.30	< 0.0001
		A*B	2.23	1	3.49	0.0886
		A*C	2.88	1	4.50	0.0574
		B*C	18.02	1	28.19	0.0002
Flexural strength	2FI	Model	0.8124	6	7.44	0.0023
		A-Cement	0.1901	1	10.45	0.0080
		B-W/C	0.0030	1	0.1653	0.6921
		C-S/A	0.0127	1	0.6964	0.4218

Splitting tensile strength	Quadratic	A*B	0.5419	1	29.77	0.0002
		A*C	0.0052	1	0.2862	0.6033
		B*C	0.0595	1	3.27	0.0980
		Model	0.7771	8	9.19	0.0016
		A-Cement	0.0064	1	0.6076	0.4557
		B-W/C	0.0007	1	0.0639	0.8062
		C-S/A	0.3745	1	35.44	0.0002
		A*B	8.333E-06	1	0.0008	0.9782
		A*C	0.0003	1	0.0284	0.8699
		B*C	0.0528	1	5.00	0.0522
		B ²	0.3422	1	32.38	0.0003
		C ²	0.0001	1	0.0095	0.9246

Where A², B² and C²: second order effect, A*B, A*C, and B*C: interaction effects, df: degree of freedom, F-values: Fisher statistical test values, P- values: Probability values

تفاوت بین آن‌ها بزرگتر از ۰/۲ بود. دقت Adeq نسبت سیگنال به خطا را اندازه‌گیری می‌کند. برای این نسبت، مقدار بیش از ۴ مناسب است. نتایج نشان داد که برای همه‌ی مدل‌ها، Adeq Precision سیگنال قابل قبولی را ارائه می‌کند.

از میزان همبستگی برای تأیید تناسب، کفایت و کیفیت مدل‌های استاندارد استفاده شد. همانطور که جدول ۶ نشان می‌دهد، همه‌ی مدل‌ها دارای مقادیر R² قابل توجهی هستند (R² > 0.8). از این رو، از نظر آماری، همه‌ی مدل‌ها قابل قبول تشخیص داده شدند. همچنین، R² تنظیم شده و R² پیش‌بینی شده برای همه‌ی مدل‌ها مطابقت نسبی با یکدیگر داشتند، زیرا

جدول ۶. اعتبارسنجی مدل

Vebe time			
Std. Dev.	3.69	R ²	0.9818
Mean	29.94	Adjusted R ²	0.9657
C.V. %	12.33	Predicted R ²	0.9389
		Adeq Precision	26.8085
Compressive strength			
Std. Dev.	1.16	R ²	0.9199
Mean	28.97	Adjusted R ²	0.8487
C.V. %	3.99	Predicted R ²	0.7125
		Adeq Precision	12.3250
Modulus of elasticity			
Std. Dev.	0.7995	R ²	0.9020
Mean	28.40	Adjusted R ²	0.8485
C.V. %	2.81	Predicted R ²	0.7139
		Adeq Precision	14.7447
Flexural strength			
Std. Dev.	0.1349	R ²	0.8023
Mean	4.57	Adjusted R ²	0.6944
C.V. %	2.95	Predicted R ²	0.6234
		Adeq Precision	10.3178
Splitting tensile strength			
Std. Dev.	0.1028	R ²	0.8909
Mean	3.28	Adjusted R ²	0.7940
C.V. %	3.14	Predicted R ²	0.5987
		Adeq Precision	10.6131

ارزیابی آزمایشگاهی خصوصیات مکانیکی روسازی بتن غلتکی با استفاده از روش سطح پاسخ ارزیابی آزمایشگاهی خصوصیات مکانیکی روسازی بتن غلتکی با استفاده از روش سطح پاسخ

۵-۱. کارایی (زمان وی بی)

جدول ۷، همبستگی بین پاسخها و متغیرها را نشان می‌دهد. همبستگی بین سیمان، نسبت W/C، نسبت S/A و زمان Vebe به ترتیب ۰/۴۳۹-، ۰/۸۲۲- و ۰/۲۹۵ بود. نسبت W/C با توجه به ضریب همبستگی بیشترین تأثیر را در زمان Vebe داشت.

جدول ۷. ضریب همبستگی بین متغیرها و پاسخها

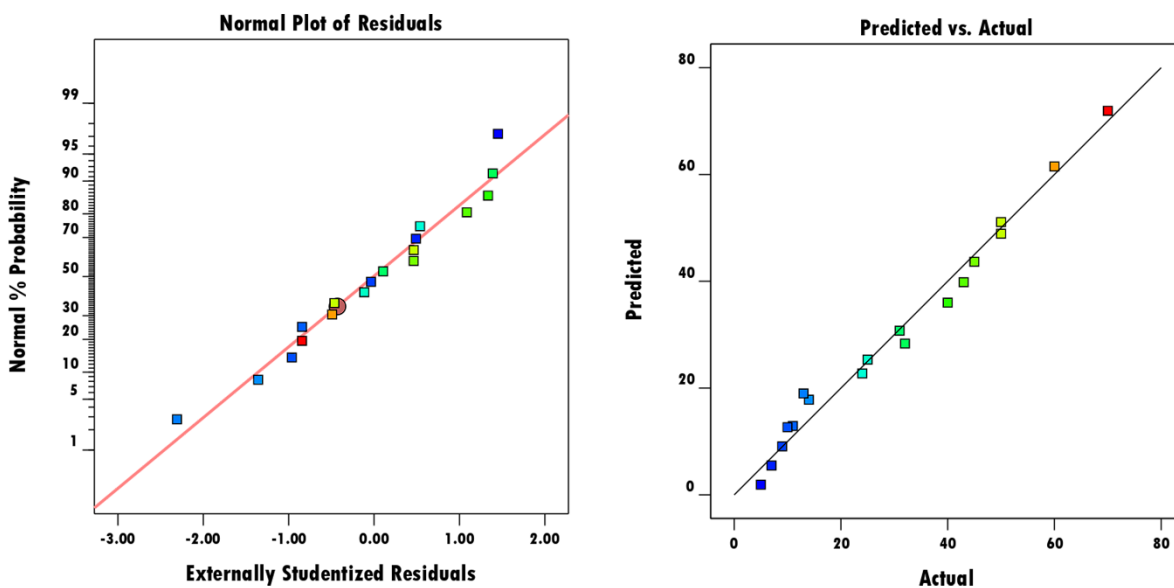
Response	Correlation		
	Cement (A)	W/C (B)	S/A (C)
Vebe time	-0.439	-0.822	0.295
Compressive strength	0.497	-0.270	-0.297
Modulus of elasticity	-0.146	-0.288	-0.689
Flexural strength	0.433	0.055	-0.112
Splitting tensile strength	0.086	0.028	-0.655

$$\text{Vebe time (s)} = T = 27.50 - 8.50A - 19.50B + 7.00C + 2.33A*B - 2.75B*C + 3.6 \quad (1)$$

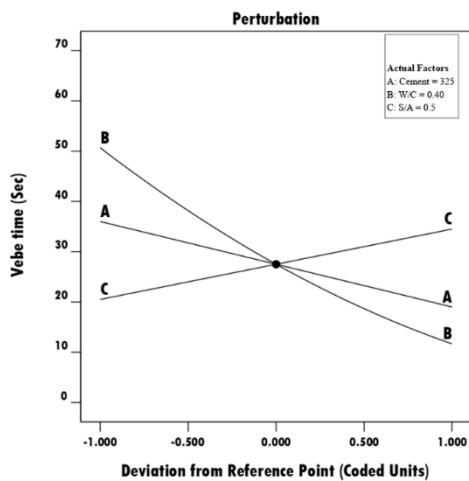
شکل ۷، نمودارهای نرمال و پیش‌بینی شده در مقابل نمودار واقعی برای زمان وی بی را نشان می‌دهد. هرچه خط عبوری از نقاط دارای شیب باشد طبیعی بودن نتایج را نشان می‌دهد. نمودارهای Perturbation نشان‌دهنده تأثیر عوامل مختلف بر زمان Vebe در شکل ۸ ارائه شده است. در حالی که خط با شیب مثبت بیانگر یک رابطه مستقیم بین متغیر و پاسخ است، یک خط با شیب منفی نشان‌دهنده یک رابطه معکوس است. با توجه به شکل ۹، برای نسبت‌های W/C مشابه، زمان Vebe برای مخلوط‌هایی با نسبت S/A بیشتر، زیادتر بود. این نتیجه را می‌توان به سطح مخصوص بیشتر سنگدانه و در نتیجه کاهش آب آزاد نسبت داد. به عنوان مثال، در مخلوطی با ۳۰۰ کیلوگرم سیمان و ۰/۳۵

مقدار سیمان و نسبت W/C به طور معکوس و نسبت S/A به طور مستقیم بر زمان Vebe تأثیر داشتند. مقادیر ضریب همبستگی تأیید کرد که وقتی مقدار سیمان و نسبت W/C افزایش یابد، زمان Vebe کاهش یافته و کارایی بتن بالا می‌رود. در جدول ۵، مقادیر p-values کمتر از ۰/۰۰۰۱ به معنی دار بودن مدل و پارامترها اشاره دارند. همانطور که جدول ۵ نشان می‌دهد، کل مدل معنی‌دار بود. همچنین، پارامترهای مقدار سیمان (A)، نسبت آب به سیمان (B) و نسبت ریزدانه به کل سنگدانه (C) با توجه به مقادیر p-value معنی‌دار بودند. همچنین، بر اساس نتایج ANOVA برهمکنش پارامترهای A و B و همچنین B و C معنی‌دار بودند. تجزیه و تحلیل RSM مطابق با نتایج ذکر شده در تحقیقات توسط شفیق و همکاران (۲۰۱۹)، رحمانی و همکاران (۲۰۲۰) و چورن و همکاران (۲۰۱۷) می‌باشد. تجزیه و تحلیل RSM معادله زیر را برای پیش‌بینی زمان Vebe پیشنهاد نمود:

برای W/C، زمان Vebe به ترتیب ۵۰، ۶۰ و ۷۰ ثانیه برای S/A برابر با ۰/۴، ۰/۵ و ۰/۶ بود.

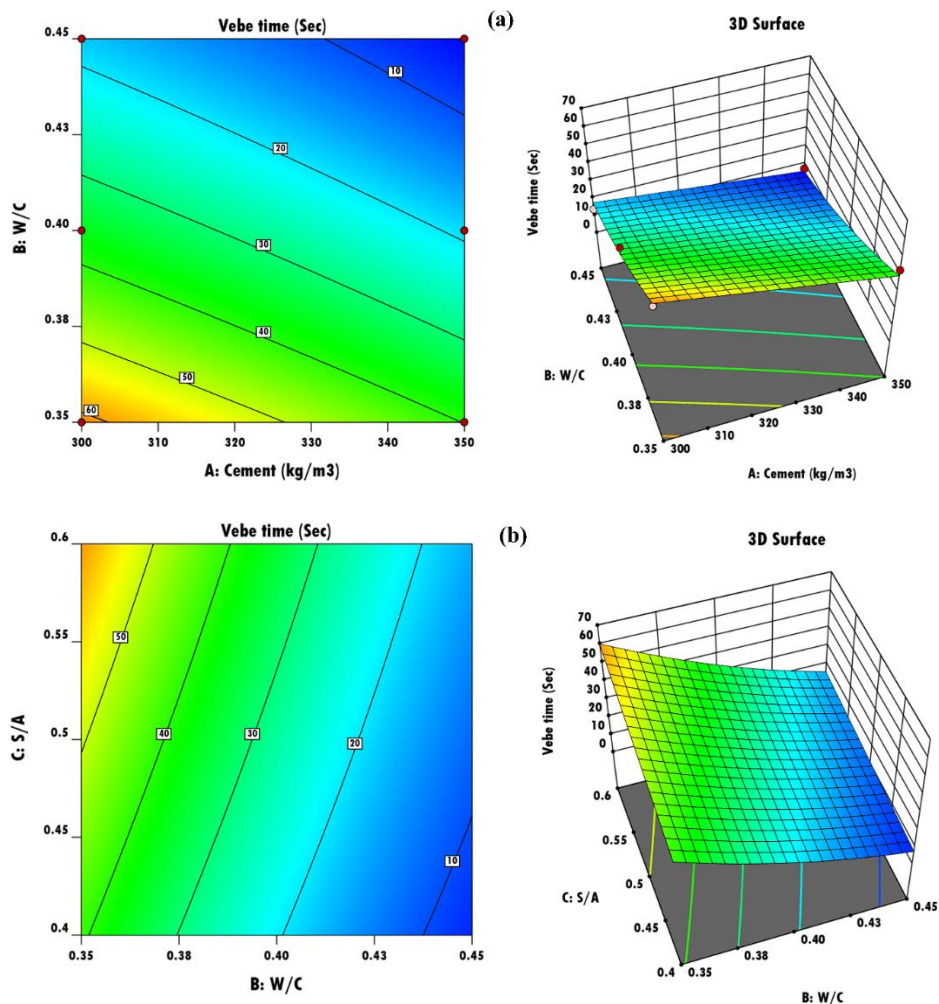


شکل ۷. نمودارهای نرمال و پیش‌بینی شده در مقابل نمودار واقعی برای زمان وی بی



شکل ۸. نمودار رابطه‌ی متغیرها با زمان وی بی

ارزیابی آزمایشگاهی خصوصیات مکانیکی روسازی بتن غلتکی با استفاده از روش سطح پاسخ ارزیابی آزمایشگاهی خصوصیات مکانیکی روسازی بتن غلتکی با استفاده از روش سطح پاسخ



شکل ۹. نمودار دوبعدی و سه‌بعدی رابطه‌ی متغیرها با زمان وی بی

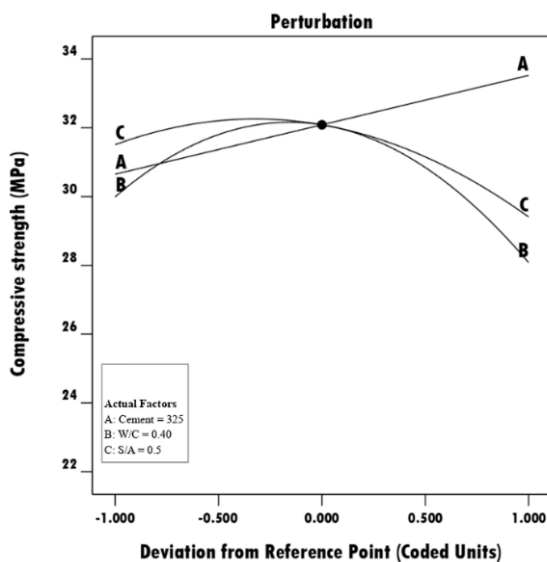
فشاری بتن غلتکی دارد. تأثیر معنی‌دار سیمان بر مقاومت فشاری از دو عامل اصلی ناشی می‌شود. اول اینکه در انواع بتن، افزایش مقدار سیمان باعث افزایش مقاومت فشاری می‌گردد و دوم اینکه در بتن غلتکی، با افزایش مقدار سیمان، قابلیت تراکم‌پذیری بتن بالاتر رفته و در نتیجه بتن متراکم‌تر شده که موجب افزایش مقاومت فشاری خواهد شد. نمودارهای Perturbation نشان‌دهنده‌ی تأثیر عوامل مختلف بر مقاومت فشاری در شکل ۱۰ ارائه شده است. در مقایسه با بتن معمولی، در RCC با افزایش نسبت W/C ، مقاومت فشاری افزایش می‌یابد. این پدیده را می‌توان به قابلیت تراکم‌پذیری

۲-۵. مقاومت فشاری

جدول ۷، همبستگی بین مقاومت فشاری و پارامترها را نشان می‌دهد. نتایج بیانگر تأثیر مستقیم مقدار سیمان و اثر معکوس نسبت W/C و نسبت S/A می‌باشد. بیشترین میزان ضریب همبستگی مربوط به محتوای سیمان بود و تنها برهمکنش پارامترهای A و B معنی‌دار بود. مقادیر F -values به تأثیر هر پارامتر بر پاسخ اشاره دارد. به طوری که هرچه مقدار آن بیشتر باشد بیانگر تأثیر زیادتر آن فاکتور بر پاسخ است. نتایج نشان داد که تغییرات مقدار سیمان بیشترین تأثیر را بر مقاومت

مقدار آب در حالت بهینه با میزان ثابت سیمان منجر به حداکثر مقاومت فشاری می‌شود. شکل ۱۰ این نتایج را تأیید می‌کند و نشان می‌دهد که مقدار بهینه نسبت W/C تقریباً $0/40$ است. نتایج RSM موجود در شکل ۱۰ نشان می‌دهد که عیار سیمان نقش عمده‌ای در تقویت مقاومت فشاری دارد.

RCC به دلیل بالاتر رفتن مقدار آب در مخلوط بتن نسبت داد. هنگامی که نسبت W/C از $0/35$ تا $0/4$ متغیر بود، مقاومت فشاری RCC نیز افزایش یافت. در حالی که وقتی نسبت W/C از $0/4$ به $0/45$ افزایش یافت، مقاومت فشاری کاهش یافت. دو مورد یاد شده در شکل ۱۰ ارائه شده است. با توجه به این نتایج،

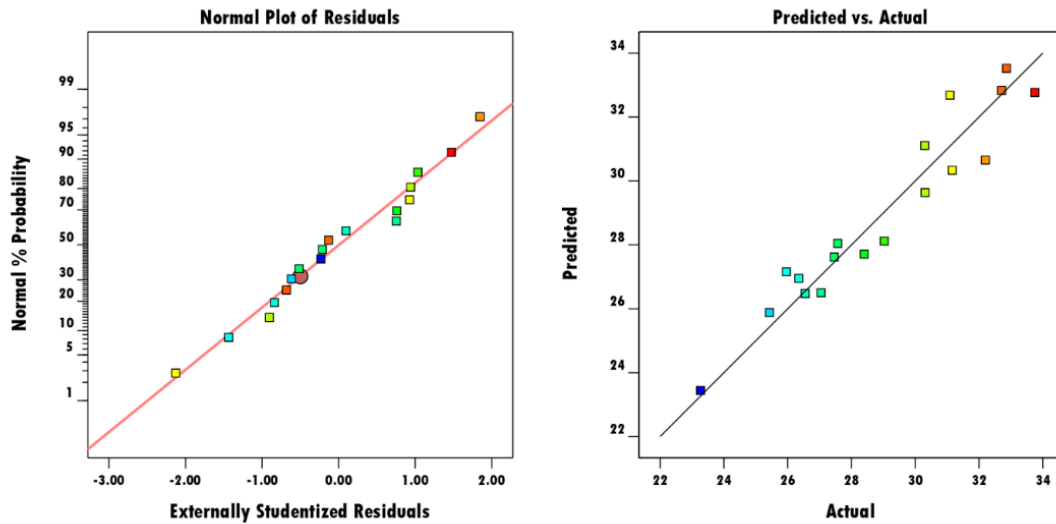


شکل ۱۰. نمودار رابطه‌ی متغیرها با مقاومت فشاری

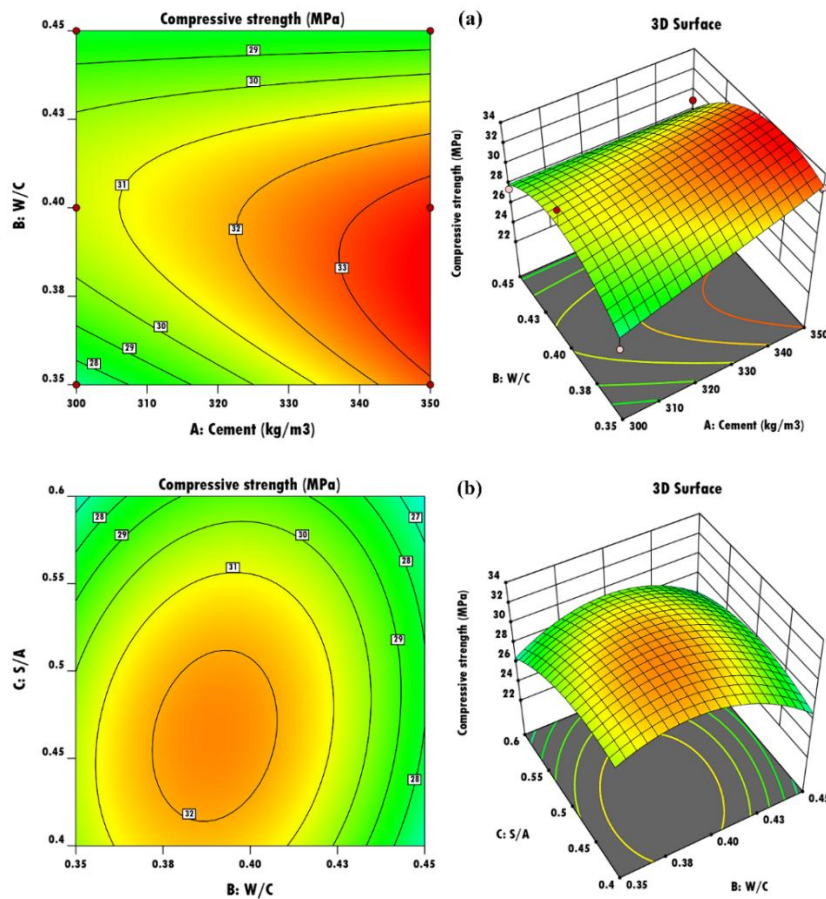
(۲۰۰۵) و شفیق و همکاران (۲۰۱۹) مطابقت داشت. شکل ۱۱ نمودارهای نرمال و واقعی در مقابل پیش‌بینی شده برای مقاومت فشاری را نشان می‌دهد. همچنین، شکل ۱۲ رابطه‌ی بین متغیرها و مقاومت فشاری را نشان می‌دهد.

نسبت S/A ، مانند نسبت W/C ، دارای یک مقدار بهینه در RCC می‌باشد، همانطور که در شکل ۱۰ نشان داده شده است. با توجه به نمودار شکل ۱۰، مشخص گردید که مقدار بهینه نسبت S/A در حدود $0/45$ است. نتایج به دست آمده با نتایج تحقیق قسراوی و همکاران

ارزیابی آزمایشگاهی خصوصیات مکانیکی روسازی بتن غلتکی با استفاده از روش سطح پاسخ ارزیابی آزمایشگاهی خصوصیات مکانیکی روسازی بتن غلتکی با استفاده از روش سطح پاسخ



شکل ۱۱. نمودار رابطی متغیرها با مقاومت فشاری



شکل ۱۲. نمودار دوبعدی و سه‌بعدی رابطی متغیرها با مقاومت فشاری

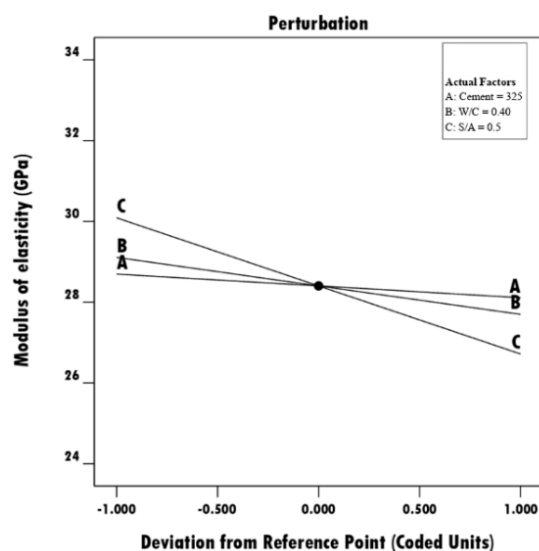
$$f_c \text{ (MPa)} = 32.09 + 1.44A - 0.956B - 1.05C - 1.40A*B + 0.7763B*C - 3.05 B^2 - 1.63 C^2 \quad (2)$$

بر اساس مدل RSM می‌توان مقاومت فشاری RCC را با استفاده از معادله زیر پیش‌بینی کرد:

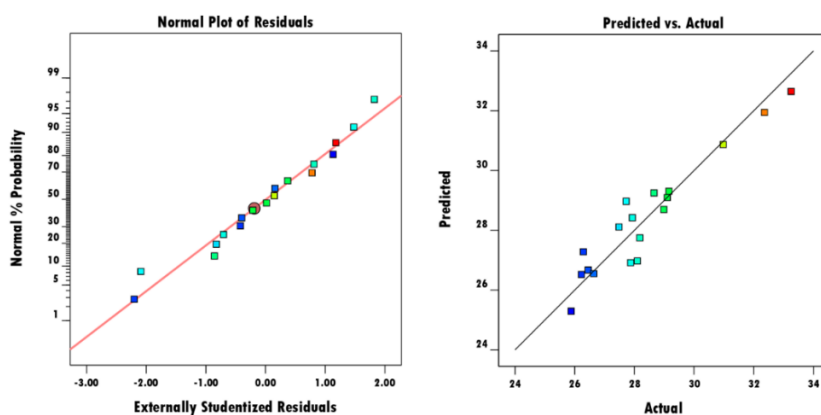
۳-۵. مدول الاستیسیته

S/A در مقایسه با برهم‌کنش سیمان با نسبت W/C و برهم‌کنش سیمان با نسبت S/A بیشترین تأثیر را در مدول الاستیسیته RCC داشت. نتایج نشان داد که مقادیر مدول الاستیسیته به میزان سنگدانه درشت در RCC مربوط است. به عنوان مثال، چنانچه درشت دانه مخلوط ۱۰ درصد کاهش یابد، مدول الاستیسیته حدود ۱۰ درصد کاهش می‌یابد. نتایج تحقیق رحمانی و همکاران (۲۰۲۰) با نتایج به‌دست آمده در این تحقیق مطابقت داشت. شکل ۱۳ اعتبار این نتایج را نشان می‌دهد. شکل ۱۵ رابطه‌ی بین متغیرها و مدول الاستیسیته را با نمودارهای دو و سه‌بعدی نشان می‌دهد.

جدول ۷، ضریب همبستگی بین متغیرها و مدول الاستیسیته RCC را نشان می‌دهد. شکل ۱۴ نمودارهای نرمال و پیش‌بینی شده در مقابل نمودار واقعی برای مدول الاستیسیته را نشان می‌دهد. همانطور که نشان داده شد، نسبت S/A با ضریب همبستگی -0.689 حداکثر تأثیر را در مدول الاستیسیته داشت. همچنین با توجه به نتایج ارائه شده در جدول ۷، تأثیر مقدار سیمان در مدول الاستیسیته معنی‌دار نبود. در مقابل، نسبت S/A و W/C فاکتورهای معنی‌داری بودند. مدول الاستیسیته تحت تأثیر نسبت W/C و نسبت S/A به صورت خطی قرارگرفت. همچنین، اثر متقابل نسبت W/C با نسبت

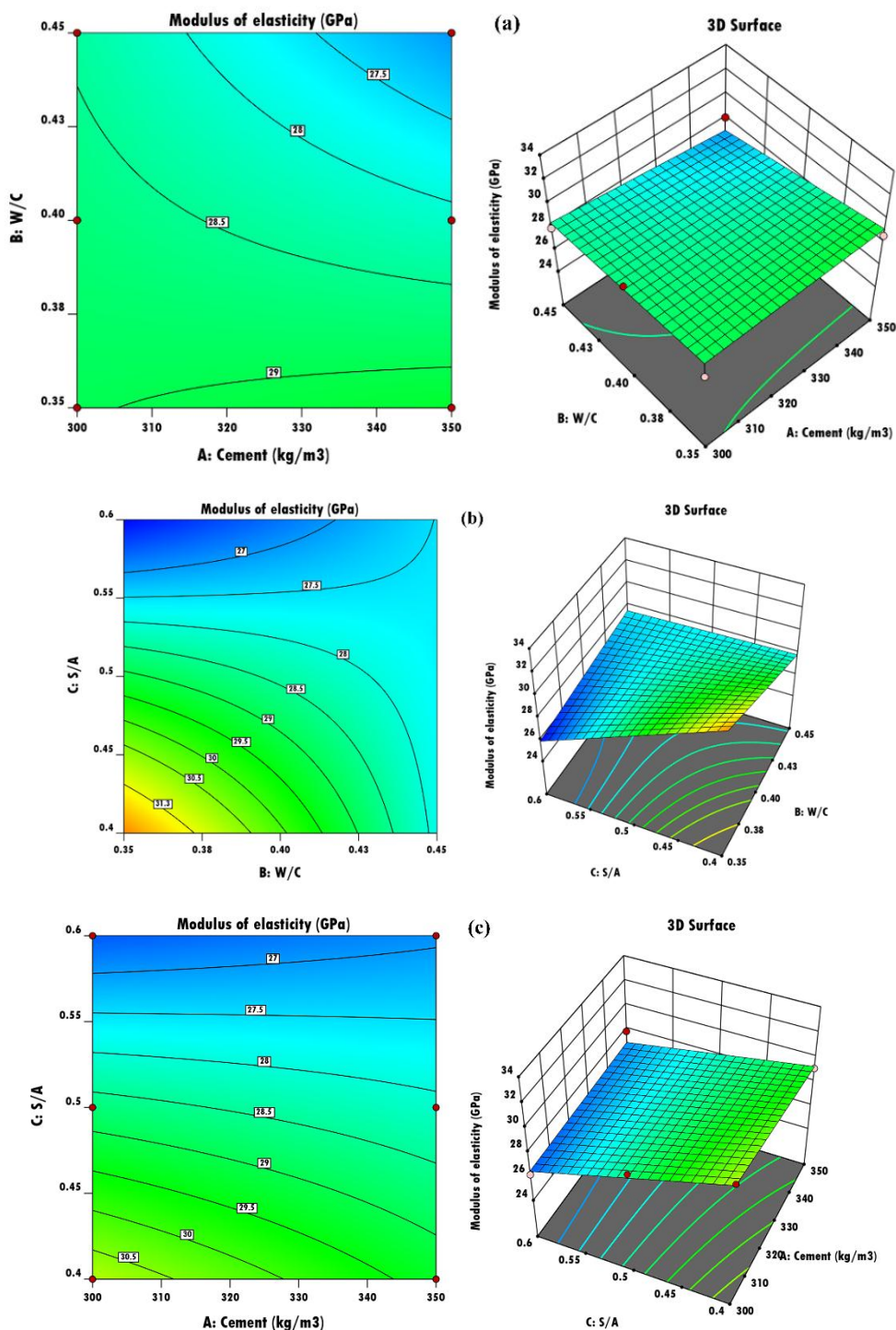


شکل ۱۳. نمودار رابطه‌ی متغیرها با مدول الاستیسیته



ارزیابی آزمایشگاهی خصوصیات مکانیکی روسازی بتن غلتکی با استفاده از روش سطح پاسخ ارزیابی آزمایشگاهی خصوصیات مکانیکی روسازی بتن غلتکی با استفاده از روش سطح پاسخ

شکل ۱۴. نمودارهای نرمال و پیش‌بینی شده در مقابل نمودار واقعی مدول الاستیسیته



شکل ۱۵. نمودار دوبعدی و سه‌بعدی رابطه‌ی متغیرها با مدول الاستیسیته

$$E_c \text{ (GPa)} = 28.40 - 0.2923A - 0.7049B - 1.69C + 0.4897A * C + 1.50B * C \quad (3)$$

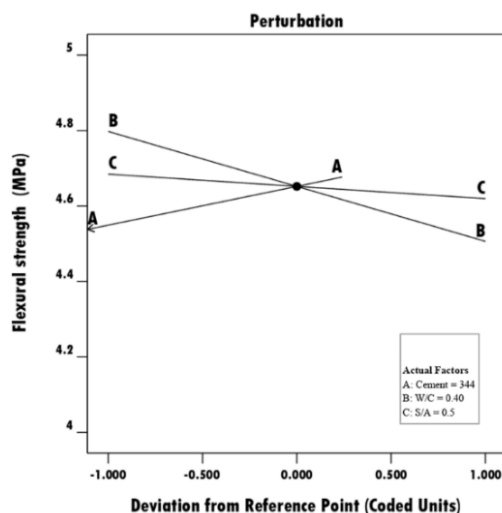
بر اساس مدل RSM مدول الاستیسیته RCC با استفاده از معادله زیر پیش‌بینی می‌شود:

۵-۴. مقاومت خمشی

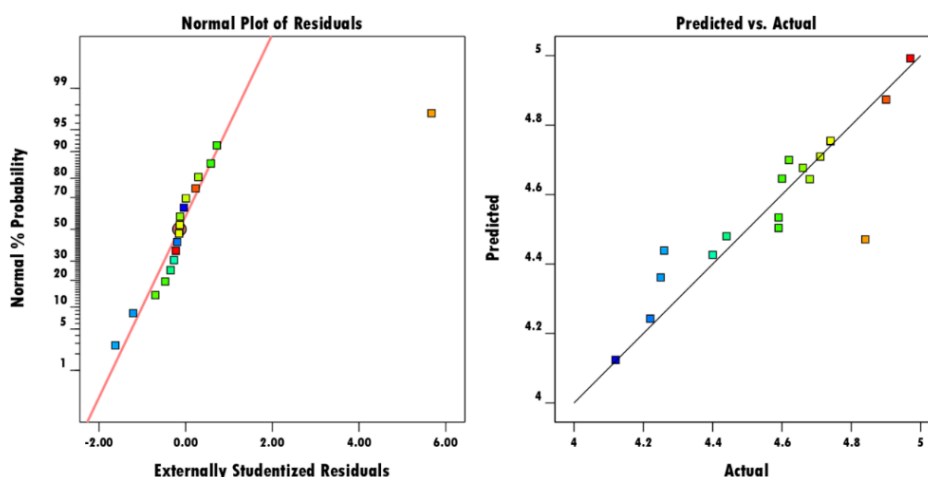
مختلف و مقاومت خمشی و نمودارهای نرمال و واقعی در مقابل پیش‌بینی شده برای مقاومت خمشی نشان داده شده است. شکل ۱۸ نمودار سطح پاسخ سه‌بعدی را نشان می‌دهد که رابطه‌ی متغیرها و مقاومت خمشی را بیان می‌کند. مدل RSM با استفاده از معادله زیر مقاومت خمشی RCC را پیش‌بینی نمود:

$$F_r \text{ (MPa)} = 4.57 + 0.1028A + 0.0158B - 0.0325C - 0.2125A*B + 0.0863 B*C \quad (۴)$$

طبق نتایج RSM، مدل کلی مقاومت خمشی خطی بود. تأثیر سیمان و اثر متقابل آن با نسبت W/C معنی‌دار بود، در حالی که سایر پارامترها و برهمکنش‌ها اثر معنی‌داری بر مقاومت خمشی نداشتند. ضریب همبستگی ارائه شده در جدول ۷ نشان می‌دهد که مقاومت خمشی RCC تحت تأثیر مقدار سیمان و مقاومت نظیر اولین ترک‌خوردگی خمیر سیمان در RCC است. هاشمی و همکاران (۲۰۱۸) به نتایج مشابه در این تحقیق اشاره کردند. در شکل‌های ۱۶ و ۱۷ رابطه‌ی بین متغیرهای

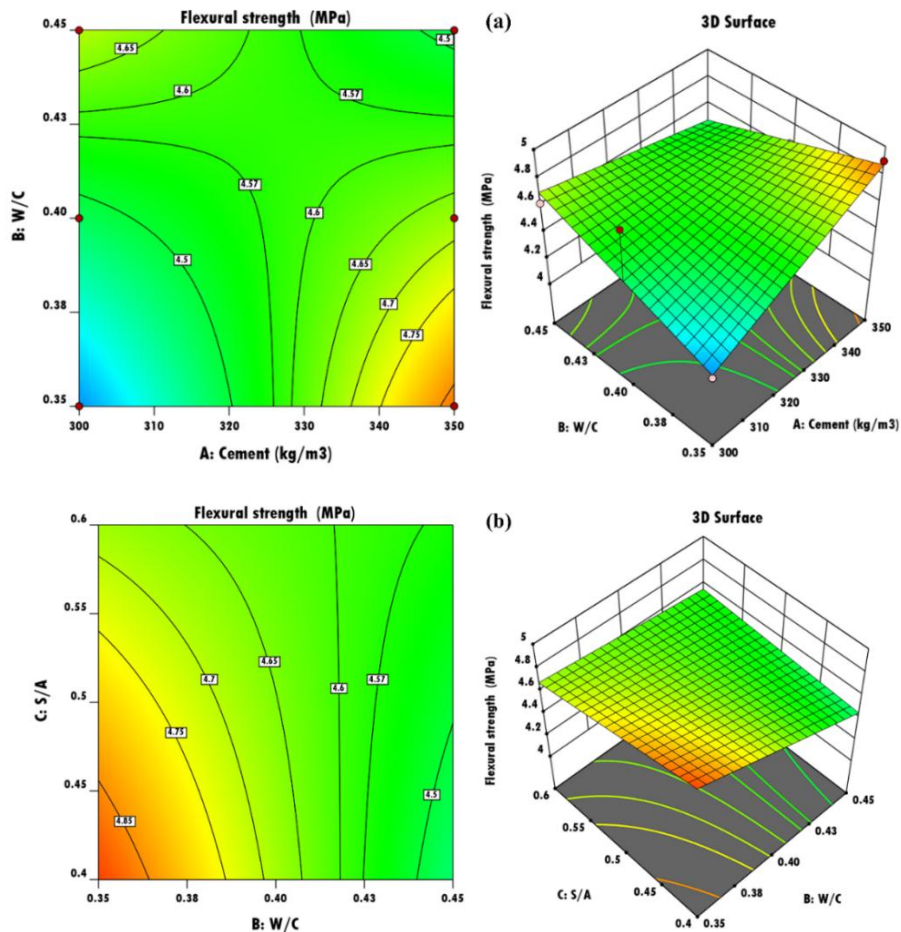


شکل ۱۶. نمودار رابطه‌ی متغیرها با مقاومت خمشی



شکل ۱۷. نمودارهای نرمال و پیش‌بینی شده در مقابل نمودار واقعی مقاومت خمشی

ارزیابی آزمایشگاهی خصوصیات مکانیکی روسازی بتن غلتکی با استفاده از روش سطح پاسخ ارزیابی آزمایشگاهی خصوصیات مکانیکی روسازی بتن غلتکی با استفاده از روش سطح پاسخ



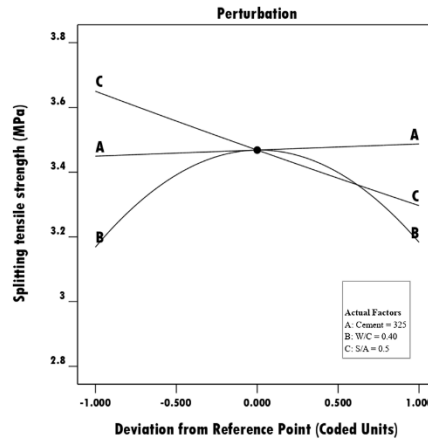
شکل ۱۸. نمودار دوبعدی و سه‌بعدی رابطه‌ی متغیرها با مقاومت خمشی

نتایج این تحقیق یکسان بود. شکل ۱۹ رابطه‌ی بین متغیرهای مختلف و مقاومت کششی را نشان می‌دهد. شکل ۲۰ نمودارهای واقعی و پیش‌بینی شده برای مقاومت کششی را نشان می‌دهد. در شکل ۲۱، نمودار سطح پاسخ سه‌بعدی، رابطه‌ی بین مقاومت کششی و متغیرهای مختلف را نشان می‌دهد. با معادله زیر مطابق مدل RSM می‌توان مقاومت کششی RCC را پیش‌بینی نمود:

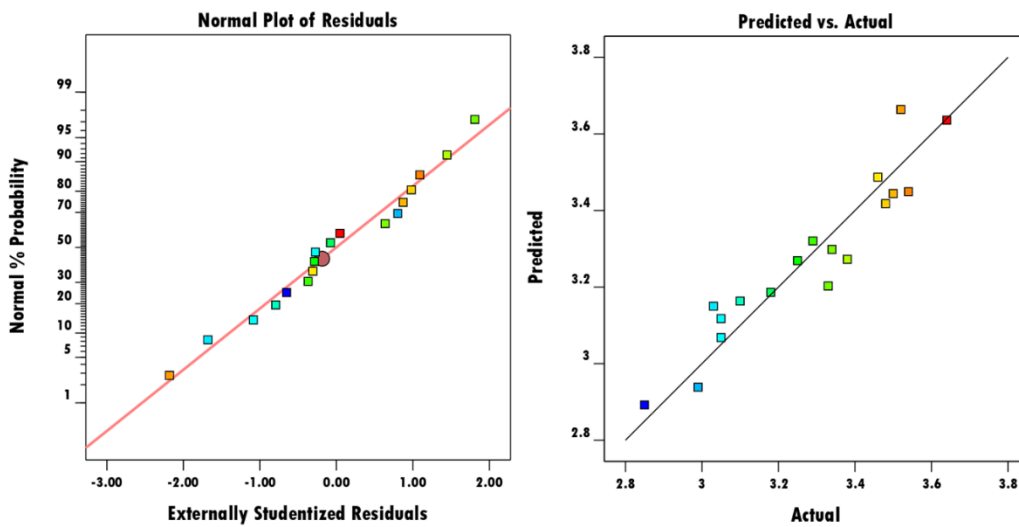
$$F_t \text{ (MPa)} = 3.47 + 0.0075B - 0.1767C + 0.0813B * C - 0.2924B^2 \quad (5)$$

۵-۵. مقاومت کششی دو نیم شدن

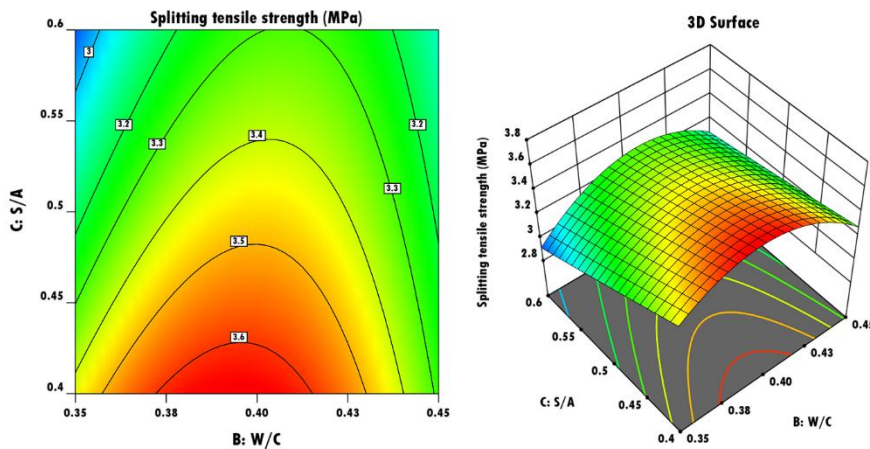
ضریب همبستگی ارائه شده در جدول ۷ اثر بیشتر نسبت S/A بر مقاومت کششی را نشان می‌دهد. در آزمون مقاومت خمشی، محتوای سیمان بیشترین تأثیر را بر مقاومت کششی داشت در حالی که در آزمون کشش دو نیم شدن، این نسبت S/A بود که بیشترین تأثیر را نشان داد. این نتیجه می‌تواند مربوط به قفل و بست سنگدانه‌ها و اثرات توزیع تنش در آزمون کشش باشد. تأثیر نسبت S/A و برهم‌کنش آن با نسبت W/C مطابق مدل ANOVA بر مقاومت کششی معنی‌دار بودند. یافته‌های به‌دست آمده در مطالعه‌ی علی‌احمد و همکاران (۲۰۱۷) و رحمانی و همکاران (۲۰۲۰) با



شکل ۱۹. نمودار رابطی متغیرها با مقاومت کششی



شکل ۲۰. نمودارهای نرمال و پیش‌بینی شده در مقابل نمودار واقعی مقاومت کششی



شکل ۲۱. نمودار دوبعدی و سه‌بعدی رابطی متغیرها با مقاومت کششی

۶. نتیجه‌گیری

- این تحقیق یک مطالعه پارامتری آزمایشگاهی از بتن غلتکی با استفاده از تجزیه و تحلیل RSM را ارائه می‌دهد. اثرات مقدار سیمان، نسبت S/A و نسبت W/C در زمان Vebe، مدول الاستیسیته و مقاومت‌های فشاری، خمشی و کششی بتن غلتکی بررسی شده است. با بررسی نمودارها و نتایج به دست آمده از تجزیه و تحلیل RSM، نتایج زیر به دست آمد:
- ✓ یکی از کارآمدترین روش‌ها برای کاهش زمان Vebe و افزایش کارایی RCC، افزایش نسبت W/C در مقایسه با سایر پارامترها بود.
 - ✓ مقدار سیمان و نسبت W/C به صورت معکوس و نسبت S/A به طور مستقیم بر زمان Vebe تأثیر گذاشتند.
 - ✓ برای نسبت‌های W/C مشابه، زمان Vebe برای مخلوط‌هایی با نسبت S/A بیشتر، زیادتر بود.
- ✓ مقدار سیمان بیشترین تأثیر را بر مقاومت فشاری داشت، در حالی که نسبت S/A و W/C تقریباً تأثیر مشابه داشتند. همچنین، با افزایش نسبت W/C مقاومت فشاری به دلیل قابلیت تراکم‌پذیری بالاتر افزایش یافت.
- ✓ مقدار بهینه آب با میزان محتوای سیمان ثابت منجر به حداکثر مقاومت فشاری گردید.
- ✓ نسبت S/A بیشترین تأثیر را در مدول الاستیسیته داشت. نتایج نشان داد که مدول الاستیسیته تابعی از محتوای کل درشت‌دانه در RCC است.
- ✓ مقاومت خمشی RCC تحت تأثیر مقدار سیمان و مقاومت نظیر اولین ترک‌خوردگی خمیر سیمان بود.
- ✓ در آزمون مقاومت خمشی، مقدار سیمان بیشترین تأثیر را بر مقاومت کششی داشت. در حالی که در آزمون کشش دو نیم شدن، این نسبت S/A بود که بیشترین تأثیر را نشان داد.

۷. مراجع

- عاملی، ع.، پرورش کاران، ا. و هاشمی، س. ا. ح. ۱۳۹۷. "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". پژوهشنامه حمل و نقل، ۱۵(۳): ۳۸۱-۳۹۵.
- غنی زاده، ع.، کریمی گوغری، م. و توانا املشی، ا. ۱۳۹۷. "مدل‌سازی مقاومت فشاری بتن غلتکی روسازی حاوی خرده آسفالت بازیافتی با استفاده از روش سطح پاسخ (RSM)". تحقیقات بتن، ۱۱(۲): ۶۷-۷۹.
- ACI 207.5R-11. 2011. "Report on roller compacted mass concrete". ACI Manual of Concrete Practice, USA, 71.
- ACI 325.10R-95, 2001. "Report on roller-compacted concrete pavements". American Concrete Institute.
- Adamu, M., Mohammed, B. S., Shafiq, N. and Liew, M. S. 2018. "Durability performance of high volume fly ash roller compacted concrete pavement containing crumb rubber and nano silica". Int. J. Pavement Eng. DOI: <https://doi.org/10.1080/10298436.2018.1547825>.
- Aghaeipour, A. and Madhkan, M. 2017. "Effect of ground granulated blast furnace slag (GGBFS) on RCCP durability". Constr. Build. Mater., 141: 533-541. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.03.019>.
- Aghaeipour, A. and Madhkan, M. 2019. "Mechanical properties and durability of roller compacted concrete pavement (RCCP)—a review". Road Mater. Pavement Design: 1-24. DOI: <https://doi.org/10.1080/14680629.2019.1579754>.
- Algin, Z. and Gerginci, S. 2020. "Freeze-thaw resistance and water permeability properties of roller compacted concrete produced with macro synthetic fibre". Constr. Build. Mater., 234: 117382. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117382>.

- AliAhmad, M., Miri, M. and Rashki, M. 2017. "Probabilistic and experimental investigating the effect of pozzolan and Lumachelle fine aggregates on roller compacted concrete properties". *Constr. Build. Mater.*, 151: 755-766. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.06.107>.
- Association, P. C. 2004. "Guide specification for construction of roller-compacted concrete pavements". Portland Cement Association (PCA), Skokie, IL, USA.
- ASTM, C1170. 1998. "Standard test method for determining consistency and density of roller compacted concrete using a vibrating table". West Conshohocken, ASTM International.
- ASTM, C33. 2003. "Standard specification for concrete aggregates". American Society for Testing and Materials, Philadelphia, PA.
- ASTM, C1176. 2008. "Standard practice for making roller compacted concrete in cylinder molds using a vibrating table". American Society of Testing and Materials, Philadelphia, PA.
- ASTM, C496. 2008. "Standard test method for splitting tensile strength of cylindrical concrete specimens". *Annual Book of ASTM Standards 2008: section 4*.
- ASTM, C39. 2010. "Standard test method for compressive strength of cylindrical concrete specimens". *Annual Book of ASTM Standards*.
- ASTM, C78. 2010. "Standard test method for flexural strength of concrete (using simple beam with third-point loading)". American Society of Testing and Materials.
- ASTM, C469. 2014. "Standard test method for static modulus of elasticity and Poisson's ratio of concrete in compression". *Annual Book of ASTM Standards*.
- Chhorn, C., Kim, Y. K., Hong, S. J. and Lee, S. W. 2019. "Evaluation on compactibility and workability of roller-compacted concrete for pavement". *Int. J. Pavement Eng.* 20(8): 905-910. DOI: <https://doi.org/10.1080/10298436.2017.1366762>
- Chhorn, C. and Lee, S. W. 2017. "Consistency control of roller-compacted concrete for pavement". *KSCE J. Civ. Eng.*, 21(5): 1757-1763. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12205-016-0820-y>
- Dasmeh, A., Fakher, A., Shekarchi, M. and Gharavy, M. 2000. "The influence of compaction time on the mechanical properties of RCC". *Int. J. Hydropower Dams*, 7(3): 60-63.
- Engineer, U. S. A. C. O. 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, D.C.
- Fakhri, M. and Amoosoltani, E. 2017. "The effect of reclaimed asphalt pavement and crumb rubber on mechanical properties of roller compacted concrete pavement". *Constr. Build. Mater.*, 137: 470-484. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.01.136>
- Harrington, D., Abdo, F., Adaska, W., Hazaree, C. V., Ceylan, H. and Bektas, F. 2010. "Guide for roller-compacted concrete pavements". Manual, 114 p.
- Hashemi, M., Shafiqh, P., Karim, M. and Rehan Bin Atis, C. D. 2018. "The effect of coarse to fine aggregate ratio on the fresh and hardened properties of roller-compacted concrete pavement". *Constr. Build. Mater.*, 169: 553-566. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.02.216>
- Hazaree, C., Ceylan, H. and Wang, K. 2011. "Influences of mixture composition on properties and freeze-thaw resistance of RCC". *Constr. Build. Mater.*, 25(1): 313-319. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.06.023>.
- Institute-ACI, A. C. 2009. "Guide for selecting proportions for no-slump concrete (ACI 211.3 R-02)". ACI Committee 211, Detroit, USA.
- Nili, M. and Zaheri, M. 2011. "Deicer salt-scaling resistance of non-air-entrained roller-compacted concrete pavements". *Constr. Build. Mater.*, 25(4): 1671-1676. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.10.004>
- Noroozi, R., Shafabakhsh, G., Kheyroddin, A. and Moghaddam, A. M. 2019. "Investigating the effects of recycled PET particles, shredded recycled steel fibers and metakaolin powder on the properties of RCCP". *Constr. Build. Mater.*, 224: 173-187. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.07.012>
- Osipov, A., Sharkunov, S., Semenenok, S. and Magiton, A. 1992. "Roller compacted concrete with high values of strength, frost resistance, and impermeability". *Hydrotech. Constr.*, 26(7): 400-404. DOI: <https://doi.org/10.1007/BF01545014>.
- Qasrawi, H. Y., Asi, I. M. and Wahhab, H. A. A. 2005. "Proportioning RCCP mixes under hot weather conditions for a specified tensile strength". *Cement Concrete Res.*, 35(2): 267-276. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2004.04.030>.
- Rahmani, E., Sharbatdar, M. K. and Beygi, M. 2020. "A comprehensive investigation into the effect of water to cement ratios and cement contents on the physical and mechanical properties of Roller Compacted

- Concrete Pavement (RCCP)". *Constr. Build. Mater.*, 253: 119177. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119177>.
- Rooholamini, H., Hassani, A. and Aliha, M. 2018. "Evaluating the effect of macro-synthetic fibre on the mechanical properties of roller-compacted concrete pavement using response surface methodology". *Constr. Build. Mater.*, 159: 517-529. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.11.002>
- Şengün, E., Alam, B., Shabani, R. and Yaman, I. 2019. "The effects of compaction methods and mix parameters on the properties of roller compacted concrete mixtures". *Constr. Build. Mater.*, 228: 116807. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.116807>
- Shafiq, P., Hashemi, M., Nam, B. H. and Koting, S. 2019. "Optimum moisture content in roller-compacted concrete pavement". *Int. J. Pavement Eng.* DOI: <https://doi.org/10.1080/10298436.2019.1567919>
- Shafiq, N., Zahid, M. and Jalal, A. 2018. "Investigating the effects of solar cure curing method on the compressive strength, microstructure and polymeric reaction of fly ash based geopolymer". *Constr. Build. Mater.*, 181: 227-237.
- Siamardi, K. and Shabani, S. 2021. "Evaluation the effect of micro-synthetic fiber on mechanical and freeze-thaw behavior of non-air-entrained roller compacted concrete pavement using response surface methodology". *Constr. Build. Mater.*, 295: 123628.
- Sukontasukkul, P., Chaisakulkiet, U., Jamsawang, P., Horpibulsuk, S., Jaturapitakkul, C. and Chindaprasirt, P. 2019. "Case investigation on application of steel fibers in roller compacted concrete pavement in Thailand". *Case Stud. Constr. Mater.*, 11: e00271. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2019.e00271>
- Zahid, M., Shafiq, N., Isa, M. H. and Gil, L. 2018. "Statistical modeling and mix design optimization of fly ash based engineered geopolymer composite using response surface methodology". *J. Clean. Prod.*, 194: 483-498. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.05.158>
- Zhang, Q., Feng, X., Chen, X. and Lu, K. 2020. "Mix design for recycled aggregate pervious concrete based on response surface methodology". *Constr. Build. Mater.*, 259: 119776. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119776>.