



بررسی مشخصات مکانیکی بتن‌های سازگار با محیط زیست و مسلح شده با الیاف فولادی با تأکید بر انتخاب طرح اختلاط‌های بهینه اقتصادی و مقاومتی

امیرحسین صحرایی مقدم، فریدون امیدی نسب*، سعیده معظمی گودرزی

دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه لرستان، خرم‌آباد، ایران

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳۹۸/۱۱/۲۴
بازنگری: ۱۳۹۹/۰۴/۳۰
پذیرش: ۱۳۹۹/۰۵/۰۱
ارائه آنلاین: ۱۳۹۹/۰۵/۳۱

کلمات کلیدی:

خصوصیات مکانیکی
بتن‌های باز یافتی
GGBFS
الیاف فولادی
بهینه‌یابی

خلاصه: هدف اصلی محققین در این تحقیق بررسی امکان ساخت بتن‌های سازگار با محیط زیست است. برای تحقق این هدف، نخاله‌های بتنی باز یافت و مجدداً در ساخت بتن استفاده شدند. از طرفی با توجه به ایجاد حجم بالایی از آلودگی‌های زیست‌محیطی در فرآیند تولید سیمان، این ماده با سرباره GGBFS جایگزین شد. بنابراین، در این تحقیق طرح اختلاط‌هایی با جایگزینی ۰٪، ۵۰٪ و ۱۰۰٪ سنگدانه‌های طبیعی (NA) با سنگدانه‌های حاصل از باز یافت نخاله‌های بتنی (RCA) و ۰٪، ۱۵٪ و ۳۰٪ درصد سیمان پرتلند معمولی (OPC) با سرباره GGBFS مورد بررسی قرار گرفت. علاوه بر این، طرح اختلاط‌ها با ۰٪، ۵٪ و ۱۰٪ الیاف فولادی دو سر قلاب مسلح شدند. در مجموع بر روی ۲۷ طرح اختلاط آزمایشات متنوعی همچون اسلامپ، سرعت موج اولتراسونیک، جذب آب، مقاومت فشاری، کششی و خمشی انجام شد. نتایج نشان داد که استفاده از RCA و GGBFS بر روی کارایی و مقاومت فشاری بتن تأثیر منفی دارد. در نهایت با انجام آنالیز اقتصادی و انجام بهینه‌یابی در بین طرح اختلاط‌ها نتیجه گرفته شد که استفاده از RCA به عنوان جایگزین NA تا ۵۰٪ و استفاده از GGBFS به عنوان جایگزین OPC تا ۳۰٪ از لحاظ مقاومتی و اقتصادی توجیه‌پذیر است. علاوه بر این، نتایج نشان داد که ضعف حاصل از استفاده از RCA و GGBFS با افزودن الیاف فولادی قابل جبران است.

۱- مقدمه

تولید سنگدانه‌ها هستیم. همچنین به دنبال تخریب ساختمان‌های قدیمی، مقدار بسیار زیادی نخاله بتنی تولید می‌شود [۲]. با توجه به تجدیدنابپذیر بودن بتن، دفع نخاله‌های آن از طریق دفن یا انباشته کردن انجام می‌گیرد. هر دو روش مذکور علاوه بر هزینه‌های حمل و نقل، باعث تغییرات زیست‌محیطی و اکوسیستم می‌گردد [۳]. این در صورتی است که استفاده از نخاله‌های بتنی در ساخت بتن‌های جدید، علاوه بر کاهش نخاله‌های بتنی، به حفظ منابع طبیعی نیز کمک کند [۴]. محصول جانبی فرآیند تولید فولاد (GGBFS²)، ده‌ها سال است که در پروژه‌های عمرانی مورد استفاده قرار می‌گیرد. GGBFS، از سرد کردن سریع سرباره آهن در آب بدست می‌آید [۵]. مطالعات زیادی بر روی تأثیر GGBFS در رفتار بتن انجام

با توجه به استفاده روز افزون از بتن، در آینده قطعاً با کمبود منابع معدنی جهت تهیه سنگدانه‌های طبیعی (NA¹) برای تولید بتن مواجه خواهیم شد، بنابراین یافتن جایگزینی مناسب برای سنگدانه‌های طبیعی (NA) ضروری به نظر می‌رسد [۱]. طبق گزارشات منتشر توسط Meyer [۱]، سالانه بیش از ۱۰ میلیارد تن بتن در جهان تولید و مصرف می‌شود که برای تولید این مقدار بتن در سال حدوداً به ترتیب ۰/۹، ۵ و ۰/۶ میلیارد تن سیمان، سنگدانه و آب مورد نیاز است. از طرفی، با توجه به روند افزایشی استفاده از بتن در ساخت و ساز، شاهد کمبود معادن طبیعی جهت

1 Natural aggregate

* نویسنده عهده‌دار مکاتبات:omidinasab.f@lu.ac.ir

2 Ground granulated blast furnace slag



منظور، در این تحقیق خصوصیات مکانیکی بتن‌های ساخته شده از ۲۷ طرح اختلاط مختلف شامل ۰٪، ۵۰٪ و ۱۰۰٪ RCA، ۰٪، ۱۵٪ و ۳۰٪ GGBFS و ۰٪، ۵٪ و ۱٪ الیاف فولادی بررسی شد. بر روی نمونه‌های ساخته شده آزمایشات متنوعی از قبیل اسلامپ، اولتراسونیک، جذب آب، مقاومت فشاری، کششی و خمشی انجام شد. نتایج این تحقیق می‌تواند در راستای توسعه‌ی هر چه بیشتر بتن‌های سازگار با محیط زیست مؤثر واقع شود.

۲- ضرورت انجام تحقیق

با توجه به محدودیت عمر سازه‌های بتنی و همچنین تخریب آن‌ها در اثر عوامل طبیعی نظیر زلزله، سیل، طوفان و غیره، وجود نخاله‌های بتنی مشکلات زیادی را برای محیط زیست به وجود آورده است. بازیافت و استفاده مجدد از این نخاله‌ها به عنوان جایگزین سنگدانه‌های طبیعی در ساخت بتن، علاوه بر حل مشکلات زیست‌محیطی موجب صرفه‌جویی اقتصادی در انجام پروژه‌های عمرانی نیز می‌گردد [۱۴]. به همین دلیل در این تحقیق نخاله‌های بتنی جمع‌آوری و برای استفاده مجدد در ساخت بتن، بازیافت شدند. از طرفی تولید سیمان با ایجاد آلودگی‌های زیست‌محیطی همراه است. حدود ۷٪ دی‌اکسید کربن (CO_2) تولیدی سالیانه مربوط به فرآیند تولید سیمان می‌باشد که کاهش آن یک مسأله جهانی است [۱۵]. در حال حاضر محققان با استفاده از سرباره‌ها به عنوان جایگزین OPC به دنبال رفع این معضل می‌باشند [۱۶ و ۱۷]. در این تحقیق، برای رفع مشکل مذکور بخشی از OPC مورد استفاده با سرباره کوره آهن‌گدازی (GGBFS) جایگزین شد. علاوه بر این، از نقاط ضعف بتن، شکنندگی و عملکرد ترد آن‌ها تحت بارهای خمشی و ضربه‌ای می‌باشد [۱۸]. استفاده از الیاف‌های طبیعی و مصنوعی در افزایش مقاومت خمشی و ضربه‌ای بتن مؤثر می‌باشد [۱۹]. بر همین اساس، در این تحقیق علاوه بر استفاده از RCA به عنوان جایگزین NA و GGBFS به عنوان جایگزین OPC از الیاف فولادی دو سر قلاب در مسلح کردن بتن استفاده شد. از مهم‌ترین نوآوری‌های این تحقیق نسبت به موارد مشابه پیشین می‌تواند به بررسی همزمان حذف سنگدانه‌های طبیعی و سیمان و همچنین استفاده از الیاف فولادی در ساخت بتن اشاره نمود. علاوه بر این در این تحقیق با ارائه یک روش بهینه‌یابی میزان منفعت استفاده از بتن‌های بازیافتی و

شده است، این تحقیقات نشان داده که بتن سرباره‌ای در مقایسه با بتن معمولی دارای خصوصیات مکانیکی مطلوب‌تری می‌باشد [۶]. از طرفی با توجه به رفتار ترد بتن، الیاف‌های طبیعی و مصنوعی برای بهبود خواص مکانیکی و ضربه‌ای بتن مورد توجه محققان قرار گرفته است [۷]. از متداولترین الیاف‌های مورد استفاده در بتن، الیاف‌های فولادی می‌باشند [۸]. در طول سه دهه گذشته مطالعات متعددی بر روی تأثیر الیاف فولادی در بهبود خواص مکانیکی و ضربه‌ای بتن انجام شده است. مطابق نتایج تحقیقات قبلی، الیاف فولادی می‌تواند به طور قابل توجهی خواص مکانیکی و مقاومت ضربه‌ای بتن را بهبود بخشد [۹]. در تحقیقی، Ajdukiewicz و همکاران [۱۰] به بررسی خواص مکانیکی بتن ساخته شده با سنگدانه‌های بازیافتی از نخاله‌های بتنی بتن (RCA^1) پرداختند. در این تحقیق بتن‌هایی با مقاومت فشاری ۴۰ تا ۷۰ مگاپاسکال برای بازیافت انتخاب شد. با انجام آزمایشات بر روی بتن‌های ساخته شده با RCA نتیجه گرفته شد که استفاده از این سنگدانه‌ها تأثیر قابل توجهی در مقاومت فشاری بتن نخواهد داشت. Afroughsabet و همکاران [۱۱] اثرات جایگزینی ۳۰٪ از سیمان پرتلند معمولی (OPC^2) با GGBFS را در بتن‌های ساخته شده با RCA بررسی کردند. در این تحقیق با انجام آزمایشات متنوع گزارش شد که جایگزینی ۳۰٪ OPC با GGBFS تغییری در مقاومت فشاری بتن ایجاد نمی‌کند، بلکه موجب افزایش مقاومت کششی و خمشی بتن نیز می‌شود. از نتایج دیگر این تحقیق می‌توان به کاهش کارایی و جذب آب بتن در اثر استفاده از سرباره GGBFS اشاره نمود. در تحقیقی، Bindiganavile و همکاران [۱۲] مقاومت ضربه‌ای بتن‌های حاوی الیاف‌های پلیمری و فولادی را با هم مقایسه کردند. در این تحقیق مشاهده شد نمونه‌های حاوی الیاف فولادی دارای جذب انرژی بیشتری نسبت به نمونه‌های حاوی الیاف پلیمری هستند. Soruoshian و همکاران [۱۳] نیز در تحقیقات خود نشان دادند اثر الیاف فولادی در افزایش مقاومت ضربه‌ای بتن بسیار بیشتر از اثر آن در افزایش مقاومت خمشی می‌باشد.

هدف محققان در این تحقیق، بررسی تأثیر استفاده از RCA به عنوان جایگزین NA و استفاده از GGBFS به عنوان جایگزین OPC در رفتار بتن بود. علاوه بر این از ۰٪، ۵٪ و ۱٪ حجمی الیاف فولادی در مسلح نمودن طرح اختلاطها استفاده شد. بدین

1 Recycled concrete aggregate
2 Ordinary Portland cement

جدول ۱. خصوصیات فیزیکی و شیمیایی سیمان و GGBFS مورد استفاده

Table 1. Properties of ordinary Portland cement and GGBFS

GGBFS	OPC	خصوصیات شیمیایی
۳۳/۸۲	۲۱/۱	SiO ₂
۱۳/۸۷	۴/۳۷	Al ₂ O ₃
۰/۲۴	۳/۸۸	Fe ₂ O ₃
۷/۰۶	۱/۵۶	MgO
-	۰/۵۲	K ₂ O
-	۰/۳۹	Na ₂ O
۴۱/۹۲	۶۳/۳۳	CaO
-	۵۱	C ₃ S
-	۲۲/۷	C ₂ S
-	۵/۱	C ₃ A
-	۱۱/۹	C ₄ AF
۰/۵۷	-	CO ₃
۰/۳۲	-	P ₂ O ₅
GGBFS	OPC	خصوصیات فیزیکی
۲/۸	۳/۱	وزن مخصوص (g/cm ³)
۳۸۰۰	۳۰۰۰	سطح مخصوص (cm ² /g)

مراحل ساخت بتن به گونهای بود که ابتدا سنگدانه‌ها و مواد چسبیده (OPC و GGBFS) بصورت خشک به مدت ۲ دقیقه در میکسر مخلوط شدند. سپس ۹۰٪ آب مورد نیاز بصورت تدریجی به مخلوط اضافه شد و سپس فوق‌روان‌کننده با آب باقیمانده ترکیب و به بتن اضافه گردید. برای جلوگیری از مشکل گلوله شدن، الیاف‌های فولادی در مرحله آخر و به تدریج به مخلوط بتن اضافه شدند. نمونه‌های ساخته شده شامل نمونه‌های مکعبی به ضلع ۱۰۰ mm، استوانه‌ای به قطر ۱۵۰ mm و ارتفاع ۳۰۰ mm، تیر بتنی به طول ۳۲۰ mm، عرض ۶۰ mm و ارتفاع ۸۰ mm می‌باشند. تمامی نمونه‌ها بعد از مدت ۲۴ ساعت از قالب جدا شده و ۲۸ روز در حوضچه آب عمل آوری شدند. در سن ۲۸ روز نمونه‌ها تحت آزمایش قرار گرفتند.

۴- خصوصیات مصالح مورد استفاده

سنگدانه‌ها از اصلی‌ترین قسمت‌های تشکیل‌دهنده‌ی بتن می‌باشند که خصوصیات آن‌ها نقش بسزایی در رفتار بتن دارد. چگالی و جذب آب دو پارامتر مهم در بررسی خصوصیات سنگدانه‌ها هستند.

حاوی سرباره از نظر مقاومتی اقتصادی و با بتن‌های معمولی مقایسه شده است.

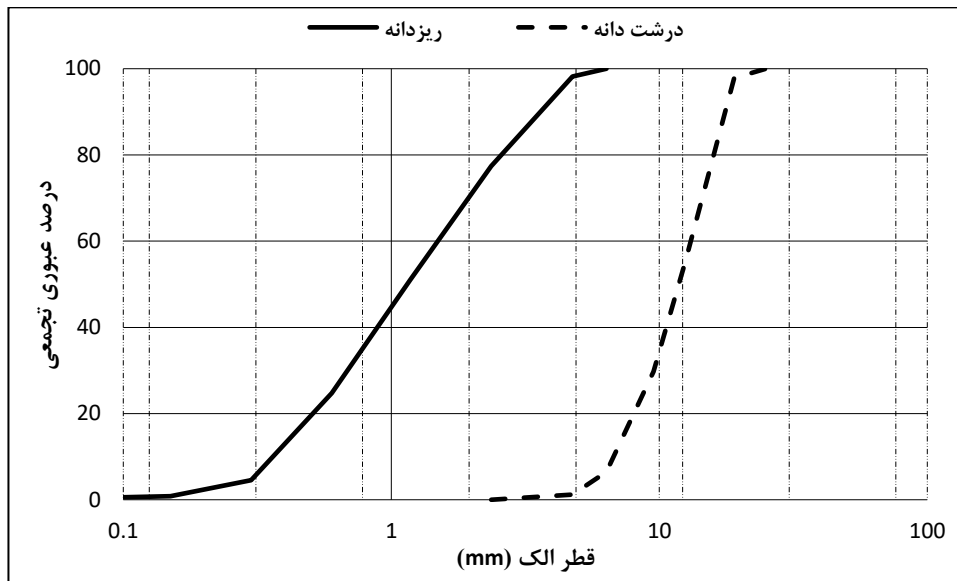
۳- برنامه آزمایشگاهی

۳-۱- مصالح

در ساخت نمونه‌های این تحقیق سیمان پرتلند تیپ ۲ (OPC) و سرباره کوره آهن گدازی (GGBFS) بر اساس ASTM C150 [۲۰] مورد استفاده قرار گرفت. خصوصیات شیمیایی و فیزیکی OPC و GGBFS در جدول ۱ آمده است. با توجه به آنکه در خواص شیمیایی GGBFS نسبت $\frac{CaO}{SiO_2}$ برابر ۱/۲۴ (بین ۰/۵ و ۲) و نسبت $\frac{Al_2O_3}{SiO_2}$ برابر ۰/۴۱ (بین ۰/۱ و ۰/۶) می‌باشد، این ماده به عنوان یک چسب مناسب در بتن قابل استفاده است [۲۱]. سنگدانه‌های مورد استفاده شامل سنگدانه‌های طبیعی (NA) و بازیافت شده از نخاله‌های بتنی (RCA) می‌باشد. NA از نوع ماسه و شن نخودی کوهستانی می‌باشد. RCA نیز از بازیافت نخاله‌های بتنی توسط دستگاه سنگ شکن به دست آمد. NA و RCA با دانه‌بندی یکسانی تهیه شدند. منحنی دانه‌بندی سنگدانه‌ها در شکل ۱ نشان داده شده است. الیاف‌های فولادی مورد استفاده در این تحقیق از نوع دو سر قلاب با طول ۵۰ mm و ضخامت ۰/۸ mm می‌باشد. خصوصیات الیاف‌های فولادی در جدول ۲ آمده است. تصویری از مصالح مورد استفاده در شکل ۲ نشان داده شده است. آب مورد استفاده در ساخت نمونه‌ها، آب قابل شرب بود. برای ایجاد روانی کافی در بتن، از فوق‌روان‌کننده‌ی کربوکسیلاتی با نام تجاری Dezobuild 10 استفاده شد.

۳-۲- طرح اختلاط

از ۲۷ طرح اختلاط مختلف در ساخت نمونه‌های این تحقیق استفاده شد. در این طرح اختلاط‌ها سه متغیر شامل درصد جایگزینی NA با RCA، درصد جایگزینی OPC با GGBFS و درصد الیاف فولادی بکار رفته است. در این طرح اختلاط‌ها میزان ۰٪، ۵۰٪ و ۱۰۰٪ NA با RCA و ۰٪، ۱۵٪ و ۳۰٪ OPC با GGBFS جایگزین شد. علاوه بر این، طرح اختلاط‌ها با ۰٪، ۰/۵٪ و ۱٪ الیاف فولادی دوسر قلاب مسلح شدند. جزئیات طرح اختلاط‌های مورد استفاده در جدول ۳ آمده است.



شکل ۱. منحنی دانه بندی سنگدانه ها

Fig. 1. Particle size distribution curves for aggregates

جدول ۲. خصوصیات الیاف فولادی مورد استفاده

Table 2. Properties of the steel fibers used

نوع الیاف	طول (mm)	قطر (mm)	چگالی (ton/m ³)	مدول الاستیسیته (GPa)	مقاومت کششی (MPa)
فولادی	۵۰	۰/۸	۷/۸۵	۲۰۰	۱۱۰۰



شکل ۲- تصویری از (الف) سنگدانه های باز یافتی، (ب) سنگدانه های طبیعی، (ج) الیاف فولادی دوسر قلاب و (د) سر باره GGBFS مورد استفاده

Fig. 2. Picture of (a) recycled aggregate, (b) natural aggregate, (c) hooked-end steel fiber, and (d) GGBFS

آیین نامه مشخصی وجود ندارد. چندین پیشنهاد برای بدست آوردن مقدار ملات چسبیده به سطح RCA وجود دارد که در این تحقیق از روش پیشنهادی Gutierrez و Sanchez [۲۲] استفاده شده است. بر مبنای این پیشنهاد نمونه ای از RCA به مدت ۲ ساعت در آب غوطه ور شد. سپس به مدت ۲ ساعت در کوره با دمای ۵۰۰ °C خشک و سپس سریعاً در آب سرد قرار داده شدند. نمونه ها بعد از سرد شدن با استفاده از چکش لاستیکی به آرامی مالش داده شدند

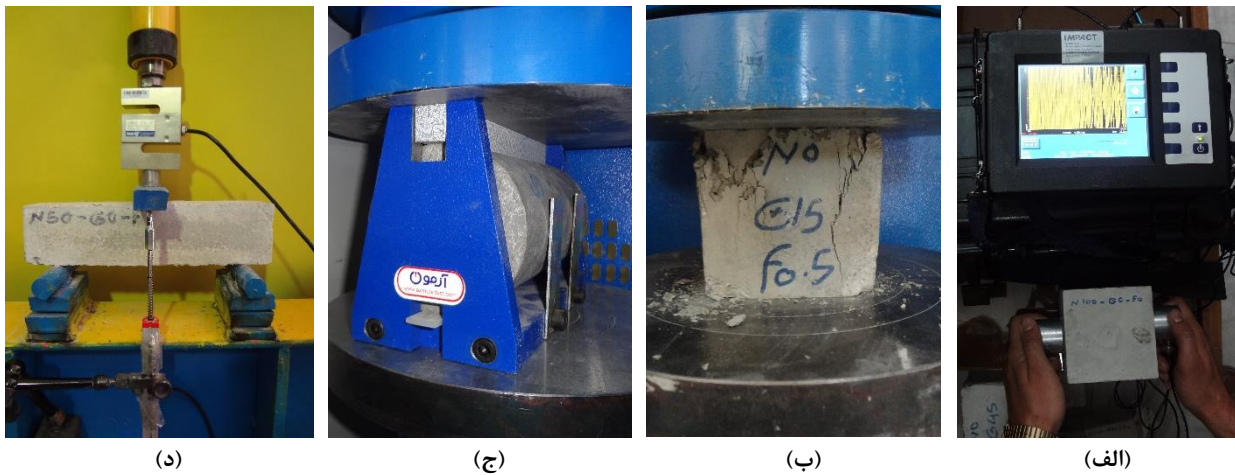
این دو پارامتر برای RCA و NA محاسبه شد. ریزدانه های طبیعی و باز یافتی به ترتیب دارای چگالی 2597 kg/m^3 و 2438 kg/m^3 و درشت دانه های طبیعی و باز یافتی نیز به ترتیب دارای وزن مخصوص 2461 kg/m^3 و 2443 kg/m^3 بودند. چگالی ریزدانه باز یافتی ۶/۵ درصد کمتر از چگالی ریزدانه طبیعی و چگالی درشت دانه باز یافتی ۱ درصد کمتر از چگالی درشت دانه طبیعی است. با توجه به میزان کم اختلاف چگالی بین این دو نوع سنگدانه ها می توان از این اختلاف صرف نظر کرد. به جهت تعیین میزان ملات چسبیده به سطح RCA

جدول ۳. طرح اختلاطها
Table 3. Design of mixes

شماره	طرح اختلاط	ماده چسبنده (kg/m ³)		درشت‌دانه (kg/m ³)		ریزدانه (kg/m ³)		آب (kg/m ³)	فوق‌روان‌کننده (kg/m ³)	الیاف (kg/m ³)
		سیمان	GGBFS	طبیعی	بازیافتی	طبیعی	بازیافتی			
۱	R0-G0-F0	۴۵۶	۰	۹۷۳	۰	۷۱۷	۰	۱۸۲/۴	۰	۰
۲	R0-G0-F0.5	۴۵۳/۷	۰	۹۶۸/۱	۰	۷۱۳/۴	۰	۱۸۱/۵	۰	۳۹/۲۵
۳	R0-G0-F1	۴۵۱/۴	۰	۹۶۳/۲	۰	۷۰۹/۸	۰	۱۸۰/۶	۰	۷۸/۵
۴	R0-G15-F0	۳۸۷/۴	۶۱/۷	۹۷۵/۷	۰	۷۱۹/۱	۰	۱۷۹/۶	۰	۰
۵	R0-G15-F0.5	۳۸۵/۵	۶۱/۴	۹۷۰/۸	۰	۷۱۵/۵	۰	۱۷۸/۸	۰	۳۹/۲۵
۶	R0-G15-F1	۳۸۳/۶	۶۱/۱	۹۶۵/۹	۰	۷۱۱/۹	۰	۱۷۸	۰	۷۸/۵
۷	R0-G30-F0	۳۱۹	۱۲۳/۵	۹۷۹/۹	۰	۷۲۱/۶	۰	۱۷۷	۰	۰
۸	R0-G30-F0.5	۳۱۷/۴	۱۲۲/۹	۹۷۵	۰	۷۱۸	۰	۱۷۶/۱	۰	۳۹/۲۵
۹	R0-G30-F1	۳۱۵/۸	۱۲۲/۳	۹۷۰/۱	۰	۷۱۴/۴	۰	۱۷۵/۲	۰	۷۸/۵
۱۰	R50-G0-F0	۴۵۶	۰	۴۸۶/۵	۴۸۲/۵	۳۵۸/۵	۳۳۶/۵	۱۸۲/۴	۱/۱۴	۰
۱۱	R50-G0-F0.5	۴۵۳/۷	۰	۴۸۴/۱	۴۸۰/۱	۳۵۶/۷	۳۳۴/۸	۱۸۱/۵	۱/۱۳	۳۹/۲۵
۱۲	R50-G0-F1	۴۵۱/۴	۰	۴۸۱/۶	۴۷۷/۷	۳۵۴/۹	۳۳۳/۱	۱۸۰/۶	۱/۱۳	۷۸/۵
۱۳	R50-G15-F0	۳۸۷/۴	۶۱/۷	۴۸۷/۹	۴۸۴	۳۵۹/۶	۳۳۷/۵	۱۷۹/۶	۱/۱۲	۰
۱۴	R50-G15-F0.5	۳۸۵/۵	۶۱/۴	۴۸۵/۴	۴۸۱/۶	۳۵۷/۸	۳۳۵/۸	۱۷۸/۸	۱/۱۲	۳۹/۲۵
۱۵	R50-G15-F1	۳۸۳/۶	۶۱/۱	۴۸۳	۴۷۹/۲	۳۵۶	۳۳۴/۱	۱۷۸	۱/۱۱	۷۸/۵
۱۶	R50-G30-F0	۳۱۹	۱۲۳/۵	۴۹۰	۴۸۶/۱	۳۶۰/۸	۳۳۹	۱۷۷	۱/۱۱	۰
۱۷	R50-G30-F0.5	۳۱۷/۴	۱۲۲/۹	۴۸۷/۵	۴۸۳/۷	۳۵۹	۳۳۷/۳	۱۷۶/۱	۱/۱۰	۳۹/۲۵
۱۸	R50-G30-F1	۳۱۵/۸	۱۲۲/۳	۴۸۵/۱	۴۸۱/۳	۳۵۷/۲	۳۳۵/۶	۱۷۵/۲	۱/۱۰	۷۸/۵
۱۹	R100-G0-F0	۴۵۶	۰	۰	۰	۹۶۵	۶۷۲/۹	۱۸۲/۴	۲/۲۸	۰
۲۰	R100-G0-F0.5	۴۵۳/۷	۰	۰	۰	۹۶۰/۲	۶۶۹/۵	۱۸۱/۵	۲/۲۷	۳۹/۲۵
۲۱	R100-G0-F1	۴۵۱/۴	۰	۰	۰	۹۵۵/۴	۶۶۶/۱	۱۸۰/۶	۲/۲۶	۷۸/۵
۲۲	R100-G15-F0	۳۸۷/۴	۶۱/۷	۰	۰	۹۶۷/۹	۶۷۴/۹	۱۷۹/۶	۲/۲۵	۰
۲۳	R100-G15-F0.5	۳۸۵/۵	۶۱/۴	۰	۰	۹۶۳/۱	۶۷۱/۵	۱۷۸/۸	۲/۲۴	۳۹/۲۵
۲۴	R100-G15-F1	۳۸۳/۶	۶۱/۱	۰	۰	۹۵۸/۳	۶۶۸/۱	۱۷۸	۲/۲۲	۷۸/۵
۲۵	R100-G30-F0	۳۱۹	۱۲۳/۵	۰	۰	۹۷۲/۲	۶۷۷/۹	۱۷۷	۲/۲۱	۰
۲۶	R100-G30-F0.5	۳۱۷/۴	۱۲۲/۹	۰	۰	۹۶۷/۴	۶۷۴/۵	۱۷۶/۱	۲/۲۰	۳۹/۲۵
۲۷	R100-G30-F1	۳۱۵/۸	۱۲۲/۳	۰	۰	۹۶۲/۶	۶۷۱/۱	۱۷۵/۲	۲/۱۹	۷۸/۵

همچنین در این تحقیق با استفاده از دستگاه لس‌آنجلس مقاومت سائیدگی مصالح درشت‌دانه طبیعی و بازیافتی در مقابل سایش و ضربه تعیین و با هم مقایسه شد. این آزمایش بر اساس ASTM C131 [۲۵] انجام شد. میزان سائیدگی برای NA، ۲۲/۷ درصد و برای RCA، ۲۸/۵ درصد بدست آمد. این نتیجه بیانگر آن است که RCA در مقابل سائیدگی مقاومت کمتری را نسبت به NA از خود نشان داده است که با توجه به ساختار متخلخل RCA و ملات چسبیده به سطح آن‌ها این نتیجه منطقی است.

تا ملات چسبیده به سطح آن‌ها جدا شود. بعد از انجام مراحل فوق RCA گذراندن نمونه از الک شماره ۴ درصد وزنی ملات چسبیده به RCA، ۱۲ درصد بدست آمد. Pepe و همکاران [۲۳] گزارش کردند، میزان جذب آب RCA با مقدار ملات چسبیده به سطح آن‌ها رابطه مستقیم دارد. جذب آب NA و RCA بر اساس ASTM C125 [۲۴] محاسبه شد. میزان جذب آب برای NA، ۴/۳ درصد و برای RCA، ۷/۵ درصد بدست آمد. افزایش جذب آب RCA نسبت به NA با توجه به ملات چسبیده به سطح این سنگدانه‌ها منطقی است.



شکل ۳. تصویری از نحوه انجام آزمایش (الف) UPV، (ب) مقاومت فشاری، (ج) مقاومت کششی و (د) مقاومت خمشی
 Fig. 3. Picture of (a) UPV, (b) compressive strength, (c) splitting tensile strength, and (d) flexural strength test

۰/۰۵ انجام شد. مقاومت کششی نمونه‌ها بر اساس رابطه (۳) محاسبه شد.

$$\sigma_t = \frac{2P}{\pi \cdot L \cdot D} \quad (3)$$

که در آن، σ_t مقاومت کششی، P نیروی اعمال شده، D قطر و L طول نمونه استوانه‌ای می‌باشد. آزمایش خمشی سه نقطه‌ای (اعمال یک بار متمرکز در وسط دهانه) مطابق با ASTM C1609 [۳۰] انجام شد. مقاومت خمشی تیرها بر اساس رابطه (۴) محاسبه شد.

$$\sigma_f = \frac{3FL}{2b \cdot d^2} \quad (4)$$

که در آن، σ_f مقاومت خمشی، F نیروی خمشی اعمال شده، L طول دهانه، b عرض و h ارتفاع تیر می‌باشد. تصویری از آزمایشات انجام گرفته در این تحقیق در شکل ۳ نشان داده شده است.

۶- تجزیه و تحلیل نتایج

۶-۱- اسلامپ

آزمایش اسلامپ بر روی ۲۷ طرح اختلاط نشان داده شده در جدول ۳ انجام شد. از آنجایی که نسبت آب به مواد چسبنده در تمام طرح اختلاطها ثابت و برابر ۰/۴ می‌باشد، با انجام این آزمایش تأثیر استفاده از RCA، GGBFS و الیاف فولادی بر روی کارایی بتن

۵- شیوه آزمایش‌ها

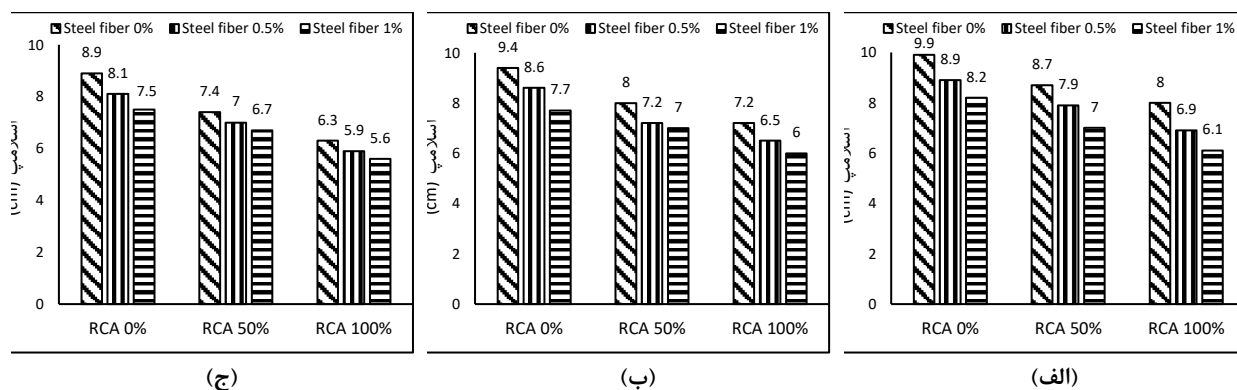
به منظور بررسی کارایی طرح اختلاطها، از آزمایش اسلامپ بر اساس ASTM C143 [۲۶] استفاده گردید. آزمایش سرعت موج اولتراسونیک (UPV) نیز با روش مستقیم (قرار دادن مبدل در دو طرف نمونه بتنی) مورد استفاده قرار گرفت. در محاسبه سرعت موج از رابطه (۱) استفاده شد.

$$V = \frac{L}{t} \quad (1)$$

که در آن، V سرعت موج بر حسب (km/sec)، L فاصله بین دو مبدل بر حسب (mm) و t زمان انتقال موج بر حسب (μ sec) می‌باشد. آزمایش جذب آب بر اساس ASTM C642 [۲۷] انجام شد. این آزمایش بصورت جذب آب ۷۲ ساعته انجام گرفت. آزمایش مقاومت فشاری بر اساس ASTM C39 [۲۸] با سرعت بارگذاری ۰/۳ MPa/sec انجام شد. در این آزمایش از یک دستگاه آزمایش فشاری دیجیتال با ظرفیت ۱۰۰۰ کیلو نیوتن استفاده شد. مقاومت فشاری بر اساس رابطه (۲) محاسبه شد.

$$\sigma_c = \frac{P}{A} \quad (2)$$

که در آن، σ_c مقاومت فشاری، P حداکثر نیروی فشاری تحمل شده توسط نمونه و A سطح مقطع نمونه می‌باشد. آزمایش مقاومت کششی بر اساس ASTM C496 [۲۹] با سرعت بارگذاری MPa/s



شکل ۴. نتایج آزمایش اسلامپ برای طرح اختلاط‌های حاوی (الف) ۰٪، (ب) ۱۵٪ و (ج) ۳۰٪ سرباره GGBFS
 Fig. 4. The results of slump test for mixtures containing (a) 0%, (b) 15%, and (c) 30% GGBFS

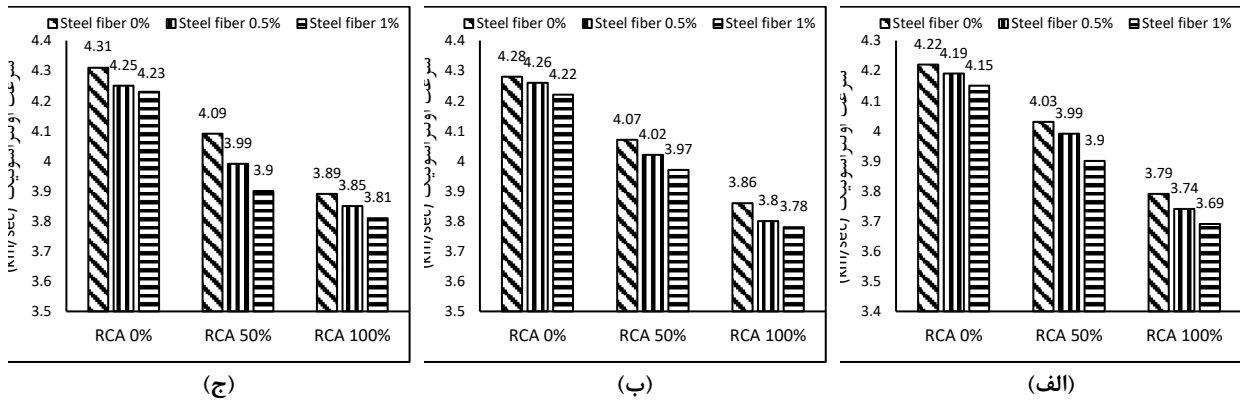
به طرح اختلاط‌های حاوی الیاف فولادی نشان داد که این الیاف نیز موجب کاهش روانی بتن شده است. با بررسی طرح اختلاط‌های حاوی NA و درصد‌های مختلف الیاف فولادی شاهد آن بودیم که اضافه کردن ۰/۵٪ و ۱٪ حجمی الیاف فولادی موجب کاهش ۱۰/۱٪ و ۱۷/۲٪ اسلامپ نسبت به طرح اختلاط شاهد (R0-G0-F0) شده است. این در حالی است که درصد‌های مشابه از همین الیاف در طرح اختلاط‌های حاوی RCA موجب کاهش شدیدتر کارایی بتن شده است. ۰/۵٪ و ۱٪ حجمی الیاف فولادی در بتن حاوی ۱۰۰٪ RCA موجب کاهش ۱۳/۸٪ و ۲۳/۸٪ اسلامپ نسبت به نمونه شاهد (R100-G0-F0) شده است. بنابراین استفاده از RCA، GGBFS و الیاف فولادی بصورت همزمان بدترین حالت را از لحاظ کارایی در بتن ایجاد می‌نماید. نتایج این آزمایش در نمودارهای شکل ۴ نشان داده شده است.

۲-۶-۱ UPV

آزمایش سرعت موج اولتراسونیک یکی از آزمایش‌های غیر مخرب بتن است که نتایج آن می‌تواند نشان‌دهنده‌ی کیفیت بتن باشد [۳۴]. محققان متعددی روابط بین خصوصیات مکانیکی بتن (مدول الاستیسیته، مقاومت فشاری، مقاومت کششی و ...) و سرعت موج اولتراسونیک را مورد بررسی قرار داده‌اند [۳۵]. نتایج این آزمایش نشان‌دهنده‌ی تأثیر منفی RCA و تأثیر مثبت GGBFS بر روی سرعت موج اولتراسونیک در بتن می‌باشد. با بررسی طرح اختلاط‌های حاوی درصد‌های مختلف RCA مشاهده شد که این

بررسی شد. میزان اسلامپ برای طرح اختلاط شاهد (R0-G0-F0) ۹/۹ سانتی‌متر بدست آمد. با بررسی طرح اختلاط‌های حاوی RCA مشاهده شد که استفاده از این سنگدانه‌ها موجب کاهش کارایی بتن می‌شود. استفاده از ۵۰ و ۱۰۰ درصد RCA به عنوان جایگزین NA به ترتیب موجب کاهش ۱۲٪ و ۱۹٪ اسلامپ شد. تأثیر منفی RCA بر روی کارایی بتن به دلیل ملات چسبیده به سطح آن‌ها می‌باشد، زیرا این موضوع موجب افزایش جذب آب سنگدانه‌ها و کاهش روانی بتن می‌شود. تحقیقات انجام شده توسط Kazemi و همکاران [۳۱] نشان داد که استفاده از RCA در مقایسه با NA بر روی کارایی بتن تأثیر منفی دارد. در صورتی که تحقیقات انجام شده توسط Afroughsabet و همکاران [۱۱] و Sasanipour و همکاران [۳۲] نشان داد که استفاده از RCA بر روی کارایی بتن تأثیر منفی نخواهد داشت. از طرفی با بررسی طرح اختلاط‌های حاوی GGBFS به عنوان جایگزین OPC، کاهش روانی بتن حاوی این سرباره را شاهد بودیم. با بررسی طرح اختلاط‌های حاوی NA و درصد‌های مختلف GGBFS شاهد آن بودیم که جایگزینی ۱۵٪ و ۳۰٪ OPC با این سرباره به ترتیب موجب کاهش ۵٪، ۱۰٪ اسلامپ نسبت به طرح اختلاط شاهد می‌شود. در تحقیقات گذشته نیز اثرات منفی GGBFS بر روی کارایی بتن گزارش شده است که دلیل آن اشکال نامنظم ذرات این سرباره و سطح زبر آن‌ها است [۳۳]. این در حالی است که درصد‌های مشابه از همین سرباره در طرح اختلاط‌های حاوی RCA موجب کاهش شدیدتر روانی شده است، ۱۰٪ و ۲۱٪ از این سرباره در طرح اختلاط حاوی ۱۰۰٪ RCA موجب کاهش ۱۰٪ و ۲۱٪ اسلامپ شد. علاوه بر این، نتایج مربوط

1 Ultrasonic pulse velocity



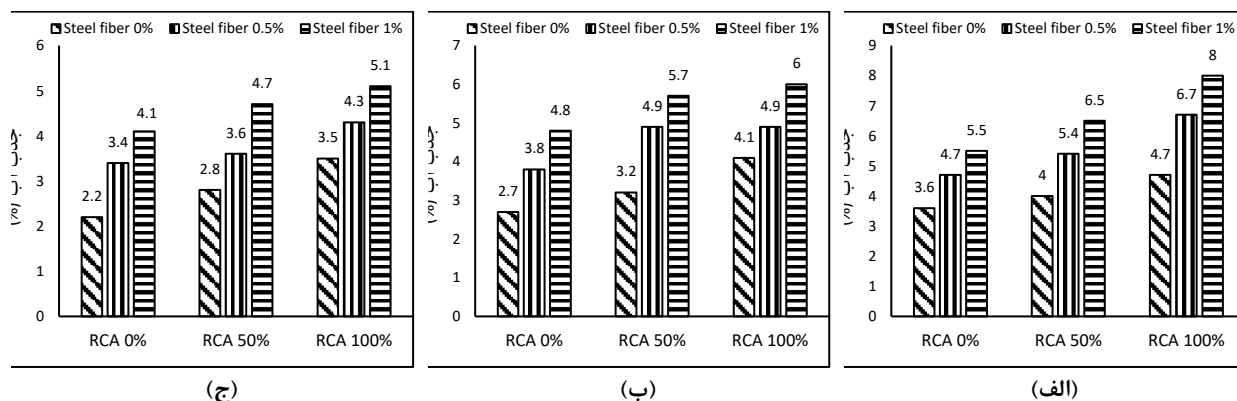
شکل ۵. نتایج آزمایش سرعت اولتراسونیک برای طرح اختلاط‌های حاوی (الف) ۰٪، (ب) ۱۵٪ و (ج) ۳۰٪ سرباره GGBFS
 Fig. 5. The results of UPV test for mixtures containing (a) 0%, (b) 15%, and (d) 30% GGBFS

شده است. مطابق با طبقه بندی ارائه شده توسط Whitehurst [۳۸] کیفیت بتن بر مبنای سرعت عبور امواج در محدوده‌ی کمتر از ۲ km/sec خیلی ضعیف، بین ۲ km/sec تا ۳ km/sec ضعیف، ۳ km/sec تا ۳/۵ km/sec مشکوک و ۳/۵ km/sec تا ۴/۵ km/sec خوب تلقی می شود. مطابق با این رده بندی کیفیت بتن‌های آزمایش شده در این تحقیق در محدوده خوب قرار دارد. نتایج مربوط به این آزمایش در نمودارهای شکل ۵ نشان داده شده است. در این نمودارهای نیز تأثیر منفی الیاف فولادی و RCA قابل مشاهده است.

۳-۶- جذب آب

از نتایج این آزمایش می‌توان این‌گونه نتیجه گرفت که RCA جذب آب بتن را نسبت به NA افزایش می‌دهد. این موضوع به دلیل وجود ملات چسبیده به سطح RCA توجیه‌پذیر است. جایگزینی ۵۰٪ و ۱۰۰٪ NA با RCA به ترتیب موجب افزایش ۱۱/۱٪ و ۳۰/۶٪ جذب آب نهایی بتن شده است. نتایج این آزمایش در نمودارهای شکل ۶ نشان داده شده است. در این نمودارها نیز روند افزایش جذب آب نمونه‌های حاوی RCA قابل مشاهده است. در تحقیقات گذشته افزایش ۱۴/۲٪ [۳۹]، ۱۷/۵٪ [۴۰]، ۱۹/۸٪ [۳۷]، ۶۲٪ [۴۱] و ۶۸/۹٪ [۴۲] جذب آب بتن در اثر جایگزینی NA با RCA گزارش شده است. از طرفی در نتایج این آزمایش کاهش جذب آب نمونه‌های حاوی GGBFS نسبت به نمونه‌های فاقد آن مشاهده شد. از نمودارهای شکل ۶ نیز مشخص است که استفاده از GGBFS به عنوان جایگزین OPC جذب آب بتن را کاهش داده است. این سرباره با توجه به قابلیت پرمکنندگی خود می‌تواند موجب

سنگدانه‌ها موجب کاهش سرعت موج اولتراسونیک در بتن شده‌اند. نتیجه این آزمایش برای طرح اختلاط R0-G0-F0 که حاوی ۱۰۰٪ NA می‌باشد، ۴/۲۲ km/sec حاصل شد، که نشان‌دهنده تراکم خوب این نمونه می‌باشد. با جایگزینی ۵۰٪ و ۱۰۰٪ NA با RCA شاهد کاهش سرعت موج اولتراسونیک تا ۴/۰۳ و ۳/۷۹ km/sec بودیم. با توجه به ساختار متخلخل RCA این نتیجه منطقی بنظر می‌رسد [۳۶]. Mansur و همکاران [۳۷] کاهش ۸٪، ۱۰٪ و ۱۲٪ سرعت موج اولتراسونیک را در ازای استفاده از ۲۵٪، ۵۰٪ و ۱۰۰٪ RCA گزارش کردند. تحقیقات انجام شده توسط Sasanipour و همکاران [۳۲] نیز نشان داد که جایگزینی ۲۵٪، ۵۰٪، ۷۵٪ و ۱۰۰٪ NA با RCA به ترتیب موجب کاهش ۵٪، ۶٪، ۹٪ و ۱۰٪ سرعت موج اولتراسونیک در بتن می‌شود. از طرفی با مقایسه سرعت موج اولتراسونیک در نمونه‌های حاوی درصد‌های مختلف GGBFS شاهد آن بودیم که استفاده از این سرباره موجب افزایش سرعت موج اولتراسونیک در بتن شده است. با توجه به قابلیت پرمکنندگی GGBFS این موضوع منطقی بنظر می‌رسد. جایگزینی ۱۵٪ و ۳۰٪ OPC با GGBFS موجب افزایش ۱٪، ۲٪، ۳٪ و ۲٪ در طرح اختلاط حاوی ۱۰۰٪ NA و افزایش ۲٪، ۳٪ در طرح اختلاط حاوی ۱۰۰٪ RCA شد. از طرفی با مقایسه سرعت موج اولتراسونیک در نمونه‌های حاوی و فاقد الیاف فولادی شاهد آن بودیم که این الیاف نیز موجب کاهش سرعت موج اولتراسونیک در بتن شده است. استفاده ۵/۰ و ۱ درصد حجمی الیاف فولادی موجب کاهش ۱ و ۲ درصدی سرعت موج اولتراسونیک در طرح اختلاط حاوی ۱۰۰٪ NA و کاهش ۱ و ۳ درصدی در طرح اختلاط حاوی ۱۰۰٪ RCA



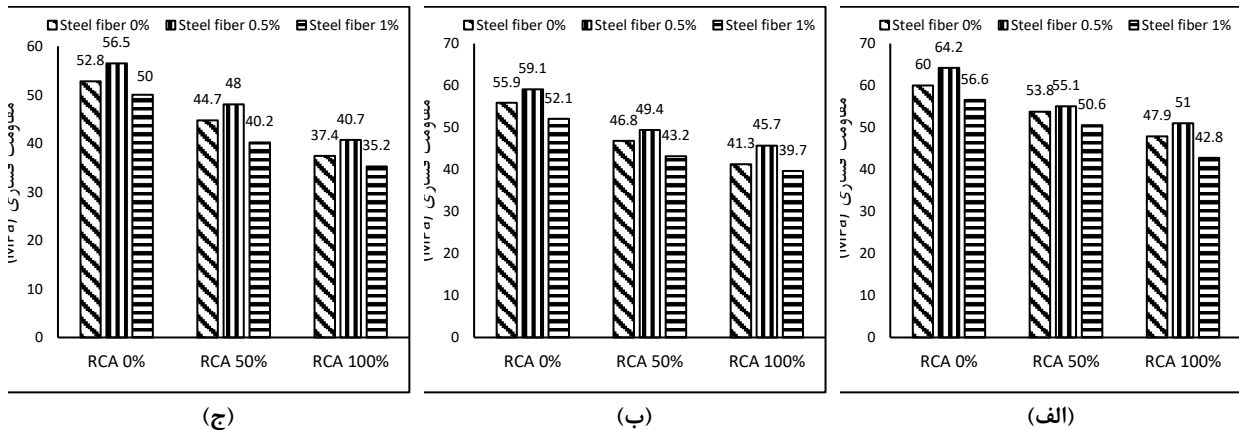
شکل ۶. نتایج آزمایش جذب آب برای طرح اختلاط‌های حاوی (الف) ۰٪، (ب) ۱۵٪ و (ج) ۳۰٪ سرباره GGBFS
 Fig. 6. The results of water absorption test for mixtures containing (a) 0%, (b) 15%, and (d) 30% GGBFS

اثر جایگزینی NA با RCA بود. جایگزینی ۵۰٪ و ۱۰۰٪ NA با RCA به ترتیب موجب کاهش ۱۰/۳٪ و ۲۰/۱٪ مقاومت فشاری نسبت به نمونه مرجع (R0-G0-F0) شد. این در صورتی است که که جایگزینی NA با RCA در طرح اختلاط‌های حاوی GGBFS موجب کاهش قابل توجه‌تر مقاومت فشاری شد. جایگزینی ۵۰٪ و ۱۰۰٪ NA با RCA در طرح اختلاط‌های حاوی ۳۰٪ GGBFS به ترتیب موجب کاهش ۱۵/۳٪ و ۲۸/۱٪ درصدی مقاومت فشاری نسبت به نمونه R0-G30-F0 شد. در اکثر تحقیقات پیشین کاهش مقاومت فشاری در اثر استفاده از RCA گزارش شده است [۴۵]. با این حال، در تحقیقاتی مقاومت فشاری برابر [۴۶] و حتی در برخی دیگر مقاومت فشاری بالاتر بتن‌های ساخته شده با RCA در مقایسه با بتن‌های ساخته شده با NA گزارش شده است [۴۷]. از طرفی، نتایج نشان‌دهنده آن است که جایگزینی OPC با GGBFS موجب کاهش مقاومت فشاری شده است. در طرح اختلاط‌های حاوی NA جایگزینی ۱۵٪ و ۳۰٪ OPC با GGBFS به ترتیب موجب کاهش ۶/۹٪ و ۱۲٪ مقاومت فشاری نسبت به نمونه R0-G0-F0 (حاوی ۱۰۰٪ NA و فاقد GGBFS و الیاف) شد. این در حالی است که کاهش مقاومت فشاری در اثر جایگزینی OPC با GGBFS در طرح اختلاط‌های حاوی RCA قابل توجه‌تر بود. بطوری که جایگزینی ۱۵٪ و ۳۰٪ OPC با GGBFS در طرح اختلاط‌های حاوی ۱۰۰٪ RCA به ترتیب موجب کاهش ۱۳/۸٪ و ۲۲٪ مقاومت فشاری نسبت به نمونه R100-G0-F0 (طرح اختلاط‌های حاوی ۱۰۰٪ RCA و فاقد GGBFS و الیاف) شد. از طرفی نتایج نشان داد که استفاده از الیاف‌های فولادی در بتن هم تأثیر افزایشی و هم تأثیر کاهشی در

کاهش تخلخل در بتن شود و جذب آب را کاهش دهد. جایگزین کردن ۱۵٪ و ۳۰٪ OPC با این سرباره به ترتیب موجب کاهش ۲۵٪ و ۳۸/۸٪ جذب آب نهایی در طرح اختلاط‌های حاوی ۱۰۰٪ NA و کاهش ۱۲/۸٪ و ۲۵/۵٪ در طرح اختلاط‌های حاوی ۱۰۰٪ RCA شد. از طرفی الیاف‌های فولادی نیز در افزایش جذب آب بتن تأثیر قابل توجه‌ای داشتند. افزودن ۵/۰٪ و ۱٪ حجمی الیاف فولادی در طرح اختلاط‌های حاوی NA به ترتیب موجب افزایش ۳۰/۶٪ و ۵۲/۸٪ جذب آب نهایی بتن شد. این در صورتی است که همین میزان الیاف فولادی در طرح اختلاط‌های حاوی RCA به ترتیب موجب افزایش ۴۲/۶٪، ۷۰/۲٪ جذب آب نهایی شد. این نتیجه بیانگر آن است که نقش الیاف‌های فولادی در افزایش جذب آب بتن‌های حاوی RCA قابل توجه‌تر می‌باشد. تحقیقاتی دیگری نیز در گذشته افزایش جذب آب بتن در اثر افزودن الیاف فولادی را گزارش کرده‌اند که دلیل این امر را نقش الیاف فولادی در کاهش کارایی و افزایش تخلخل در بتن اعلام نموده‌اند [۴۳ و ۴۴]. از این آزمایش می‌توان این‌گونه نتیجه گرفت که به جهت دستیابی به کمترین میزان جذب آب استفاده از ترکیب NA و GGBFS مناسب‌ترین شیوه است. بطوری که کمترین میزان جذب آب مربوط به نمونه حاوی ۱۰۰٪ NA، ۳۰٪ GGBFS و فاقد الیاف (R0-G30-F0) و بیشترین میزان جذب آب مربوط به نمونه حاوی ۱۰۰٪ RCA، ۰٪ GGBFS و ۱٪ الیاف فولادی (R100-G0-F1) می‌باشد.

۴-۶- مقاومت فشاری

نتایج این آزمایش نشان‌دهنده‌ی کاهش مقاومت فشاری در

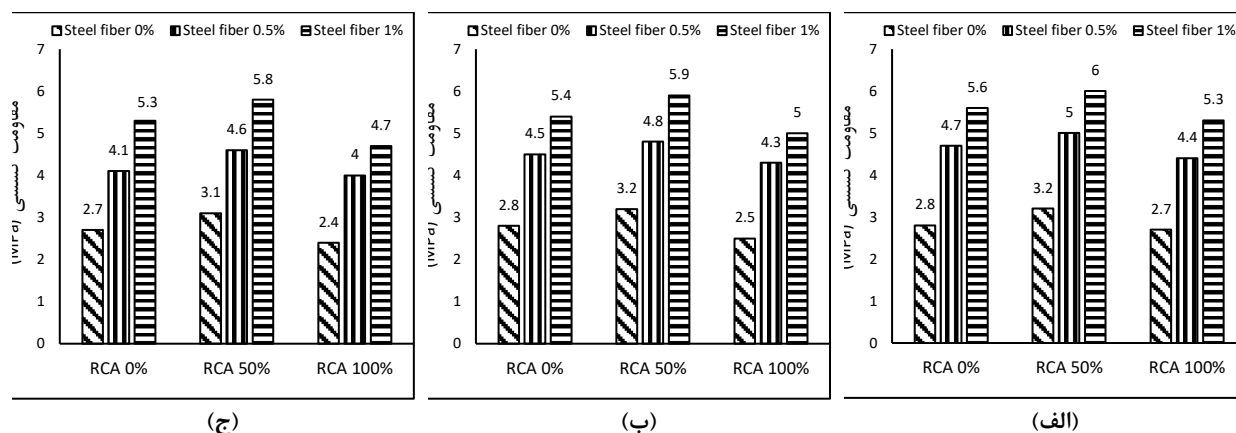


شکل ۷. نتایج آزمایش مقاومت فشاری برای طرح اختلاط‌های حاوی (الف) ۰٪، (ب) ۱۵٪ و (ج) ۳۰٪ سرپاره GGBFS
 Fig. 7. The results of compressive strength test for mixtures containing (a) 0%, (b) 15%, and (c) 30% GGBFS

نتایج این آزمایش نشان‌دهنده‌ی افزایش مقاومت کششی نمونه‌های حاوی ترکیب NA و RCA نسبت به نمونه مرجع بود. نتایج این آزمایش نشان‌دهنده‌ی آن است که بیشترین مقاومت کششی را نمونه‌های حاوی ۵۰٪ NA و ۵۰٪ RCA به خود اختصاص داده‌اند. مقاومت کششی نمونه شاهد (R0-G0-F0) ۲/۸۱ مگاپاسکال بدست آمد که جایگزینی ۵۰ درصد NA با RCA موجب افزایش آن به ۳/۱۸ MPa شد. خصوصیات فیزیکی RCA مانند سطوح زبر آن‌ها موجب بهبود شرایط میکروترک‌ها در ناحیه مشترک انتقالی (ITZ¹) بین سنگدانه‌ها و ماتریس سیمان و همچنین انسجام بیشتر میان اجزای تشکیل‌دهنده‌ی بتن شده و در نتیجه مقاومت کششی بتن را افزایش می‌دهد [۵۱]. اما این در صورتی است که سنگدانه‌های بازیافتی دارای ساختار متخلخلی می‌باشند که این امر باعث شده است جایگزینی ۱۰۰٪ NA با RCA موجب کاهش مقاومت شود [۳۶]. جایگزینی NA با RCA به میزان بیشتر از ۵۰٪ موجب کاهش مقاومت کششی شد. مقاومت کششی نمونه R100-G0-F0 که حاوی ۱۰۰٪ RCA بود، ۲/۶۸ MPa بدست آمد. در تحقیقات گذشته نیز نتایج مشابه‌ای حاصل شده است [۱۱]. این نتایج بیانگر آن است که ترکیب ۵۰٪ NA و ۵۰٪ RCA بهینه‌ترین طرح اختلاط در راستای دستیابی به بیشترین مقاومت کششی می‌باشد. از طرفی نتایج نشان‌دهنده‌ی کاهش اندک مقاومت کششی نمونه‌های حاوی GGBFS در مقایسه با نمونه‌های فاقد آن بود. در ازای استفاده از ۱۵٪ و ۳۰٪ GGBFS در نمونه‌های حاوی ۱۰۰٪ NA به ترتیب شاهد

مقاومت فشاری دارد. نتایج نشان‌دهنده‌ی آن است که افزودن ۰/۵٪ الیاف فولادی دو سر قلاب موجب افزایش مقاومت فشاری شده است، در صورتی که افزایش حجم الیاف فولادی به ۱٪ حجم بتن موجب کاهش مقاومت فشاری شده است. در تمام طرح اختلاط‌های این تحقیق اعم از طرح اختلاط‌های حاوی NA ، RCA و ترکیب آن‌ها، شاهد آن بودیم که ۰/۵٪ الیاف فولادی موجب افزایش مقاومت فشاری و ۱٪ الیاف فولادی موجب کاهش مقاومت فشاری شده است. ۰/۵٪ الیاف فولادی در طرح اختلاط‌های حاوی NA و RCA به ترتیب موجب افزایش ۷٪ و ۶/۵٪ مقاومت فشاری شد. در حالی که ۱٪ الیاف فولادی در طرح اختلاط‌های حاوی NA و RCA به ترتیب موجب کاهش ۵/۷٪ و ۱۱/۹٪ مقاومت فشاری شد. در تحقیقات گذشته نیز هر دو نوع اثر افزایشی و کاهش الیاف فولادی بر روی مقاومت فشاری بتن گزارش شده است [۴۸]. افزودن الیاف فولادی موجب افزایش تخلخل بتن شده و مقاومت فشاری آن را کاهش می‌دهد، از طرفی این الیاف می‌تواند با ایجاد دوختگی در ترک‌های ایجاد شده در بتن، موجب افزایش مقاومت فشاری شود [۴۹]. Aslani و همکارانش [۵۰] مشاهده کردند که افزودن الیاف‌های فولادی به طول ۶۰ میلی‌متر موجب افزایش مقاومت فشاری بتن می‌شود. Khaloo و همکارانش [۴۸] کاهش مقاومت فشاری بتن را در اثر افزودن الیاف فولادی به طول ۲۰/۶ میلی‌متر گزارش کردند. در نمودارهای شکل ۷ نتایج آزمایش مقاومت فشاری نشان داده شده است.

1 Interfacial transition zone



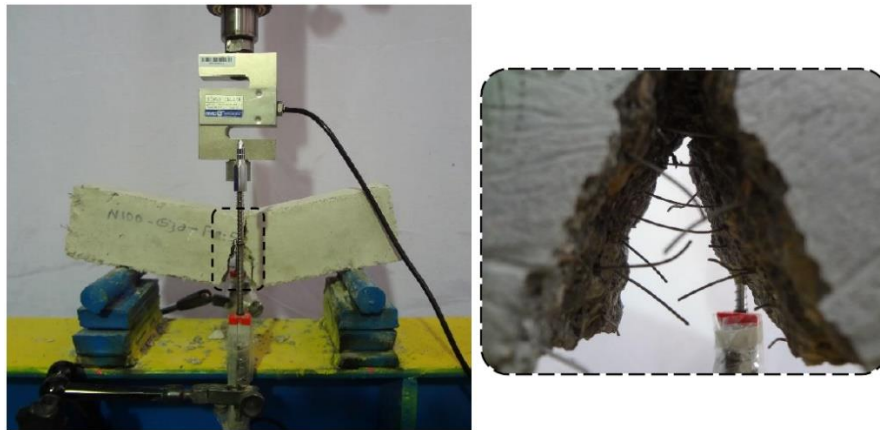
شکل ۸. نتایج آزمایش مقاومت کششی برای طرح اختلاط‌های حاوی (الف) ۰٪، (ب) ۱۵٪ و (ج) ۳۰٪ سرباره GGBFS
 Fig. 8. The results of splitting tensile strength test for mixtures containing (a) 0%, (b) 15%, and (d) 30%

کاهش ۲٪ و ۴/۳٪ مقاومت کششی نسبت به نمونه R0-G0-F0 (حاوی ۱۰۰٪ NA و فاقد GGBFS و الیاف) بودیم. این در صورتی است که در نمونه‌های حاوی RCA نیز این میزان از GGBFS به ترتیب موجب کاهش ۵/۶٪ و ۱۰/۸٪ مقاومت کششی نسبت به نمونه R100-G0-F0 (حاوی ۱۰۰٪ RCA و فاقد GGBFS و الیاف) شد. از طرفی نتایج این آزمایش نشان‌دهنده تأثیر قابل توجه الیاف‌های فولادی دو سر قلاب بر روی مقاومت کششی بتن بود. در تمام طرح اختلاط‌ها اعم از طرح اختلاط‌های حاوی NA، RCA و ترکیب آن‌ها شاهد تأثیر قابل توجه الیاف‌های فولادی در افزایش مقاومت کششی بودیم. در این آزمایش الیاف‌های فولادی با ایجاد دوختگی در ترک کششی ایجاد شده در وسط نمونه‌های استوانه‌ای موجب افزایش مقاومت کششی شدند. افزودن ۰/۵٪ و ۱٪ الیاف فولادی در طرح اختلاط‌های حاوی NA موجب افزایش ۶۸٪ و ۱۰۰٪ و در طرح اختلاط‌های حاوی RCA موجب افزایش ۶۳٪ و ۹۶٪ مقاومت کششی نسبت به نمونه‌های مرجع شد. مطالعات قبلی نیز افزایش مقاومت کششی بتن را در اثر افزودن الیاف فولادی گزارش کرده‌اند [۵۲ و ۵۳]. تحقیقات گذشته نشان داده که میزان تأثیر الیاف فولادی در افزایش مقاومت کششی به طول، شکل و خواص مکانیکی الیاف وابسته است [۵۴]. Carnerio و همکاران [۵۵] افزایش ۲۶٪ مقاومت کششی نمونه‌های ساخته شده با RCA و حاوی ۰/۷۵٪ الیاف‌های فولادی گزارش کردند. در نمودارهای شکل ۸ نتایج این آزمایش نشان داده شده است. در این نمودار نیز می‌توان مشاهده کرد که بیشترین مقاومت کششی مربوط به نمونه‌های حاوی ترکیب

کاهش ۲٪ و ۴/۳٪ مقاومت کششی نسبت به نمونه R0-G0-F0 (حاوی ۱۰۰٪ NA و فاقد GGBFS و الیاف) بودیم. این در صورتی است که در نمونه‌های حاوی RCA نیز این میزان از GGBFS به ترتیب موجب کاهش ۵/۶٪ و ۱۰/۸٪ مقاومت کششی نسبت به نمونه R100-G0-F0 (حاوی ۱۰۰٪ RCA و فاقد GGBFS و الیاف) شد. از طرفی نتایج این آزمایش نشان‌دهنده تأثیر قابل توجه الیاف‌های فولادی دو سر قلاب بر روی مقاومت کششی بتن بود. در تمام طرح اختلاط‌ها اعم از طرح اختلاط‌های حاوی NA، RCA و ترکیب آن‌ها شاهد تأثیر قابل توجه الیاف‌های فولادی در افزایش مقاومت کششی بودیم. در این آزمایش الیاف‌های فولادی با ایجاد دوختگی در ترک کششی ایجاد شده در وسط نمونه‌های استوانه‌ای موجب افزایش مقاومت کششی شدند. افزودن ۰/۵٪ و ۱٪ الیاف فولادی در طرح اختلاط‌های حاوی NA موجب افزایش ۶۸٪ و ۱۰۰٪ و در طرح اختلاط‌های حاوی RCA موجب افزایش ۶۳٪ و ۹۶٪ مقاومت کششی نسبت به نمونه‌های مرجع شد. مطالعات قبلی نیز افزایش مقاومت کششی بتن را در اثر افزودن الیاف فولادی گزارش کرده‌اند [۵۲ و ۵۳]. تحقیقات گذشته نشان داده که میزان تأثیر الیاف فولادی در افزایش مقاومت کششی به طول، شکل و خواص مکانیکی الیاف وابسته است [۵۴]. Carnerio و همکاران [۵۵] افزایش ۲۶٪ مقاومت کششی نمونه‌های ساخته شده با RCA و حاوی ۰/۷۵٪ الیاف‌های فولادی گزارش کردند. در نمودارهای شکل ۸ نتایج این آزمایش نشان داده شده است. در این نمودار نیز می‌توان مشاهده کرد که بیشترین مقاومت کششی مربوط به نمونه‌های حاوی ترکیب

۶-۶- مقاومت خمشی

همانند آزمایش مقاومت کششی، در این آزمایش نیز بیشترین مقاومت خمشی در نمونه‌های حاوی ترکیب NA و RCA مشاهده شد. مقاومت خمشی نمونه مرجع R0-G0-F0 (حاوی ۱۰۰٪ NA و فاقد GGBFS و الیاف) ۵/۷۵ MPa بدست آمد. جایگزینی ۵۰٪ NA با RCA موجب افزایش مقاومت خمشی تا ۶/۱۷ MPa شد. با توجه به خصوصیات فیزیکی RCA مانند سطح زیر آن‌ها، استفاده از این سنگدانه‌ها موجب چسبندگی بیشتر میان اجزای تشکیل‌دهنده بتن در ناحیه سطح مشترک انتقالی (ITZ) بین سنگدانه‌ها و ماتریس سیمان می‌شود، در نتیجه افزایش مقاومت خمشی نمونه‌های حاوی RCA منطقی به نظر می‌رسد [۵۱]. اما این در صورتی است که سنگدانه‌های بازیافتی دارای ساختار متخلخل می‌باشند که این امر موجب شده جایگزینی ۱۰۰٪ NA با RCA موجب کاهش مقاومت بتن شود [۳۶]. این در صورتی است که با افزایش میزان RCA به ۱۰۰٪ شاهد کاهش مقاومت خمشی بودیم. با استفاده از ۱۰۰٪ RCA مقاومت خمشی به ۵/۰۹ MPa کاهش یافت. در تحقیقات گذشته نیز اثرات مثبت جایگزینی ۵۰٪ NA با RCA و اثرات منفی جایگزینی ۱۰۰٪ NA با RCA بر روی مقاومت خمشی بتن گزارش شده است [۱۱]. از نتایج این آزمایش می‌توان این‌گونه نتیجه گرفت که ترکیب NA و RCA به اندازه‌های مساوی بهترین ترکیب جهت



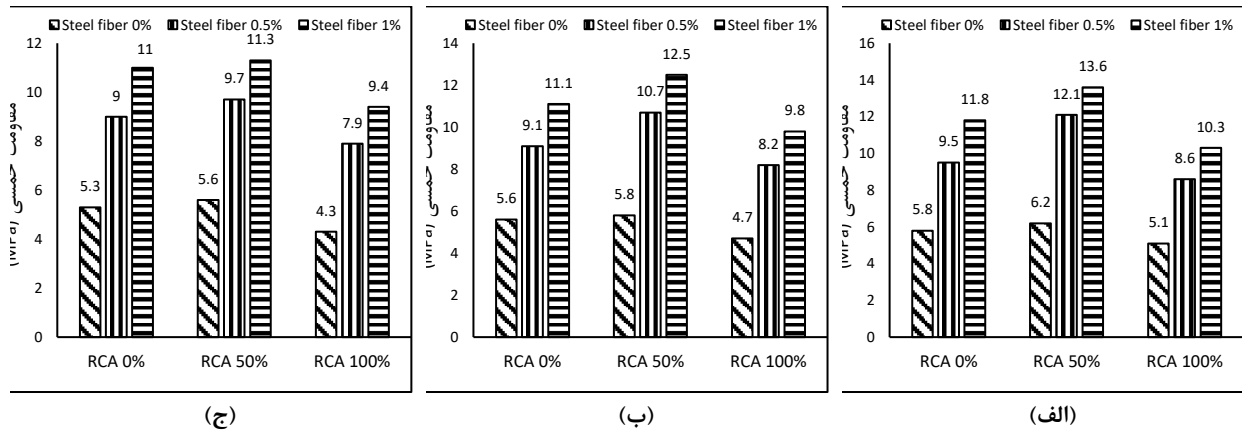
شکل ۹. دوختگی ترک خمشی توسط الیاف‌های فولادی در آزمایش خمش
Fig. 9. Bridging-action of fibers across the flexural cracks in flexural strength test

الیاف در طرح اختلاط‌های حاوی RCA موجب افزایش $6/6\%$ و $10/4\%$ مقاومت خمشی نسبت به نمونه R100-G0-F0 شده است. تأثیر قابل توجه الیاف فولادی در افزایش مقاومت خمشی تیرها می‌تواند به علت مقاومت کششی و مدول الاستیسیته بالای این الیاف باشد [۵۶]. تحقیقات انجام شده توسط Carnerio و همکاران [۵۵] نشان‌دهنده‌ی افزایش 36% مقاومت خمشی نمونه‌های ساخته شده با RCA و حاوی $0/75\%$ الیاف‌های فولادی بود. Ponikiewski و همکاران [۵۷] در مورد اثرات الیاف‌های فولادی با طول‌های مختلف (۳۰ mm و ۵۰ mm) بر روی عملکرد خمشی تیرهای بتنی تحقیق کردند، آنها نتیجه گرفتند الیاف‌های با طول بلندتر به صورت مسطح در بتن پخش می‌شوند، در حالی که الیاف‌های با طول کوتاه‌تر دارای جهت‌گیری سه بعدی در بتن هستند. همچنین نتیجه گرفته شد که هرچقدر طول الیاف‌های فولادی بلندتر باشد، تأثیرشان در افزایش مقاومت خمشی بیشتر خواهد بود [۵۸]. در نمودارهای شکل ۱۰ نتایج آزمایش مقاومت خمشی نشان داده شده است. افزایش مقاومت خمشی در طرح اختلاط‌های حاوی ترکیب NA و RCA و همچنین تأثیر قابل توجه الیاف فولادی در افزایش مقاومت خمشی در این نمودارها نیز قابل مشاهده است.

۷- انتخاب طرح اختلاط بهینه

با استفاده از نتایج بدست آمده از آزمایشات و هزینه طرح اختلاط‌ها، یک روش بهینه‌یابی مورد مطالعه قرار گرفت، تا مناسب‌ترین طرح اختلاط از نظر خصوصیات مکانیکی و جنبه‌های

دست‌یابی به بیشترین مقاومت خمشی می‌باشد. از طرفی در نتایج این آزمایش شاهد آن بودیم که استفاده از GGBFS به عنوان جایگزین OPC موجب کاهش مقاومت خمشی می‌شود. با جایگزینی 15% و 30% OPC با این سرباره به ترتیب شاهد کاهش $3/3\%$ و $8/3\%$ مقاومت خمشی در طرح اختلاط‌های حاوی 100% NA بودیم. نکته قابل توجه آن بود که تأثیر منفی GGBFS بر روی مقاومت خمشی نمونه‌های حاوی RCA قابل توجه‌تر بوده است، به گونه‌ای که در طرح اختلاط‌های حاوی 100% RCA شاهد کاهش $7/8\%$ و $14/9\%$ مقاومت خمشی در ازای جایگزینی 15% و 30% OPC با GGBFS بودیم. این نتایج نشان‌دهنده‌ی آن است که بیشترین کاهش مقاومت خمشی در نمونه‌های حاوی ترکیب RCA و GGBFS رخ داده است، بنابراین استفاده همزمان از آن‌ها در جهت دست‌یابی به مقاومت خمشی مطلوب توصیه نمی‌شود. از طرفی شاهد آن بودیم که استفاده از الیاف‌های فولادی دو سر قلاب موجب افزایش قابل توجه مقاومت خمشی تیرهای بتنی شدند. افزودن $0/5\%$ و 1% حجمی الیاف فولادی در تمامی طرح اختلاط‌ها اعم از طرح اختلاط‌های حاوی NA و RCA و ترکیب آن‌ها موجب افزایش قابل توجه مقاومت خمشی شد. الیاف‌های فولادی با ایجاد دوختگی در ترک‌های خمشی از باز شدن آن‌ها جلوگیری کرده و موجب افزایش مقاومت خمشی تیرها شدند [۳۲]. در شکل ۹ دوختگی ترک‌های خمشی توسط الیاف‌های فولادی نشان داده شده است. افزودن $0/5\%$ و 1% الیاف فولادی در طرح اختلاط‌های حاوی NA به ترتیب موجب افزایش $65/9\%$ و $104/4\%$ مقاومت خمشی نسبت به نمونه R0-G0-F0 و افزودن همین مقدار



شکل ۱۰. نتایج آزمایش مقاومت خمشی برای طرح اختلاط‌های حاوی (الف) ۰٪، (ب) ۱۵٪ و (ج) ۳۰٪ سرباره GGBFS.
 Fig. 10. The results of flexural strength test for mixtures containing (a) 0%, (b) 15%, and (c) 30% GGBFS

$\max f_j$ به ترتیب حداقل و حداکثر مقدار بین پاسخ‌های مربوط به معیار j^{th} می‌باشد. توان t_j پارامتر وزنی برای معیار j^{th} است. از آنجایی که معیارهای این تحقیق دارای اهمیت یکسانی می‌باشند، پارامتر وزنی برای تمامی آن‌ها مساوی ۱ در نظر گرفته شد [۶۲]. سپس، تابع مطلوبیت کلی (D) به عنوان تابع هدف مطابق با رابطه (۷) در نظر گرفته شد. در رابطه (۷) خصوصیات مکانیکی طرح اختلاط‌ها با هزینه‌ی مربوط به آن‌ها ترکیب شد.

$$D = (d_1 \times d_2 \times d_3 \times \dots \times d_m)^{\frac{1}{m}} \quad (7)$$

که در آن، m تعداد معیارها می‌باشد. از آنجایی که در این تحقیق معیارهای تصمیم‌گیری، خصوصیات مکانیکی (مقاومت فشاری، مقاومت کششی و مقاومت خمشی) و هزینه طرح اختلاط‌ها می‌باشد، $m = 4$ در نظر گرفته شد. هرچقدر مقدار تابع مطلوبیت کلی برای یک طرح اختلاط بیشتر باشد، نشان‌دهنده‌ی آن است که این طرح اختلاط مقاومت مکانیکی بیشتر و هزینه‌ی ساخت کمتری دارد. به جهت محاسبه‌ی تابع مطلوبیت کلی، تابع مطلوبیت برای معیارهای مقاومت فشاری، کششی و خمشی با استفاده از رابطه (۵) و برای معیار هزینه با استفاده از رابطه (۶) بدست آمد.

خصوصیات مکانیکی طرح اختلاط‌ها در بخش‌های قبلی مقاله محاسبه شدند. بنابراین، به محاسبه‌ی هزینه طرح اختلاط‌ها می‌پردازیم. هزینه مواد تشکیل دهنده‌ی طرح اختلاط‌ها در جدول ۴ نشان داده شده است. با توجه به هزینه هر جز، قیمت کلی هر طرح اختلاط برای

اقتصادی انتخاب گردد. یک روش بهینه‌یابی اساساً از یک تابع عملکرد برای تصمیم‌گیری تشکیل می‌شود. در این تابع متغیرهای مستقل و وابسته بر فرمولاسیون و نتیجه تصمیم نهایی تأثیر می‌گذارند [۵۹]. مواد تشکیل‌دهنده‌ی طرح اختلاط‌ها، متغیرهای مستقل می‌باشند، در حالی که خصوصیات مکانیکی و هزینه متغیرهای وابسته‌ای هستند که براساس متغیرهای مستقل تغییر می‌کنند. اگر فقط یک معیار وجود داشته باشد، حداکثر یا حداقل مقدار آن به راحتی تعیین می‌شود و نیازی به بهینه‌یابی نیست، اما از آنجایی که در این تحقیق معیارهای مقاومتی مختلفی همچون مقاومت فشاری، کششی، خمشی و همچنین معیار اقتصادی مد نظر است، بایستی بهترین طرح اختلاط‌ها با بیشترین مقاومت و کمترین هزینه از طریق بهینه‌یابی انتخاب شوند. از آنجایی که بهینه‌یابی معمولاً شامل تابع هدف است، در این تحقیق از یک روش بهینه‌یابی چند معیاره استفاده شده است که تابع مطلوبیت نامیده می‌شود [۶۰]. مقدار این تابع بین ۰ و ۱ می‌باشد. مقدار تابع مطلوبیت با استفاده از روابط (۵) و (۶) محاسبه شد [۶۱].

$$d_j = \left[\frac{Y_j - \min f_j}{\max f_j - \min f_j} \right]^{t_j} \quad (5)$$

$$d_j = \left[\frac{\max f_j - Y_j}{\max f_j - \min f_j} \right]^{t_j} \quad (6)$$

که در آن، d_j مقدار تابع مطلوبیت، Y_j پاسخ و $\min f_j$ و

جدول ۴. هزینه مواد (Euro/kg) [۶۳ و ۶۴]
Table 4. Material cost (Euro/kg)

سیمان (OPC)	GGBFS	آب	NA	RCA	الیاف فولادی	فوق‌روان‌کننده
۰/۱	۰/۰۳	۰/۰۱	۰/۰۲	۰/۰۴۷	۰/۸	۰/۸۲

جدول ۵. میزان مطلوبیت طرح اختلاطها
Table 5. Desirability function of the mix designs

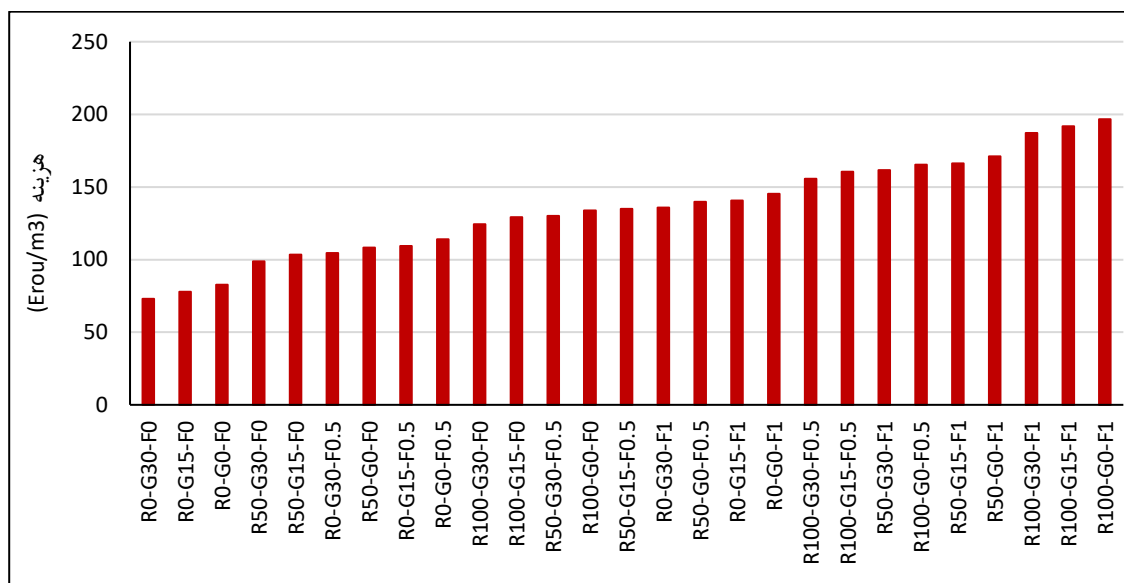
مطلوبیت کلی	مطلوبیت				طرح اختلاط
	هزینه	خمش	کشش	فشار	
۰/۳۵	۰/۹۲	۰/۱۵	۰/۱۲	۰/۸۶	R0-G0-F0
۰/۶۹	۰/۶۷	۰/۵۶	۰/۶۲	۱	R0-G0-F0.5
۰/۶۸	۰/۴۱	۰/۸	۰/۸۸	۰/۷۴	R0-G0-F1
۰/۳۱	۰/۹۶	۰/۱۳	۰/۱	۰/۷۱	R0-G15-F0
۰/۶۵	۰/۷۱	۰/۵۲	۰/۵۷	۰/۸۳	R0-G15-F0.5
۰/۶۳	۰/۴۵	۰/۷۳	۰/۸۱	۰/۵۸	R0-G15-F1
۰/۲۶	۱	۰/۱	۰/۰۸	۰/۶۱	R0-G30-F0
۰/۶	۰/۷۵	۰/۵۱	۰/۴۷	۰/۷۳	R0-G30-F0.5
۰/۶۱	۰/۴۹	۰/۷۲	۰/۷۹	۰/۵۱	R0-G30-F1
۰/۳۸	۰/۷۲	۰/۲	۰/۲۲	۰/۶۴	R50-G0-F0
۰/۶۶	۰/۴۶	۰/۸۴	۰/۷۱	۰/۶۸	R50-G0-F0.5
۰/۵۸	۰/۲۱	۱	۱	۰/۵۳	R50-G0-F1
۰/۳۱	۰/۷۵	۰/۱۵	۰/۲۱	۰/۴	R50-G15-F0
۰/۵۸	۰/۵	۰/۶۹	۰/۶۵	۰/۴۹	R50-G15-F0.5
۰/۴۹	۰/۲۵	۰/۸۸	۰/۹۶	۰/۲۸	R50-G15-F1
۰/۲۸	۰/۷۹	۰/۱۳	۰/۱۹	۰/۳۳	R50-G30-F0
۰/۵۴	۰/۵۴	۰/۵۸	۰/۶	۰/۴۴	R50-G30-F0.5
۰/۴۳	۰/۲۸	۰/۷۵	۰/۹۴	۰/۱۷	R50-G30-F1
۰/۱۹	۰/۵۱	۰/۰۸	۰/۰۸	۰/۴۴	R100-G0-F0
۰/۴۳	۰/۲۵	۰/۴۶	۰/۵۴	۰/۵۵	R100-G0-F0.5
۰	۰	۰/۶۴	۰/۸۱	۰/۲۶	R100-G0-F1
۰/۱۲	۰/۵۵	۰/۰۴	۰/۰۴	۰/۲۱	R100-G15-F0
۰/۳۹	۰/۲۹	۰/۴۱	۰/۵۳	۰/۳۶	R100-G15-F0.5
۰/۲۳	۰/۰۴	۰/۵۹	۰/۷۲	۰/۱۶	R100-G15-F1
۰	۰/۵۹	۰	۰	۰/۰۸	R100-G30-F0
۰/۳۲	۰/۳۳	۰/۳۸	۰/۴۴	۰/۱۹	R100-G30-F0.5
۰	۰/۰۸	۰/۵۴	۰/۶۴	۰	R100-G30-F1

یک مترمکعب بتن محاسبه شد. نتایج مربوط به هزینه‌ی هر یک مترمکعب بتن برای تمام طرح اختلاطها به ترتیب صعودی در نمودار شکل ۱۱ نشان داده شده است. نتایج این محاسبات نشان‌دهنده‌ی آن است که کمترین هزینه مربوط به طرح اختلاط حاوی ۱۰۰٪ NA، ۳۰٪ GGBFS و فاقد الیاف است (حدوداً 73 Euro/m^3). این در صورتی است که بیشترین هزینه مربوط به طرح اختلاط حاوی ۱۰۰٪ RCA، فاقد GGBFS و ۱٪ الیاف فولادی است (حدوداً 196 Euro/m^3). بنابراین، میزان تابع مطلوبیت مربوط به معیار هزینه برای طرح اختلاط R0-G30-F0 برابر با ۱ و برای طرح اختلاط R100-G0-F1 برابر صفر بدست آمد. این پارامتر برای مابقی طرح اختلاطها عددی بین ۰ و ۱ بدست آمد. هرچه میزان هزینه هر طرح اختلاط نسبت به طرح اختلاطهای دیگر کمتر باشد، این پارامتر به سمت ۱ میل می‌کند. تابع مطلوبیت کلی نیز مطابق با رابطه (۷) برای تمام طرح اختلاطها محاسبه و در جدول ۵ نشان داده شد. برای طرح اختلاطی که تابع مطلوبیت مربوط به حتی یک معیار برای آن صفر بدست آمده باشد، تابع مطلوبیت کلی آن نیز صفر خواهد شد [۶۲]. میزان مطلوبیت کلی طرح اختلاطها به ترتیب صعودی در نمودار شکل ۱۲ نشان داده شده است. تابع مطلوبیت کلی برای طرح اختلاطهای R100-G0-F1، R100-G30-F0 و R100-G30-F1 برابر صفر بدست آمد. این نتیجه بیان‌کننده‌ی آن است که استفاده از این طرح اختلاطها کمترین منفعت را بدنبال خواهد داشت. در بین طرح اختلاطهایی که بیشترین مقدار مطلوبیت کلی را به خود اختصاص داده‌اند، طرح اختلاطهای حاوی ۵۰٪ RCA و ۳۰٪ GGBFS به چشم می‌خورد. این نتیجه بیانگر آن است که جایگزینی ۵۰٪ NA با RCA و ۳۰٪ OPC با GGBFS و همچنین استفاده از الیاف فولادی می‌تواند منفعت به دنبال داشته باشد.

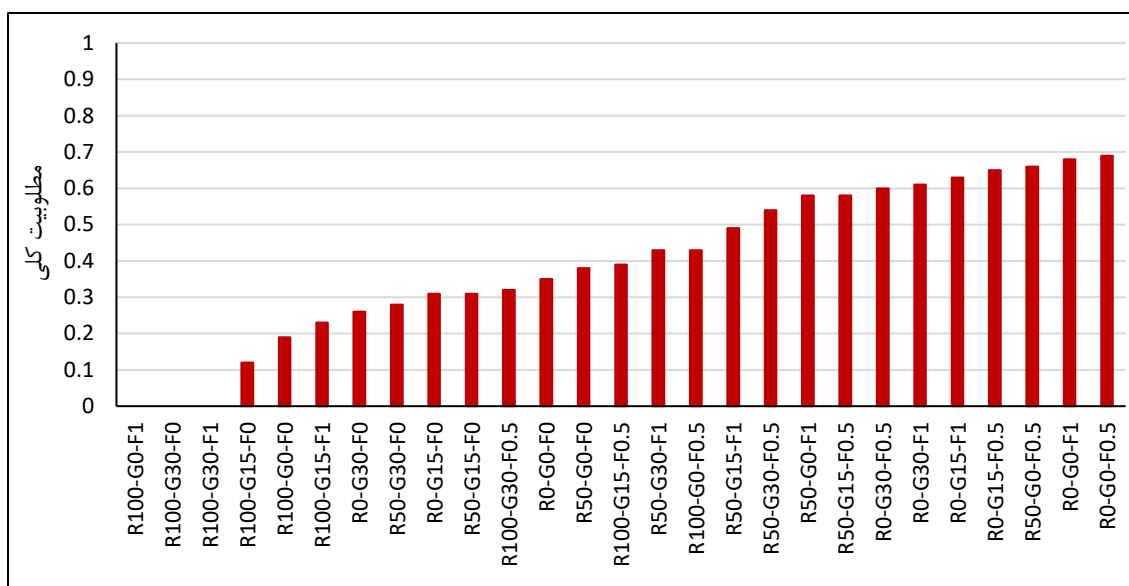
۸- نتیجه‌گیری

هدف اصلی در انجام این تحقیق، بررسی امکان بازیافت نخاله‌های بتنی و استفاده مجدد از آنها در ساخت بتن است. علاوه بر این، تأثیر

جایگزینی سیمان پرتلند معمولی (OPC) با سرباره کوره آهن‌گدازی (GGBFS) نیز بررسی شد. در راستای تحقق این اهداف، طرح اختلاطهایی با جایگزینی ۰٪، ۵۰٪ و ۱۰۰٪ سنگدانه‌های طبیعی (NA) با سنگدانه‌های بازیافت شده از نخاله‌های بتن (RCA) و جایگزینی ۰٪، ۱۵٪ و ۳۰٪ OPC با سرباره GGBFS مورد بررسی



شکل ۱۱. هزینه ساخت طرح اختلاطها به ترتیب صعودی
 Fig. 11. The cost of the mix designs production in ascending order



شکل ۱۲. میزان مطلوبیت کلی طرح اختلاطها به ترتیب صعودی
 Fig. 12. Desirability function of the mix designs in ascending order

کاست. علاوه بر این، نتایج آزمایش UPV نشان‌دهنده تأثیر منفی RCA بر روی کیفیت بتن بود، اما GGBFS با توجه به ساختار پرکنندگی خود موجب کاهش جذب آب و افزایش سرعت موج اولتراسونیک در بتن شد. افزودن الیاف فولادی به بتن نیز موجب افزایش جذب آب و کاهش کارایی شد. تأثیر الیاف فولادی در افزایش جذب آب و کاهش کارایی در طرح اختلاطهای حاوی RCA نسبت

قرار گرفت، علاوه بر این طرح اختلاطها با استفاده از ۰٪، ۵٪ و ۱۰٪ الیاف فولادی دو سر قلاب مسلح شدند. با انجام آزمایشات متنوعی همچون اسلامپ، UPV، جذب آب، مقاومت‌های فشاری، کششی و خمشی نتایج زیر بصورت خلاصه گرفته شد.

۱- استفاده از RCA در ساخت بتن موجب افزایش جذب آب و کاهش کارایی شد. جایگزینی OPC با GGBFS نیز از کارایی بتن

نتایج این تحقیق نشان داد که استفاده از RCA و GGBFS بر روی برخی خواص بتن تأثیر منفی جزئی دارد. با این حال، با توجه به آن که استفاده مجدد از نخاله‌های بتنی می‌تواند به حفظ منابع طبیعی و جلوگیری از انباشته شدن نخاله‌های بتنی کمک نماید، استفاده از RCA در ساخت بتن تا میزان ۵۰٪ توصیه می‌شود. از طرفی با توجه به آن که استفاده از GGBFS می‌تواند آلودگی ناشی از تولید OPC را کاهش دهد، استفاده از این سرباره به عنوان جایگزین OPC تا میزان ۳۰٪ توصیه می‌گردد. علاوه بر این، نتایج این تحقیق نشان داد که ضعف حاصل از استفاده RCA و GGBFS با افزودن الیاف فولادی قابل جبران است.

مراجع

- [1] C. Meyer, The greening of the concrete industry, *Cement Concr. Compos*, 31(8) (2009) 601–605.
- [2] J. Xiao, H. Xie, C. Zhang, Investigation on building waste and reclaim in Wenchuan earthquake disaster area, *Resour Conserv Recycl*, 61 (2012) 109–17.
- [3] E. Vazqnez, M. Bara, the influence of retained moisture in aggregates from recycling on the properties of new hardened concrete, *Waste management*, 16 (3) (1996) 113- 117.
- [4] N.D. Oikonomou, Recycled concrete aggregates, *Cem. Concr. Compos*, 27(2) (2005) 315–318.
- [5] H. Qasrawi, F. Shalabi, I. Asi, Use of low cao unprocessed steel slag in concrete as fine aggregate, *Construction and Building Material*, 23 (2009) 1118-1125.
- [6] A. Bouikni, R.N. Swamy, A. Bali, Durability properties of concrete containing 50% and 65% slag, *Construction and Building Material*, 23 (2009) 2836-2845.
- [7] N. Banthia, M. Sappakittipakom, Toughness enhancement in steel fiber reinforced concrete through fiber hybridization, *Cement and Concrete Research*, 39 (2007) 1366-1372.
- [8] Z. Deng, J. Li, Tension and impact behaviors of new type fiber reinforced concrete, *Cement Concrete Res*, 25(15) (2005) 189–204.
- [9] K. Aghae, M.A. Yazdi, D. Tsavdaridis, Investigation into the mechanical properties of structural lightweight

به طرح اختلاط‌های حاوی NA قابل توجه‌تر بود.

۲- نتایج آزمایش مقاومت فشاری نشان‌دهنده تأثیر منفی RCA و GGBFS بر روی مقاومت فشاری بتن بود. جایگزینی ۱۰٪ NA با RCA و ۳۰٪ OPC با GGBFS موجب کاهش مقاومت فشاری به ترتیب تا ۲۰/۱٪ و ۱۲٪ شد. نمونه‌های حاوی الیاف فولادی رفتار دوگانه‌ای را در آزمایش مقاومت فشاری از خود نشان دادند. به گونه‌ای که افزودن ۵/۰٪ و ۱٪ الیاف فولادی به ترتیب موجب افزایش و کاهش مقاومت فشاری شد. بنابراین، الیاف فولادی بایستی به اندازه‌ی مناسب در بتن مورد استفاده قرار گیرد و استفاده بیش از حد از آن موجب کاهش مقاومت فشاری می‌شود.

۳- استفاده از ترکیب NA و RCA موجب افزایش مقاومت کششی بتن شد. مطلوب‌ترین نتیجه در آزمایش مقاومت کششی در نمونه‌های ساخته شده با ترکیب مساوی NA و RCA بدست آمد. مقاومت کششی نمونه‌های حاوی GGBFS با نمونه‌های حاوی OPC تقریباً برابر بود. جایگزینی ۳۰٪ OPC با GGBFS موجب کاهش ۴/۳٪ مقاومت کششی شد، که با توجه به حذف مقدار قابل توجهی از OPC در بتن، این کاهش مقاومت قابل صرف‌نظر کردن است. افزودن الیاف فولادی نیز با ایجاد دوختگی در ترک‌های کششی به وجود آمده در بتن، موجب افزایش قابل توجه مقاومت کششی شد. استفاده از ۱٪ حجمی الیاف فولادی و ۵۰٪ از هرکدام از NA و RCA بیشترین مقاومت کششی را در بتن ایجاد نمود.

۴- نتایج آزمایش مقاومت خمشی نشان‌دهنده آن بود که استفاده از ترکیب NA و RCA نسبت به استفاده از هرکدام از آن‌ها به تنهایی مفیدتر است. نمونه‌های حاوی ۵۰٪ NA و ۵۰٪ RCA بهترین عملکرد خمشی را از خود نشان دادند. این در صورتی است که در نمونه‌های حاوی ۱۰۰٪ RCA شاهد کاهش مقاومت خمشی نسبت به نمونه‌های حاوی ۱۰۰٪ NA بودیم. استفاده از GGBFS نیز موجب کاهش مقاومت خمشی شد. کاهش مقاومت خمشی ایجاد شده در ازای جایگزینی OPC با GGBFS در طرح اختلاط‌های حاوی RCA نسبت به طرح اختلاط‌های حاوی NA قابل توجه‌تر بود. نمونه‌های فاقد الیاف اعم از نمونه‌های حاوی NA، RCA و ترکیب آن‌ها رفتار تردی را در آزمایش مقاومت خمشی از خود نشان دادند، در حالی که الیاف فولادی با ایجاد دوختگی در ترک‌های خمشی ایجاد شده در تیرها موجب افزایش قابل توجه مقاومت خمشی شد.

- self-compacting concrete incorporating recycle CFRP fiber with different and dosages, *Composite part B*, 112 (2017) 74-92.
- [20] ASTM C150 (2012). "Standard Specification for Portland Cement."
- [21] W.L. David, A.A. Andi, Durability assessment of alkali activated slag (AAS) concrete, *Mater. Struct.*, 45 (2012) 1425-1437.
- [22] M.D.J. Sanchez, P.A. Gutierrez, Study on the influence of attached mortar content on the properties of recycled concrete aggregate, *Construction and building materials*, 23 (2009) 872-877.
- [23] M. Pepe, R.D. Toledo Filho, E.A. Koenders, E. Martinelli, Alternative processing procedures for recycled aggregates in structural concrete, *Construction and Building Materials*, 69 (2014) 124-132.
- [24] ASTM C125-19, Standard Terminology Relating to Concrete and Concrete Aggregates, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2019.
- [25] ASTM C131 / C131M-14 (2006). "Standard Test Method for Resistance to Degradation of Small-Size Coarse Aggregate by Abrasion and Impact in the Los Angeles Machine."
- [26] ASTM C 143/C 143M-15a (2015). "Standard Test Method for Slump of Hydraulic-Cement Concrete."
- [27] ASTM C 642-13 (2013). "Standard Test Method for Density, Absorption, and Voids in Hardened Concrete."
- [28] ASTM C 39/C 39M-03 (2003). "Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens."
- [29] ASTM C 496/C 496M-11 (2011). "Standard Test Method for Splitting Tensile Strength of Cylindrical Concrete Specimens."
- [30] ASTM C1609 / C1609M-19 (2019). "Standard Test Method for Flexural Performance of Fiber-Reinforced Concrete (Using Beam with Third-Point Loading)."
- [31] K. Akhavan Kazemi, O. Eren, A.R. Rezaei, Some mechanical properties of normal and recycled aggregate concretes, *Scientia Iranica A*, 22(6) (2015) 1972-1980.
- [32] H. Sasanipour, F. Aslani, J. Taherinezhad, Effect of silica concrete reinforced with waste steel wires, *Mag. Concr. Res*, 67 (2014) 197-205.
- [10] A. Ajdukiewicz, A. Kliszczewicz, Influence of recycled aggregates on mechanical. Properties of HS/HPC, *Cement and Concrete Comp*, 24 (2002) 79-269.
- [11] V. Afroughsabet, L. Biolzi, T. Ozbakkaloglu, Influence of double hooked-end steel fibers and slag on mechanical and durability properties of high performance recycled aggregate concrete, *Composite Structures*, 181 (2017) 273-284.
- [12] V. Bindiganavile, N. Banthia, Polymer and steel fiber-reinforced cementitious composites under impact loading_Part 2: Flexural toughness, *ACI Materials Journal*, 98(1) (2001) 17-24.
- [13] S. Parviz, K. Atallah, J.W. Hsu, Mechanical properties of concrete materials reinforced with polypropylene or polyethylene fibers, *ACI Materials Journal*, 89(6) (1992) 535-540.
- [14] M. Batayneh, I. Marie, I. Asi, Use of selected waste material in concrete mixes, *Waste Management*, 27(12) (2007) 1870-1876.
- [15] K. Celik, M.D. Jackson, M. Mancio, C. Meral, A.H. Emwas, P.K.Mehta, P.J.M. Monteiro, High-volume natural volcanic pozzolan and limestone powder as partial replacements for Portland cement in self-compacting and sustainable concrete, *Cement and concrete composites*, 45 (2014) 136-147.
- [16] R. Yu, P. Spiesz, H.J.H. Brouwers, Development of an eco-friendly Ultra- High Performance Concrete (UHPC) with efficient cement and mineral admixtures uses, *Cement and Concrete Composites*, 55 (2015) 383-394.
- [17] H.T. Le, H.M. Ludwig, Effect of rice husk ash and other mineral admixtures on properties of self-compacting high performance concrete, *Materials & Design*, 89 (2016) 156 - 166.
- [18] M. Nehdi, J.D. Ladanchuk, Fiber synergy in fiber-reinforced self-consolidating concrete, *ACI Materials Journal*, 101(6) (2004) 508-517.
- [19] M. Mastali, A. Dalvand, A. Sattarifard, The impact resistance and mechanical properties of the reinforced

- performance of concrete with recycled aggregates from construction and demolition waste plants, *Construction and Building Materials*, 77 (2015) 357-369.
- [43] C. Frazão, A. Camões, J. Barros, D. Gonçalves, Durability of steel fiber reinforced self-compacting concrete, *Construction and Building Materials*, 80 (2015) 155–166.
- [44] A. Dalvand, F. Omidinasab, A. Sahraei Moghadam, Experimental investigation of fiber self-compacting cementitious composite with hybrid fibers in improving the behavior of concrete pavements, *Journal of Transportation Infrastructure Engineering*, 5(3) (2019) 89-100 (in Persian).
- [45] S.W. Tabsh, A.S. Abdelfatah, Influence of recycled concrete aggregates on strength properties of concrete, *Constr Build Mater*, 23 (2009) 1163–1167.
- [46] F.T. Olorunsogo, N. Padayachee, Performance of recycled aggregate concrete monitored by durability indexes, *Cem Concr Res*, 32 (2002) 179–185.
- [47] A. Ajdukiewicz, A. Kliszczewicz, Influence of recycled aggregates on mechanical properties of HS/HPC, *Cement Concrete Compos*, 24 (2002) 269–79.
- [48] Khaloo, E. Molaei Raisi, P. Hosseini, H. Tahsiri, Mechanical performance of self-compacting concrete reinforced with steel fibers, *J. Constr. Build. Mater*, 51 (2014) 179–186.
- [49] El-Dieb, Mechanical, durability and microstructural characteristics of ultrahigh- strength self-compacting concrete incorporating steel fibers, *J. Mater. Des*, 30 (2009) 4286–4292.
- [50] F. Aslani, S. Nejadi, Self-compacting concrete incorporating steel and polypropylene fibers: compressive and tensile strengths, moduli of elasticity and rupture, compressive stress–strain curve, and energy dissipated under compression, *J. Compos. B: Eng*, 53 (2013) 121–133.
- [51] Z.H. Duan, C.S. Poon, Properties of recycled aggregate concrete made with recycled aggregates with different amounts of old adhered mortars, *Materials & Design*, 58 (2014) 19-29.
- [52] S. Iqbal, A. Ali., K. Holschemacher, T.A. Bier, Mechanical properties of steel fiber reinforced high fume on durability of self-compacting concrete made with waste recycled concrete aggregates, *Construction and Building Materials*, 227 (2019) 116598.
- [33] Y. Hu, Z. Tang, W. Li, Y. Li, W.Y. Tam, Physical-mechanical properties of fly ash/GGBFS geopolymer composites with recycled aggregates, *Construction and Building Materials*, 226 (2019) 139-151.
- [34] H. Chao-Lung, B.L. Anh-Tuan, C. Chun-Tsun, Effect of rice husk ash on the strength and durability characteristics of concrete, *J. Constr. Build. Mater*, 25 (2011) 3768–3772.
- [35] R. Demirboga, I. Turkmen, M.B. Karako, Relationship between ultrasonic velocity and compressive strength for high-volume mineral-admixed concrete, *J. Cem. Concr. Res*, 34 (2004) 2329–2336.
- [36] M. Behera, S.K. Bhattacharyya, A.K. Minocha, R. Deoliya, S. Maiti, Recycled aggregate from C&D waste & its use in concrete—A breakthrough towards sustainability in construction sector: A review, *Constr. Build. Mater*, 68 (2014) 501–516.
- [37] M. Mansur, Ö. Çakır, An Investigation on Mechanical and Physical Properties of Recycled Coarse Aggregate (RCA) Concrete with GGBFS, *Int J Civ Eng*, 15(4) (2017) 549–563.
- [38] E.A. Whitehurst, Soniscope tests concrete structures, *Journal of the American Concrete Institute*, 47 (1951) 443-444.
- [39] M.E. Oliveira, C.S. Assis, A.W. Terni, Study on compressed stress, water absorption and modulus of elasticity of produced concrete made by recycled aggregate, In: *International RILEM Conference on the Use of recycled Materials and Structures*, (2008) 636- 642.
- [40] D. Matias, J.D. Brito, A. Rosa, D. Pedro, Durability of concrete with recycled coarse aggregates: influence of superplasticizers, *Journal of materials in civil engineering*, 26(7) (2014) 06014011.
- [41] J.R. Correia, J. De Brito, A.S. Pereira, Effects on concrete durability of using recycled ceramic aggregates, *Materials and Structures*, 39(2) (2006) 169-177.
- [42] M. Bravo, J. De Brito, J. Pontes, L. Evangelista, Durability

- Materials, 95 (2015) 296–311.
- [59] F. Bayramov, C. Tasdemir, M.A. Tasdemir, Optimization of fibre reinforced concretes by means of statistical response surface method, *Cement Concr Compos*, 26 (2004) 665–675.
- [60] W.F. Smith, *Experimental design for formulation*, American Statistical Association. (2005).
- [61] O. Sengul, M.A. Tasdemir, Compressive strength and rapid chloride permeability of concretes with ground fly ash and slag, *Mater Civ Eng*, 21 (2009) 494–501.
- [62] O. Sengul, Mechanical behavior of concretes containing waste steel fibers recovered from scrap tires, *Construct Build Mater*, 122 (2016) 649–58.
- [63] Z. Abdollahnejad, S. Mirlando, F. Pacheco-Torgal, J. Aguiar Barroso, Cost-efficient one-part alkali-activated mortars with low global warming potential for floor heating systems applications, *Eur J Environ Civ. Eng.*, 21 (2017) 412–429.
- [64] M. Mastali, Z. Abdollahnejad, F. Pacheco-Torgal, Carbon dioxide sequestration on fly ash/waste glass alkali-based mortars with recycled aggregates: compressive strength, hydration products, carbon footprint, and cost analysis, *Woodhead Publishing Series in Civil and Structural Engineering*, (2018) 299-348.
- strength lightweight self-compacting concrete (SHLSCC), *J. Constr. Build. Mater*, 98 (2015) 325–333.
- [53] A. Sahraei Moghadam, F. Omidinasab, A. Dalvand, Experimental investigation of (FRSC) cementitious composite functionally graded slabs under projectile and drop weight impacts, *Construction and Building Materials*, 237 (2020) 117522.
- [54] N. Banthia, J. Trottier, Concrete reinforced with deformed steel fibers, Part I: bond-slip mechanisms, *ACI Mater. J*, 91 (1994) 435–446.
- [55] J.A. Carneiro, P.R.L. Lima, M.B. Leite, R.D.T Filho, Compressive stress-strain behavior of steel fiber reinforced-recycled aggregate concrete, *Cement and Concrete Composites*, 46 (2014) 65-72.
- [56] M. Mastali, A. Dalvand, Use of silica fume and recycled steel fibers in self-compacting concrete, *construction and building materials*, 125 (2016) 196-209.
- [57] T. Ponikiewski, J. Gołaszewski, Properties of steel fibre reinforced self-compacting concrete for optimal rheological and mechanical properties in precast beams, *J. Procedia Eng*, 65 (2013) 290–295.
- [58] M. Mastali, M. Ghasemi Naghibdehi, M. Naghipour, S.M. Rabiee, Experimental assessment of functionally graded reinforced concrete (FGRC) slabs under drop weight and projectile impacts, *Construction and Building*

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

A.H. Sahraei Moghadam, F. Omidinasab, S. Moazami Goodarz, *Assessment of Mechanical Properties of Environmentally Friendly Concrete with Emphasis on Selection of Optimal Mix Designs in Terms of Resistance and Economy*, *Amirkabir J. Civil Eng.*, 53(8) (2021) 3403-3422.

DOI: [10.22060/ceej.2020.17920.6712](https://doi.org/10.22060/ceej.2020.17920.6712)



