



انتخاب طرح اختلاط بهینه با استفاده همزمان از الیاف بازیافتی فولادی و سنگدانه‌های بازیافتی بتنی با تاکید بر مقاومت اولیه سنگدانه‌ها

امیرحسین صحرائی مقدم^۱، فریدون امیدوی نسب^{۲*}، مهدی ابدالی کیا^۲

۱- دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی نوشیروانی، بابل، ایران

۲- دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه لرستان، خرم آباد، ایران

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳۹۹/۰۷/۲۹

بازنگری: ۱۳۹۹/۱۱/۱۲

پذیرش: ۱۴۰۰/۰۳/۰۵

ارائه آنلاین: ۱۴۰۰/۰۳/۱۰

کلمات کلیدی:

بتن‌های بازیافتی

RCA

RSF

خصوصیات مکانیکی

بهینه‌یابی چند متغیره

خلاصه: در این تحقیق خصوصیات بتن‌های ساخته شده با سنگدانه‌های بازیافتی از نخاله‌های بتنی (Recycled steel fiber) و مسلح شده به الیاف‌های فولادی بازیافتی از لاستیک‌های خودرو (Natural aggregate) بررسی شد. در تولید سنگدانه‌های بازیافتی (RCA) از ۳ نوع نخاله بتنی با رده‌های مقاومتی اولیه ۲۰، ۴۰ و ۸۰ مگاپاسکال استفاده شد. نتایج آزمایش‌های مربوط به سنگدانه‌ها نشان داد که افزایش مقاومت اولیه RCA موجب افزایش چگالی و مقاومت سائیدگی و کاهش جذب آب و ملات چسبیده به سطح این سنگدانه‌ها می‌شود. در ساخت نمونه‌ها، RCA به میزان ۵۰، ۱۰۰ و ۱۵۰ درصد جایگزین سنگدانه‌های طبیعی شد. علاوه بر این، نمونه‌ها با استفاده از ۰/۵ و ۱ درصد حجمی RSF مسلح شدند. در مجموع بر روی ۲۱ طرح اختلاط آزمایش‌های متنوعی همچون اسلامپ، UPV، جذب آب، مقاومت فشاری، مقاومت کششی و مقاومت خمشی انجام شد. نتایج آزمایش‌ها بیان‌کننده آن بود که استفاده از RCA بر روانی، کیفیت و خصوصیات مکانیکی بتن تاثیر منفی دارد که با افزایش مقاومت اولیه RCA و همچنین استفاده از RSF می‌توان از این تاثیر منفی جلوگیری کرد. در نهایت با انجام آنالیز اقتصادی و بهینه‌یابی چند متغیره مشخص شد که استفاده از RSF و RCA با مقاومت اولیه ۴۰ و ۸۰ مگاپاسکال از لحاظ اقتصادی، مقاومتی، روانی و کیفیت توجیه‌پذیر است.

۱- مقدمه

مثبت استفاده از این سنگدانه‌ها را گزارش کرده‌اند. یکی از دلایل رفتار متغیر بتن‌های بازیافتی در تحقیقات پیشین می‌تواند مربوط به مقاومت اولیه RCA باشد. از این رو، یکی از متغیرهای مورد بحث در این تحقیق، مقاومت اولیه نخاله‌های بتنی مورد استفاده در تولید RCA می‌باشد. سالانه تعداد ۱ میلیارد حلقه لاستیک در سراسر جهان فرسوده می‌شود که تنها ۳۳٪ از آن‌ها بازیافت شده و باقی‌مانده آن‌ها سوزانده و یا در طبیعت رها می‌شود. سهم کشور ما در این آمار، روزانه ۷ میلیون حلقه لاستیک معادل ۲۰۰ هزار تن می‌باشد [۱]. یکی از مناطق جمع‌آوری لاستیک‌های فرسوده سوزانده شده در شکل ۱-ج نشان داده شده است. رهاسازی این لاستیک‌های فرسوده در طبیعت می‌تواند مشکلات زیست محیطی فراوانی را به دنبال داشته باشد که با بازیافت آن‌ها می‌توان از بروز این مشکلات جلوگیری به عمل آورد [۶]. از پودر این لاستیک‌ها می‌توان برای تولید لاستیک‌های نو و یا در تولید قیر استفاده کرد. در حالی که سیم موجود در لاستیک‌های فرسوده می‌تواند جایگزین بسیار مناسبی برای الیاف‌های

در شهر تهران روزانه بیش از ۴۲ هزار تن نخاله ساختمانی تولید می‌شود. این حجم از نخاله‌های ساختمانی تولیدی پیامدهای زیست محیطی نامطلوبی را به دنبال خواهد داشت [۱]. در شکل ۱-الف نمونه‌ای از مشکلات زیست محیطی ناشی از نخاله‌های ساختمانی در اطراف شهر خرم آباد نشان داده شده است. یکی از راهکارها برای مدیریت این گونه نخاله‌ها، بازیافت و استفاده مجدد از آن‌ها می‌باشد [۱]. بازیافت و استفاده مجدد از این نخاله‌ها به عنوان جایگزین سنگدانه‌های طبیعی (NA) می‌تواند به حفظ محیط زیست نیز کمک نماید [۲]. در شکل ۱-ب نمونه‌ای از مشکلات زیست محیطی ناشی از تخریب منابع طبیعی به جهت تولید NA در اطراف شهر خرم آباد نشان داده شده است. در تحقیقات پیشین هر دو نوع تاثیر کاهشی و افزایشی در مقاومت بتن در اثر استفاده از سنگدانه‌های بازیافتی (RCA) گزارش شده است [۳]. Chan و همکاران [۴] اثرات منفی استفاده از RCA و Sahraei Moghadam و همکاران [۵] اثرات

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



(ب)



(الف)



(ج)

شکل ۱. مشکلات زیست محیطی ناشی از (الف) نخاله‌های ساختمانی، (ب) تخریب منابع طبیعی و (ج) لاستیک‌های سوزانده شده.

Fig. 1. Environmental problems caused by: (a) C&D wastes, (b) destruction of natural resources, and (c) scrap tires

محققان در این تحقیق خصوصیات بتن‌های سازگار با محیط زیست را بررسی نمودند. در تولید RCA نخاله‌های بتنی با سه رده مقاومتی اولیه ۲۰، ۴۰ و ۸۰ مگاپاسکال بازیافت شدند. RCA به میزان ۰، ۵۰ و ۱۰۰ درصد جایگزین NA شد. علاوه بر این، RSF به میزان ۰، ۵/۰ و ۱۰ درصد حجم بتن مورد استفاده قرار گرفت. در کل نمونه‌های آزمایشگاهی این تحقیق از ۲۱ طرح اختلاط مختلف ساخته و آزمایشات متنوعی همچون اسلامپ، جذب آب، UPV، مقاومت فشاری، کششی و خمشی بر روی آن‌ها انجام شد. از نوآوری‌های این تحقیق نسبت به موارد مشابه پیشین می‌توان به بررسی اثر مقاومت اولیه RCA و همچنین RSF اشاره کرد. همچنین در این تحقیق با انجام آنالیز اقتصادی و بهینه‌یابی چند متغیره نسبت به معرفی طرح‌های اختلاط بهینه اقتصادی و مقاومتی اقدام شد.

فولادی صنعتی در تولید بتن‌های الیافی باشد [۷]. از طرفی تولید الیاف‌های فولادی صنعتی موجب تولید و تخریب منابع طبیعی می‌شود که جایگزینی آن‌ها با الیاف‌های فولادی بازیافتی (RSF) می‌تواند به حفظ منابع طبیعی و کاهش آلودگی‌های زیست محیطی کمک کند [۸]. از طرفی با توجه به آن که بتن تحت بارهای کششی و ضربه‌ای رفتار تردی را از خود نشان می‌دهد، استفاده از RSF علاوه بر کمک به محیط زیست می‌تواند به رفع این نقص بتن نیز کمک کند [۹]. از این رو یکی دیگر از متغیرهای مورد بحث در این تحقیق درصد RSF مورد استفاده در بتن می‌باشد. نتایج تحقیقات پیشین نشان می‌دهد که استفاده از RSF موجب کاهش کارایی و همگنی بتن می‌شود [۱۰]. این در حالی است که اکثر تحقیقات پیشین بهبود خصوصیات مکانیکی بتن در اثر استفاده از RSF را گزارش کرده‌اند [۱۱].

جدول ۱. طرح‌های اختلاط مورد استفاده در ساخت بتن‌های مادر.

Table 1. Mix proportions of parent concretes

مقاومت فشاری (MPa)	طرح اختلاط (kg/m ³)					عنوان
	فوق روان کننده	آب	درشت دانه	ریز دانه	سیمان	
۲۱/۴	۰	۲۰۵	۱۰۲۴	۸۱۳	۰	C20
۳۹/۶	۰	۲۰۵	۱۰۲۴	۶۵۲	۰	C40
۸۲/۳	۱۳/۷۵	۱۵۴	۱۱۰۰	۶۲۳	۴۰	C80

۲- پیشینه تحقیق

را در مقایسه با تیرهای طبیعی تحمل می‌کنند که با استفاده از الیاف فولادی می‌توان به جبران این کاهش مقاومت پرداخت. Mastali و همکاران [۱۸] خصوصیات مکانیکی بتن‌های حاوی ۰، ۵ و ۱ درصد RSF را بررسی نمودند. نتایج این تحقیق نشان دهنده‌ی تاثیر مثبت RSF در رفتار بتن بود که این تاثیر در آزمایش‌های مقاومت کششی، خمشی و ضربه‌ای قابل توجه‌تر بود. Martinelli و همکاران [۱۹] نتیجه گرفتند که برای کسب عملکردی مشابه بایستی الیاف‌های فولادی صنعتی را با مقدار بیشتری RSF جایگزین کرد در صورتی که Sengul [۲۰] خصوصیات مکانیکی مشابه بتن‌های حاوی الیاف فولادی صنعتی و RSF را گزارش کرد.

۳- برنامه آزمایشگاهی

۳-۱- بازیافت

سه نوع بتن مادر با رده‌های مقاومتی ۲۰، ۴۰ و ۸۰ مگاپاسکال برای بازیافت در نظر گرفته شد. سه طرح اختلاط نشان داده شده در جدول ۱ برای ساخت نمونه‌های مادر مورد استفاده قرار گرفت. ابتدا از هر کدام از طرح‌های اختلاط سه نمونه استوانه‌ای استاندارد ساخته و در سن ۲۸ روز آزمایش مقاومت فشاری مطابق با آیین‌نامه ASTM C39 [۲۱] بر روی آن‌ها انجام شد. میانگین مقاومت فشاری برای هر کدام از طرح‌های اختلاط در جدول ۱ نشان داده شده است. نتایج به دست آمده نشان دهنده‌ی تطابق خوب مقاومت فشاری نمونه‌ها با رده مقاومتی در نظر گرفته شده می‌باشد. پس از اطمینان از مقاومت فشاری طرح‌های اختلاط در نظر گرفته شده، اقدام به ساخت بتن‌های مادر شد. بتن‌های مادر ساخته شده در شکل ۲ نشان داده شده است. پس از گذشت ۹۰ روز اقدام به تخریب و بازیافت مجدد بتن‌های مادر شد. سنگ شکن مورد استفاده در بازیافت نخاله‌ها در شکل ۳ و سنگدانه‌های بازیافتی به دست آمده در شکل ۴ نشان داده شده است.

Revilla-Cuesta و همکاران [۱۲] مشخصات حالت‌های تازه و سخت شده بتن‌های حاوی ۱۰۰ درصد RCA درشت دانه و مقادیر مختلف RCA ریزدانه (۲۵، ۵۰، ۷۵ و ۱۰۰ درصد) را بررسی کردند. نتایج تحقیق آن‌ها نشان داد که افزایش میزان RCA ریزدانه موجب بهبود عملکرد بتن در حالت تازه و تضعیف آن در حالت سخت شده می‌شود. Ajdukiewicz و Kliszczewicz [۱۳] در نتایج تحقیق خود مقاومت فشاری مشابه بتن‌های حاوی NA و RCA را گزارش کردند. Yang [۱۴] تاثیر جایگزینی ۵۰ و ۱۰۰ درصد NA با RCA را بر جمع شدگی و مدول الاستیسیته بتن بررسی کرد. نتایج این بررسی نشان داد که استفاده از ۵۰ و ۱۰۰ درصد RCA به ترتیب موجب افزایش ۴ و ۸ درصدی جمع شدگی و کاهش ۸ و ۱۰ درصدی مدول الاستیسیته بتن می‌شود. Afroughsabet و همکاران [۱۵] در تولید بتن بازیافتی از دو نوع RCA شامل RCA تولیدی از نخاله‌های بتنی با مقاومت اولیه ۴۰ مگاپاسکال و RCA تولیدی از نخاله‌های بتنی با مقاومت اولیه ۸۰ مگاپاسکال استفاده کردند. نتایج این تحقیق نشان داد که استفاده از RCA با رده مقاومتی اولیه بالاتر می‌تواند موجب بهبود رفتار بتن‌های بازیافتی شود. Kumar و Prasad [۱۶] بتن‌های حاوی RCA را با استفاده از الیاف‌های شیشه و پلی پروپیلن مسلح کردند. نتایج این تحقیق نشان داد که استفاده از RCA موجب کاهش مقاومت فشاری بتن می‌شود که با کاربرد الیاف‌های مذکور می‌توان به جبران این ضعف پرداخت. این تحقیق عملکرد بهتر الیاف شیشه نسبت به الیاف پلی پروپیلن را گزارش کرد. Chaboki و همکاران [۱۷] به بررسی رفتار خمشی تیرهای حاوی ۰، ۵۰ و ۱۰۰ درصد سنگدانه بازیافتی و مسلح شده به ۰، ۱ و ۲ درصد الیاف فولادی پرداختند. نتایج این تحقیق بیانگر آن بود که تیرهای بازیافتی لنگر ترک خوردگی و لنگر نهایی کمتری



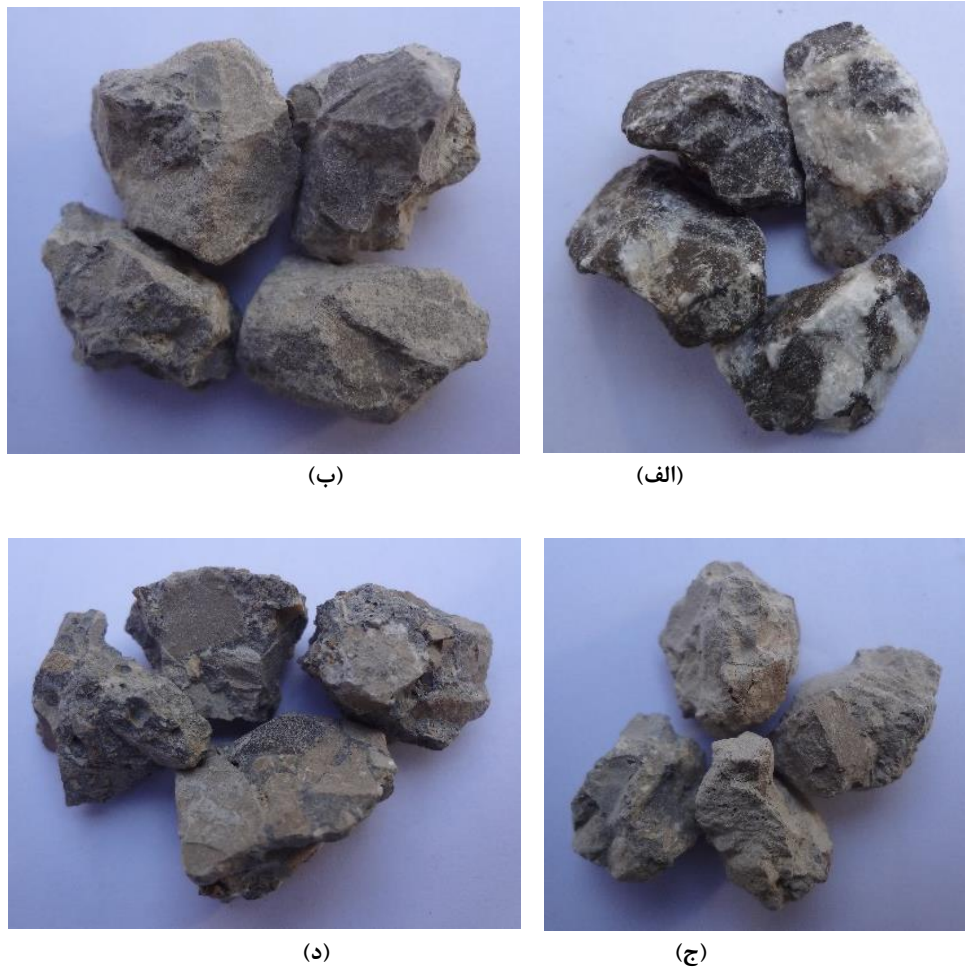
شکل ۲. بتن‌های مادر با رده‌های مقاومتی ۲۰، ۴۰ و ۸۰ مگاپاسکال.

Fig. 2. Parent concretes with initial strength of 20, 40, and 80 Mpa



شکل ۳. سنگ شکن مورد استفاده در بازیافت نخاله‌های بتنی.

Fig. 3. Crusher machine used in concrete wastes recycling



شکل ۴. الف) NA، ب) RCA با مقاومت اولیه ۲۰، ج) ۴۰ و د) ۸۰ مگاپاسکال.

Fig. 4. Aggregates: (a) NA, (b) RCA 20 MPa, (c) RCA 40 MPa, and (d) RCA 80 MPa

۳-۲- مصالح

بسیار زیادی در حال مصرف سوخت‌های فسیلی و تولید گازهای گلخانه‌ای هستند [۲۸]. تاثیرات نامطلوب ناشی از تولید الیاف فولادی صنعتی بر محیط زیست موجب توجه محققین به جایگزینی این الیاف با الیاف‌های سازگار با محیط زیست شده است [۲۹]. یکی از مناسب‌ترین جایگزین‌ها برای الیاف‌های فولادی صنعتی، الیاف‌های بازیافتی از لاستیک‌های فرسوده خودرو (RSF) می‌باشد [۳۰]. این الیاف‌ها دارای طول، قطر و در نتیجه نسبت ظاهری متفاوتی هستند [۳۱]. در تحقیقات گذشته تاثیر مثبت RSF بر خصوصیات مختلف بتن از جمله مقاومت فشاری [۳۲]، مقاومت کششی [۳۳]، شکل‌پذیری [۳۴]، مقاومت ضربه‌ای [۳۵] و دوام [۳۶] گزارش شده است. در این تحقیق به جهت مسلح کردن نمونه‌ها از RSF به اندازه‌ی ۰، ۰/۵ و ۱ درصد حجم بتن استفاده شد. تصویر مربوط به RSF مورد استفاده

سیمان: در این تحقیق از سیمان پرتلند نوع ۲ بر اساس ASTM C150 [۲۲] استفاده شد. وزن مخصوص و سطح مخصوص سیمان مصرفی به ترتیب $3/1 \text{ g/cm}^3$ و $3000 \text{ cm}^2/\text{g}$ می‌باشد. **الیاف:** استفاده از انواع الیاف در جهت تولید بتن مقاوم‌تر در دهه‌های اخیر به صورت گسترده و رو به رشدی مورد توجه محققین قرار گرفته است [۲۳-۲۵]. پرکاربردترین الیاف مورد استفاده در بتن، الیاف فولادی می‌باشد. نوع دو سر قلاب این الیاف به علت درگیری بیشتر با بتن بیشترین کاربرد را دارد [۲۶]. سالانه حدودا ۰/۳ میلیون تن الیاف فولادی در جهان به تولید می‌رسد که انتظار می‌رود این مقدار هر سال ۲۰ درصد افزایش یابد [۲۷]. بنابراین، برای تولید این الیاف در سرتاسر جهان صنایع فولادی

جدول ۲. خصوصیات RSF مورد استفاده.

Table 2. Properties of RSF

مقاومت کششی (MPa)	مدول الاستیسیته (GPa)	چگالی (ton/m ³)	قطر (mm)	طول (mm)	منبع	نوع الیاف
۱۱۰۰	۲۰۰	۷/۸۵	۰/۲-۰/۳	۳۰-۵۰	تایرهای فرسوده خودرو	فولادی بازیافتی



شکل ۵. RSF مورد استفاده.

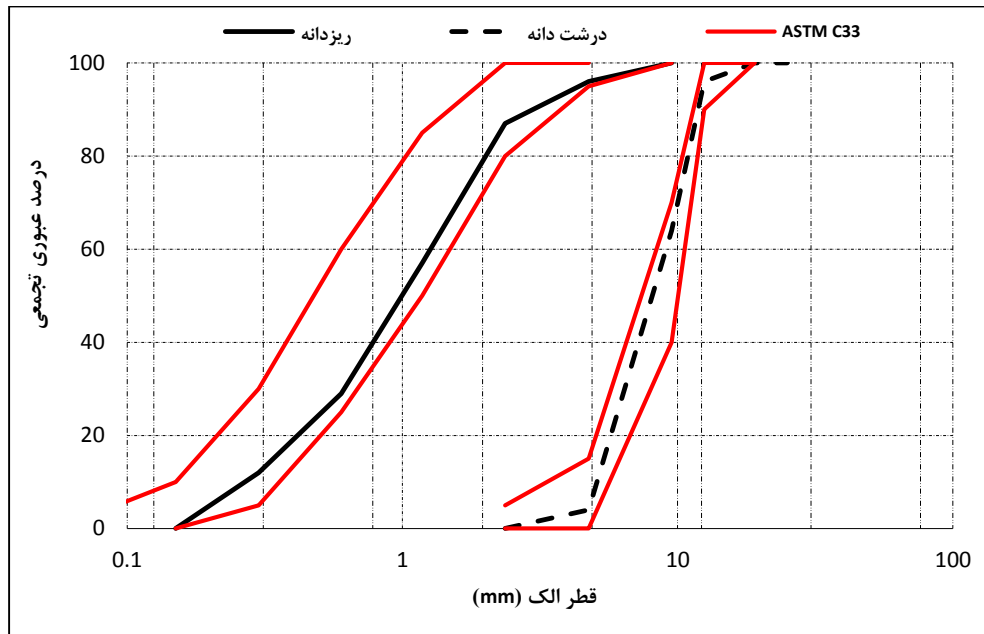
Fig. 5. Picture of RSF

طبیعی) و سه نوع RCA (سنگدانه بازیافتی از نخاله‌های بتنی) با مقاومت اولیه ۲۰، ۴۰ و ۸۰ مگاپاسکال استفاده شد. این سنگدانه‌ها با دانه‌بندی یکسانی تهیه شدند. نمودار دانه‌بندی این سنگدانه‌ها در شکل ۶ آمده است.

۳-۳- خصوصیات NA و RCA

سنگدانه‌ها از اصلی‌ترین قسمت‌های تشکیل دهنده‌ی بتن می‌باشند که خصوصیات آن‌ها نقش بسزایی در رفتار بتن دارد. چگالی و جذب آب دو پارامتر مهم در بررسی خصوصیات سنگدانه‌ها هستند. این دو پارامتر برای NA و RCA محاسبه شدند. NA دارای وزن مخصوص ۲/۶۶ و RCA با مقاومت‌های اولیه ۲۰، ۴۰ و ۸۰ مگاپاسکال به ترتیب دارای وزن مخصوص ۲/۴۹، ۲/۵۲ و ۲/۵۸ بودند. این نتایج نشان دهنده‌ی آن است

در شکل ۵ و خصوصیات مربوط به آن در جدول ۲ نشان داده شده است. این الیاف‌ها دارای خصوصیات ظاهری متفاوتی بودند. به جهت تعیین خصوصیات ظاهری این الیاف‌ها، اندازه‌گیری دقیقی بر روی ۲۰۰ عدد از آن‌ها انجام گرفت. این اندازه‌گیری‌ها نشان دهنده‌ی آن بود که بخش قابل توجهی از این الیاف‌ها دارای طولی بین ۳۰ تا ۵۰ میلی‌متر و قطری بین ۰/۲ تا ۰/۳ میلی‌متر هستند. (طول ۶ درصد از الیاف‌های اندازه‌گیری شده کمتر از ۱۰ میلی‌متر، ۱۲ درصد بین ۱۰ تا ۲۰ میلی‌متر، ۶۴ درصد بین ۳۰ تا ۵۰ میلی‌متر و ۱۸ درصد بیشتر از ۵۰ میلی‌متر بود و همچنین قطر ۷ درصد از الیاف‌های اندازه‌گیری شده کمتر از ۰/۱ میلی‌متر، ۱۴ درصد بین ۰/۱ و ۰/۲ میلی‌متر، ۵۹ درصد بین ۰/۲ تا ۰/۳ میلی‌متر و ۲۰ درصد بزرگتر از ۰/۳ میلی‌متر بود).
سنگدانه: ۴ نوع سنگدانه مختلف شامل یک نوع NA (سنگدانه

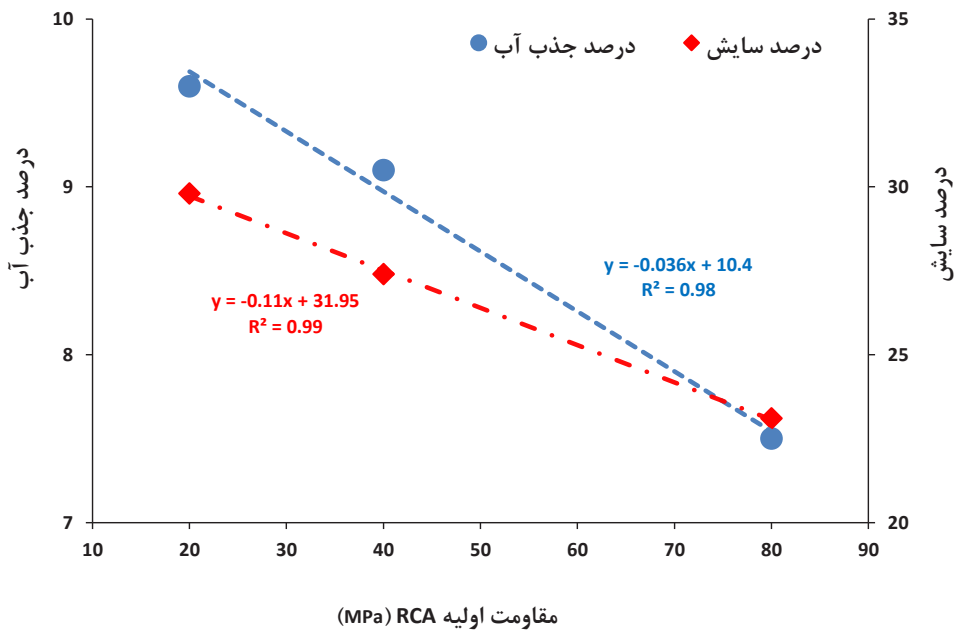


شکل ۶. منحنی دانه‌بندی سنگدانه‌ها.

Fig. 6. Particle size distribution curves for aggregates

مقاومتی اولیه RCA، درصد ملات چسبیده به سطح آن‌ها کاهش می‌یابد. Pepe و همکاران [۳۸] 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 [۳۹] محاسبه شد. میزان جذب آب برای NA، ۴/۳٪ و برای RCA با مقاومت اولیه ۲۰، ۴۰ و ۸۰ مگاپاسکال به ترتیب ۹/۶٪، ۹/۱٪ و ۷/۵٪ به دست آمد. افزایش جذب آب RCA نسبت به NA با توجه به ملات چسبیده به سطح این سنگدانه‌ها منطقی است. همچنین در این تحقیق با استفاده از دستگاه لس آنجلس مقاومت مصالح طبیعی و بازیافتی در مقابل سایش و ضربه تعیین و با هم مقایسه شد. این آزمایش بر اساس ASTM C131 [۴۰] انجام شد. میزان سائیدگی برای NA، ۲۲/۷٪ و برای RCA با مقاومت اولیه ۲۰، ۴۰ و ۸۰ مگاپاسکال به ترتیب ۲۹/۸٪، ۲۷/۴٪ و ۲۳/۱٪ به دست 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. البته توجه به این نکته بسیار حائز اهمیت است که با افزایش مقاومت اولیه RCA، مقاومت آن‌ها در مقابل سائیدگی به طور

که وزن مخصوص RCA کمتر از وزن مخصوص NA می‌باشد. علاوه بر این، با توجه به چگالی‌های به دست آمده برای RCA این نتیجه حاصل می‌شود که هر چه مقاومت اولیه RCA بیشتر باشد، وزن مخصوص آن‌ها نیز افزایش می‌یابد. وزن مخصوص RCA با مقاومت اولیه ۲۰، ۴۰ و ۸۰ مگاپاسکال به ترتیب ۶/۴٪، ۵/۳٪ و ۳٪ کمتر از چگالی NA به دست آمد. به جهت تعیین میزان ملات چسبیده به سطح RCA آیین‌نامه مشخصی وجود ندارد. چندین پیشنهاد برای به دست آوردن مقدار ملات چسبیده به سطح RCA وجود دارد که در این تحقیق از روش پیشنهادی Sanchez و Gutierrez [۳۷] استفاده شده است. بر مبنای این پیشنهاد نمونه‌ای از هر کدام از RCA به مدت ۲ ساعت در آب غوطه‌ور شدند. سپس به مدت ۲ ساعت در کوره با دمای ۵۰۰ خشک و سپس سریعاً در آب سرد قرار داده شدند. نمونه‌ها بعد از سرد شدن با استفاده از چکش لاستیکی به آرامی مالش داده شدند تا ملات چسبیده به سطح آن‌ها جدا شود. بعد از انجام مراحل فوق با گذراندن نمونه از الک شماره ۴ درصد وزنی ملات چسبیده به RCA با مقاومت اولیه ۲۰، ۴۰ و ۸۰ مگاپاسکال به ترتیب ۱۶، ۱۵ و ۱۲ درصد به دست آمد. بر اساس این نتایج می‌توان این گونه نتیجه گرفت که با افزایش رده



شکل ۷. رابطه میان مقاومت اولیه RCA و خصوصیات آن‌ها.

Fig. 7. Relationship between initial strength of RCAs and their properties

۴- روند آزمایش‌ها

۴-۱- اسلامپ

به منظور بررسی تاثیر RCA و RSF بر روی کارایی بتن، آزمایش اسلامپ بر اساس ASTM C143 [۴۱] انجام شد.

۴-۲- جذب آب

آزمایش جذب آب بر اساس ASTM C642 [۴۲] بر روی نمونه‌های مکعبی با ضلع ۱۰۰ mm به صورت جذب آب اولیه (نیم ساعته) و نهایی (۷۲ ساعته) انجام شد.

۴-۳- UPV

آزمایش سرعت موج اولتراسونیک (UPV) بر اساس BS 1881 [۴۳] بر روی نمونه‌های مکعبی با ضلع ۱۰۰ mm با روش مستقیم (قرار دادن مبدل در دو طرف نمونه بتنی) انجام شد. سرعت موج در این آزمایش از طریق رابطه (۱) محاسبه شد.

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

قابل ملاحظه‌ای افزایش می‌یابد. در شکل ۷ میان مقاومت اولیه RCA و خصوصیات آن‌ها تحلیل رگرسیون صورت گرفته است. با انجام این تحلیل مشخص شد که میان مقاومت اولیه این سنگدانه‌ها با جذب آب و سائیدگی آن‌ها رابطه‌ای خطی و معکوس وجود دارد، به طوری که هر چه میزان مقاومت اولیه RCA افزایش یابد، جذب آب و سائیدگی آن‌ها کاهش می‌یابد.

۳-۴- طرح‌های اختلاط

طرح‌های اختلاط مورد استفاده در ساخت نمونه‌های این تحقیق در جدول ۳ نشان داده شده است. متغیرهای این طرح‌های اختلاط شامل درصد جایگزینی NA با RCA (۰، ۵۰ و ۱۰۰ درصد)، مقاومت اولیه نخاله‌های بتنی مورد استفاده در تولید RCA (۲۰، ۴۰ و ۸۰ مگاپاسکال) و درصد RSF مورد استفاده (۰، ۵/۰ و ۱ درصد حجمی) می‌باشد. نحوه نام‌گذاری طرح‌های اختلاط به گونه‌ای است که عدد مقابل حرف R نشان دهنده‌ی درصد جایگزینی NA با RCA، عدد مقابل حرف C نشان دهنده‌ی رده مقاومتی نخاله‌های بتنی مورد استفاده در تولید RCA و عدد مقابل حرف F نشان دهنده‌ی مقدار RSF مورد استفاده می‌باشد.

جدول ۳. طرح‌های اختلاط مورد استفاده در ساخت نمونه‌ها.

Table 3. Mix proportions

شماره	عنوان طرح	سیمان (kg/m ³)	ریزدانه (kg/m ³)	درشت دانه (kg/m ³)			آب (kg/m ³)	الیاف بازیافتی (%)
				بازیافتی				
				طبیعی	۲۰ MPa	۴۰ MPa		
۱	R0-F0	۴۸۸	۶۵۲	۱۰۲۴	۰	۰	۲۰۵	۰
۲	R0-F0.5	۴۸۸	۶۵۲	۱۰۲۴	۰	۰	۲۰۵	۰/۵
۳	R0-F1	۴۸۸	۶۵۲	۱۰۲۴	۰	۰	۲۰۵	۱
۴	R50-C20-F0	۴۸۸	۶۵۲	۵۱۲	۴۸۰	۰	۲۰۵	۰
۵	R50-C20-F0.5	۴۸۸	۶۵۲	۵۱۲	۴۸۰	۰	۲۰۵	۰/۵
۶	R50-C20-F1	۴۸۸	۶۵۲	۵۱۲	۴۸۰	۰	۲۰۵	۱
۷	R100-C20-F0	۴۸۸	۶۵۲	۰	۹۶۰	۰	۲۰۵	۰
۸	R100-C20-F0.5	۴۸۸	۶۵۲	۰	۹۶۰	۰	۲۰۵	۰/۵
۹	R100-C20-F1	۴۸۸	۶۵۲	۰	۹۶۰	۰	۲۰۵	۱
۱۰	R50-C40-F0	۴۸۸	۶۵۲	۵۱۲	۰	۴۸۵	۲۰۵	۰
۱۱	R50-C40-F0.5	۴۸۸	۶۵۲	۵۱۲	۰	۴۸۵	۲۰۵	۰/۵
۱۲	R50-C40-F1	۴۸۸	۶۵۲	۵۱۲	۰	۴۸۵	۲۰۵	۱
۱۳	R100-C40-F0	۴۸۸	۶۵۲	۰	۰	۹۷۰	۲۰۵	۰
۱۴	R100-C40-F0.5	۴۸۸	۶۵۲	۰	۰	۹۷۰	۲۰۵	۰/۵
۱۵	R100-C40-F1	۴۸۸	۶۵۲	۰	۰	۹۷۰	۲۰۵	۱
۱۶	R50-C80-F0	۴۸۸	۶۵۲	۵۱۲	۰	۴۹۷	۲۰۵	۰
۱۷	R50-C80-F0.5	۴۸۸	۶۵۲	۵۱۲	۰	۴۹۷	۲۰۵	۰/۵
۱۸	R50-C80-F1	۴۸۸	۶۵۲	۵۱۲	۰	۴۹۷	۲۰۵	۱
۱۹	R100-C80-F0	۴۸۸	۶۵۲	۰	۰	۹۹۴	۲۰۵	۰
۲۰	R100-C80-F0.5	۴۸۸	۶۵۲	۰	۰	۹۹۴	۲۰۵	۰/۵
۲۱	R100-C80-F1	۴۸۸	۶۵۲	۰	۰	۹۹۴	۲۰۵	۱

۴-۵- کشش غیرمستقیم

آزمایش مقاومت کششی بر اساس ASTM C496 [۴۴] با سرعت بارگذاری ۰/۵ MPa/sec بر روی نمونه‌های استوانه‌ای با قطر ۱۰۰ و ارتفاع ۲۰۰ میلی‌متر انجام شد. مقاومت کششی نمونه‌ها بر اساس رابطه (۳) محاسبه شد.

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

که در آن، σ_t مقاومت کششی، P نیروی اعمال شده، D قطر و L طول نمونه استوانه‌ای می‌باشد.

۴-۶- خمش سه نقطه‌ای

آزمایش خمش سه نقطه‌ای (اعمال یک بار متمرکز در وسط دهانه) مطابق با ASTM C1609 [۴۵] بر روی تیرهای بتنی با طول ۳۲۰، عرض ۶۰ و ارتفاع

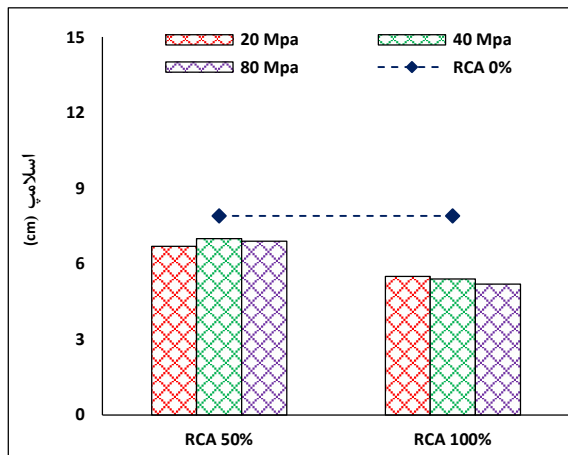
که در آن، V سرعت موج بر حسب km/sec، L فاصله بین دو مبدل برحسب mm و t زمان انتقال موج بر حسب μ sec می‌باشد.

۴-۴- فشار

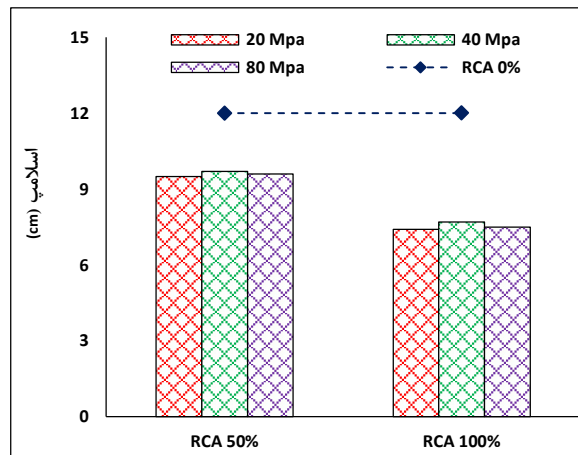
آزمایش مقاومت فشاری بر اساس ASTM C39 [۲۱] با سرعت بارگذاری ۰/۳ MPa/sec بر روی نمونه‌های مکعبی با ضلع ۱۰۰ میلی‌متر انجام شد. در این آزمایش از یک دستگاه آزمایش فشاری دیجیتال با ظرفیت ۱۰۰۰ کیلو نیوتن استفاده شد. مقاومت فشاری بر اساس رابطه (۲) محاسبه شد.

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

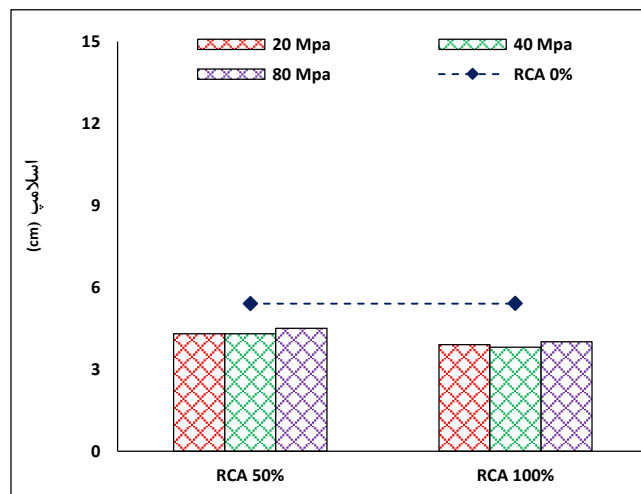
که در آن، σ_c مقاومت فشاری، P حداکثر نیروی فشاری تحمل شده توسط نمونه و A سطح مقطع نمونه می‌باشد.



(ب)



(الف)



(ج)

شکل ۸. نتایج آزمایش اسلامپ برای طرح‌های اختلاط حاوی (الف) ۰٪، (ب) ۰/۵٪ و (ج) ۱٪ RSF.

Fig. 8. Slump test results: (a) 0, (b) 0.5, and (c) 1% RSF

۵- بحث و نتایج

۵-۱- روانی

آزمایش اسلامپ بر روی ۲۱ طرح اختلاط مختلف که جزئیات آن‌ها در جدول ۳ آمده است، انجام شد. نتایج مربوط به این آزمایش در شکل ۸ نشان داده شده است. بیشترین میزان اسلامپ در این آزمایش متعلق به طرح اختلاط شاهد (حاوی ۱۰۰ درصد NA و فاقد RSF) می‌باشد. میزان اسلامپ برای این طرح اختلاط ۱۲ سانتی‌متر به دست آمد که نشان دهنده‌ی روانی مطلوب این طرح اختلاط می‌باشد. با مقایسه میزان اسلامپ طرح‌های

۸۰ میلی‌متر انجام شد. مقاومت خمشی تیرها بر اساس رابطه (۴) محاسبه شد.

$$\sigma_f = \frac{3FL}{2bd^2} \quad (4)$$

که در آن، σ_f مقاومت خمشی، F نیروی خمشی اعمال شده، L طول دهانه (۲۴۰ میلی‌متر)، b عرض و h ارتفاع تیر می‌باشد.

موجب افزایش تخلخل در بتن می‌شود که به همین دلیل افزایش جذب آب نمونه‌های حاوی این الیاف نیز منطقی است. نتایج مربوط به این آزمایش در شکل ۹ نشان داده شده است. در نمودارهای این شکل نیز افزایش جذب آب نمونه‌های حاوی RCA و RSF مشاهده می‌شود. میزان جذب آب اولیه و نهایی طرح اختلاط مرجع (نمونه فاقد RCA و RSF) به ترتیب ۲/۲ و ۳/۸ درصد به دست آمد. افزودن ۰/۵ و ۱ درصد RSF به این نمونه به ترتیب موجب افزایش جذب آب اولیه تا ۴/۱ و ۵/۲ درصد و افزایش جذب آب نهایی تا ۵/۳ و ۶/۱ درصد شد. این افزایش به ترتیب معادل ۸۶ و ۱۳۶ درصد برای جذب آب اولیه و ۴۰ و ۶۱ درصد برای جذب آب نهایی می‌باشد. این نتایج حاکی از آن است که تاثیر RSF در افزایش جذب آب اولیه در مقایسه با جذب آب نهایی قابل توجه‌تر می‌باشد. Mastali و همکاران [۱۸] نیز افزایش جذب آب بتن در اثر استفاده از RSF را گزارش کردند. RCA در مقایسه با RSF تاثیر کمتری در افزایش جذب آب نمونه‌ها دارد. جایگزینی ۵۰ درصد NA با RCA با مقاومت‌های اولیه ۲۰، ۴۰ و ۸۰ مگاپاسکال به ترتیب موجب افزایش ۱۷، ۱۱ و ۴ درصدی جذب آب اولیه و ۱۶، ۱۱ و ۳ درصدی جذب آب نهایی شده است. این افزایش برای جایگزینی ۱۰۰ درصدی NA با RCA برای جذب آب اولیه به ۲۴، ۱۷ و ۱۰ درصد و برای جذب آب نهایی به ۲۱، ۱۸ و ۱۶ درصد رسید. از این نتایج می‌توان این گونه برداشت کرد که با افزایش درصد جایگزینی NA با RCA جذب آب اولیه و نهایی بتن افزایش می‌یابد که با توجه به ساختار متخلخل و ملات چسبیده به سطح RCA منطقی است. این در صورتی است که با افزایش مقاومت اولیه RCA میزان تخلخل این سنگدانه‌ها کاهش و در نتیجه میزان جذب آب نمونه‌های حاوی آن‌ها تقلیل می‌یابد. در تحقیقات گذشته نیز افزایش ۱۴/۲٪ [۴۹]، ۱۷/۵٪ [۵۰]، ۱۹/۸٪ [۵۱]، ۶۲٪ [۵۲] و ۶۸/۹٪ [۵۳] جذب آب بتن در اثر جایگزینی NA با RCA گزارش شده است.

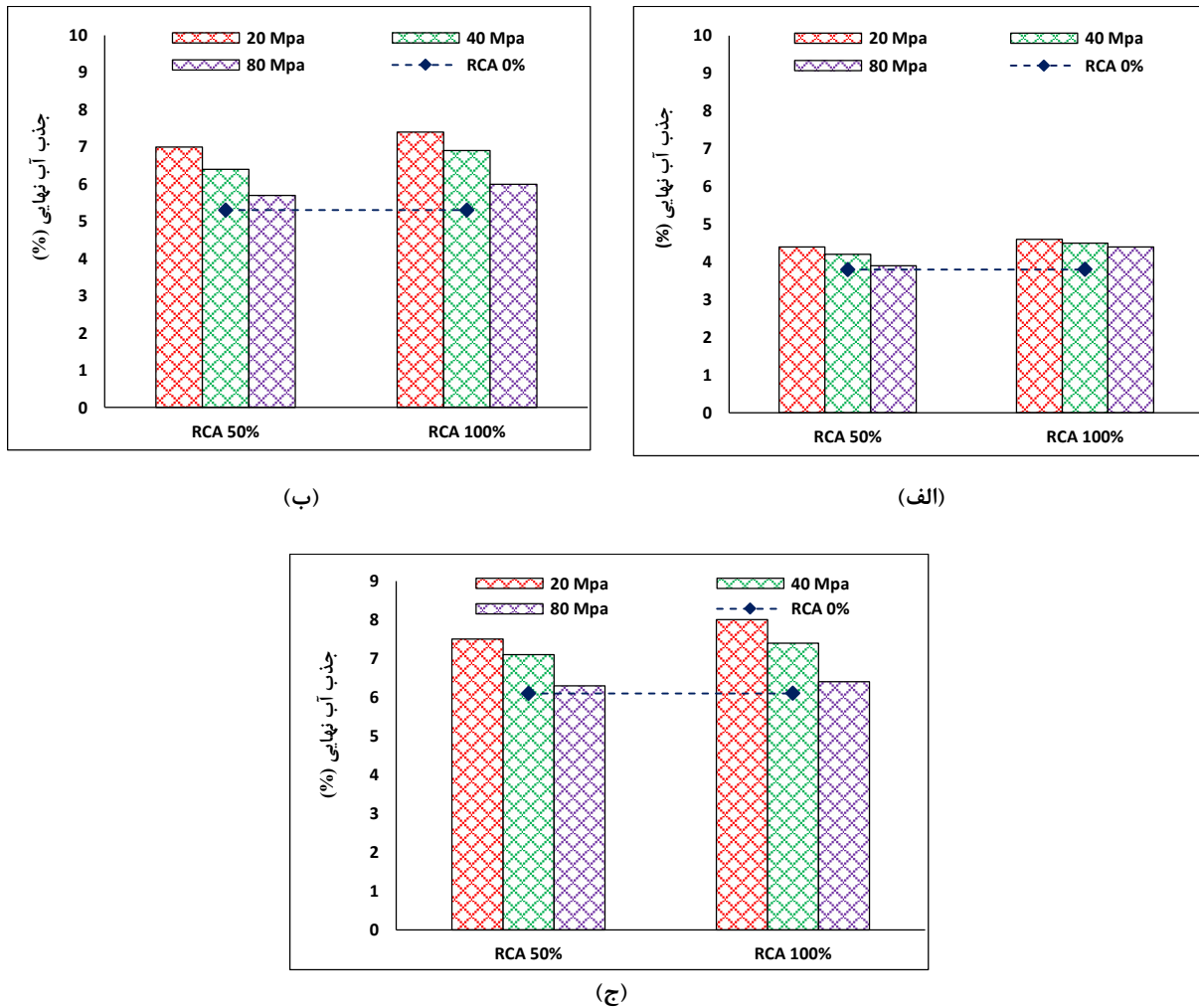
۵-۳-۳ UPV

آزمایش سرعت موج اولتراسونیک یکی از آزمایش‌های غیرمخرب بتن است که نتایج آن می‌تواند نشان دهنده‌ی کیفیت بتن باشد [۵۴]. همان طوری که در شکل ۱۰ نشان داده شده است، این آزمایش به روش مستقیم انجام شد. نتایج این آزمایش نشان دهنده‌ی تاثیر منفی RCA و RSF بر روی کیفیت بتن بود. نتایج این آزمایش در شکل ۱۱ نشان داده شده است. RCA به علت ساختار متخلخل خود موجب افزایش تخلخل در بتن و کاهش کیفیت آن شد. تحقیقات Mansur و همکاران [۵۱] نشان

اختلاط حاوی NA و RCA شاهد کاهش روانی طرح‌های اختلاط حاوی RCA در مقایسه با طرح‌های اختلاط حاوی NA بودیم. تاثیر منفی RCA بر روی روانی بتن به علت ملات چسبیده به سطح این سنگدانه‌ها می‌باشد، زیرا این موضوع باعث افزایش جذب آب RCA و در نتیجه کاهش روانی بتن می‌شود. Akhavan Kazemi و همکاران [۴۶] نشان دادند که RCA در مقایسه با NA بر روی روانی بتن تاثیر منفی دارد. در صورتی که Afroughsabet و همکاران [۱۵] و Sasanipour و همکاران [۴۷] نشان دادند که استفاده از RCA بر روی روانی بتن تاثیر منفی ندارد. از طرفی، با مقایسه طرح‌های اختلاط حاوی RCA با مقاومت اولیه متفاوت شاهد آن بودیم که تغییر در مقاومت اولیه نخاله‌های بتنی مورد استفاده در تولید RCA تاثیر معناداری بر روی روانی بتن‌های بازیافتی نخواهد داشت. جایگزینی ۵۰ و ۱۰۰ درصد NA با RCA با مقاومت اولیه ۲۰ مگاپاسکال موجب کاهش ۲۱ و ۳۸ درصدی روانی نسبت به طرح اختلاط شاهد شد. این در صورتی است که کاهش روانی ایجاد شده در اثر استفاده از ۵۰ و ۱۰۰ درصد RCA با مقاومت اولیه ۴۰ مگاپاسکال به ترتیب ۱۹ و ۳۶ درصد و کاهش روانی ایجاد شده در اثر استفاده از مقدار مشابه RCA با مقاومت اولیه ۸۰ مگاپاسکال به ترتیب ۲۰ و ۳۸ درصد به دست آمد. همان طوری که از نتایج مشخص است، استفاده از RCA با مقاومت‌های اولیه متفاوت تقریباً به اندازه‌ای ثابت روانی بتن را در مقایسه با طرح اختلاط شاهد کاهش داده است. از طرفی، RSF نیز موجب کاهش روانی بتن شد. این تاثیر منفی در تمام طرح‌های اختلاط اعم از طرح‌های اختلاط حاوی NA و طرح‌های اختلاط حاوی RCA مشاهده شد. افزودن ۰/۵ و ۱ درصد RSF به طرح اختلاط حاوی ۱۰۰ درصد NA به ترتیب موجب کاهش ۳۴ و ۵۵ درصدی روانی شد. افزودن همین مقدار RSF به طرح اختلاط حاوی ۱۰۰ درصد RCA با مقاومت‌های اولیه ۲۰، ۴۰ و ۸۰ مگاپاسکال به ترتیب موجب کاهش ۲۰ و ۴۰ درصدی، ۳۰ و ۵۰ درصدی و ۴۰ و ۸۰ درصدی روانی شد. در تحقیقات پیشین نیز تاثیر منفی RSF بر روانی بتن گزارش شده است [۴۸].

۵-۲ جذب آب

جذب آب نمونه‌های بتنی به صورت جذب آب نیم ساعته (اولیه) و ۷۲ ساعته (نهایی) محاسبه شد. RCA و RSF موجب افزایش جذب آب بتن شدند. این افزایش در هر دو پارامتر جذب آب اولیه و نهایی مشاهده شد. با توجه به آن که جذب آب RCA نسبت به NA بیشتر می‌باشد، افزایش جذب آب بتن‌های حاوی این سنگدانه منطقی است. از طرفی RSF نیز

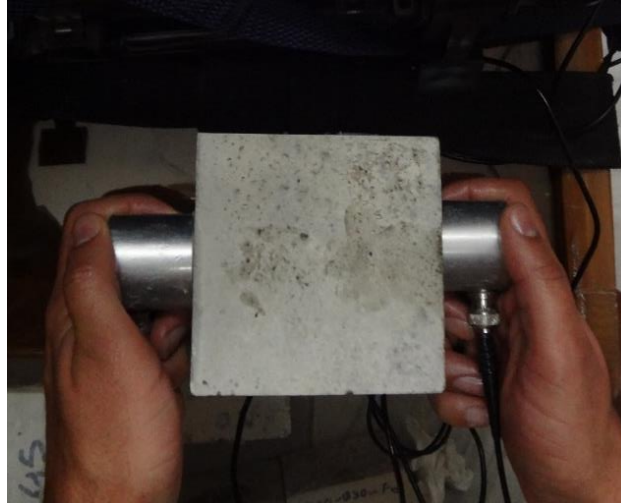


شکل ۹. نتایج آزمایش جذب آب برای طرح‌های اختلاط حاوی (الف) ۰٪، (ب) ۰/۵٪ و (ج) ۱٪ RSF.

Fig. 9. Water absorption test results: (a) 0, (b) 0.5, and (c) 1% RSF

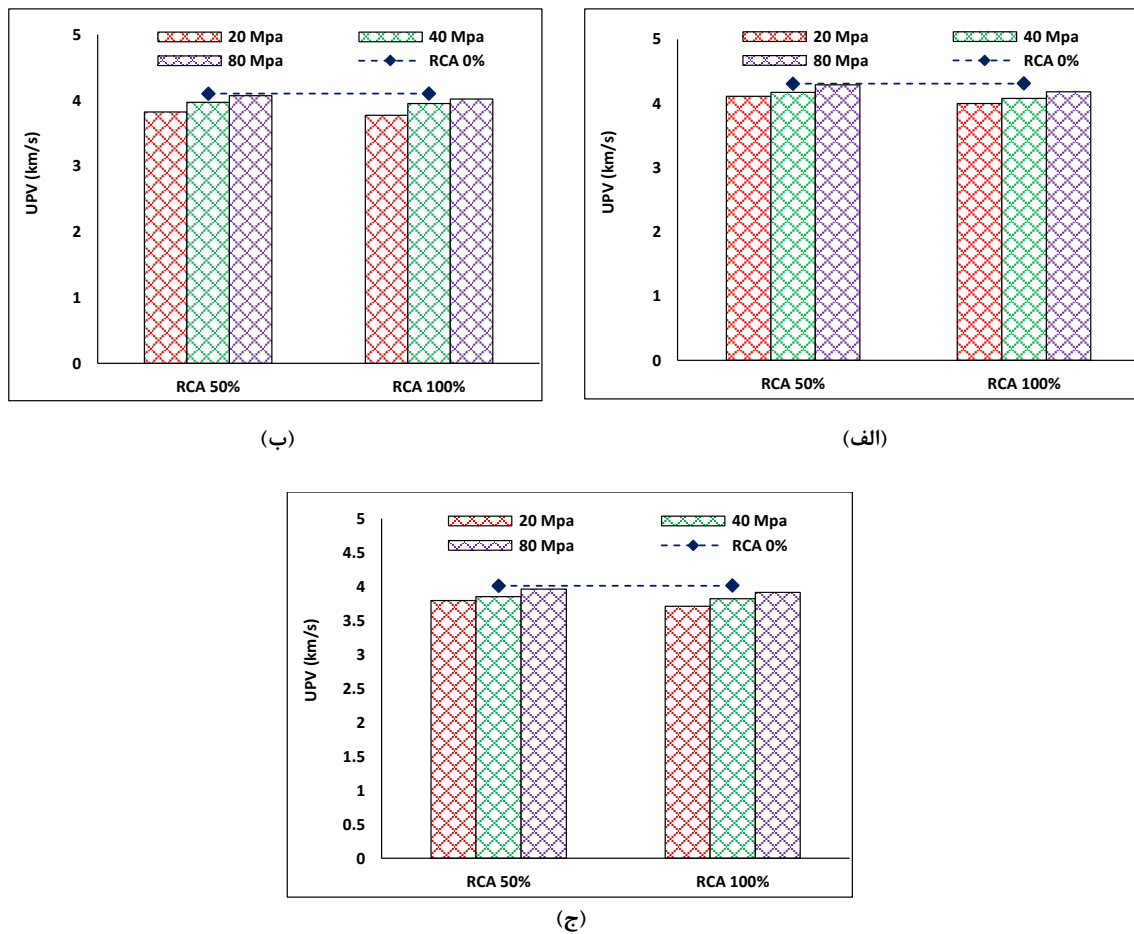
حاوی RCA و NA شاهد کاهش کیفیت بتن‌های حاوی RCA نسبت به بتن‌های حاوی NA بودیم. جایگزینی ۵۰ و ۱۰۰ درصد NA با RCA با مقاومت اولیه ۲۰ مگاپاسکال به ترتیب موجب کاهش UPV از ۴/۳۱ کیلومتر بر ثانیه تا ۴/۱۱ و ۴ کیلومتر بر ثانیه شد. از طرفی، با مقایسه UPV در بتن‌های حاوی RCA با مقاومت اولیه متفاوت شاهد آن بودیم که افزایش مقاومت اولیه نخاله‌های بتنی مورد استفاده در تولید RCA موجب افزایش کیفیت بتن‌های بازیافتی و در نتیجه افزایش UPV در این نوع

دهنده‌ی کاهش ۸، ۱۰ و ۱۲ درصدی UPV در ازای استفاده از ۲۵٪، ۵۰٪ و ۱۰۰٪ RCA بود. علاوه بر این، تحقیقات Sasanipour و همکاران [۴۷] نیز نشان داد که جایگزینی ۲۵، ۵۰، ۷۵ و ۱۰۰ درصد NA با RCA به ترتیب موجب کاهش ۵، ۶، ۹ و ۱۰ درصدی UPV می‌شود. در تحقیق حاضر، سرعت موج اولتراسونیک در بتن مرجع (حاوی ۱۰۰ درصد NA) و فاقد RSF برابر ۴/۳۱ کیلومتر بر ثانیه به دست آمد که نشان دهنده‌ی کیفیت بالای این بتن می‌باشد. با مقایسه سرعت موج اولتراسونیک در بتن‌های



شکل ۱۰. تصویری از نحوه انجام آزمایش UPV.

Fig. 10. The UPV Test



شکل ۱۱. نتایج آزمایش UPV برای طرح‌های اختلاط حاوی (الف) ۰٪، (ب) ۰/۵٪ و (ج) ۱٪ RSF.

Fig. 11. UPV test results: (a) 0, (b) 0.5, and (c) 1% RSF



شکل ۱۲. نمونه‌ها و دستگاه مورد استفاده در انجام آزمایش مقاومت فشاری.

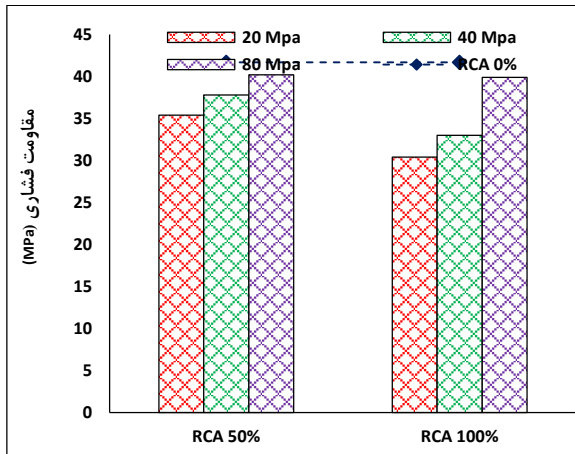
Fig. 12. Compression testing machine and specimens

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 می‌شود. مطابق با این رده‌بندی، کیفیت بتن‌های آزمایش شده در این تحقیق در محدوده خوب قرار دارد.

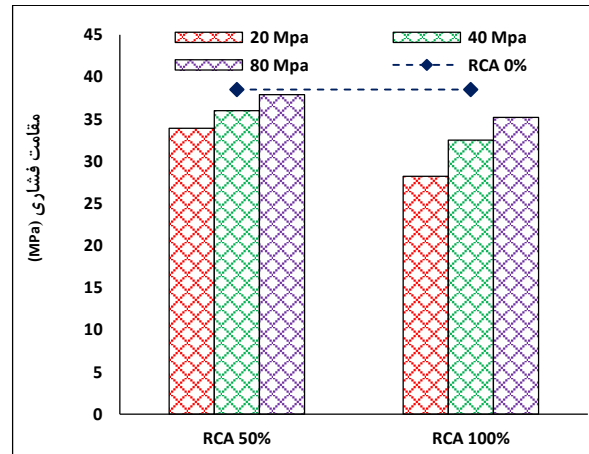
۴-۵- مقاومت فشاری

آزمایش مقاومت فشاری بر روی ۶۳ نمونه از ۲۱ طرح اختلاط مختلف انجام شد. تصویری از نمونه‌ها و دستگاه مورد استفاده در انجام آزمایش مقاومت فشاری در شکل ۱۲ نشان داده شده است. نتایج این آزمایش نیز در شکل ۱۳ نشان داده شد است. نتایج این آزمایش حاکی از آن بود که جایگزینی NA با RCA موجب کاهش مقاومت فشاری نمونه‌ها می‌شود. مقاومت فشاری طرح اختلاط مرجع (فاعد RCA و RSF) ۳۸/۵ مگاپاسکال به دست آمد. استفاده از ۵۰ و ۱۰۰ درصد RCA با مقاومت اولیه ۲۰ مگاپاسکال موجب کاهش مقاومت فشاری به ترتیب تا ۳۳/۹ و ۲۸/۲ مگاپاسکال شد. این در حالی است که استفاده از همین مقدار RCA با مقاومت اولیه ۴۰ مگاپاسکال موجب کاهش مقاومت فشاری تا ۳۶ و ۳۲/۵ مگاپاسکال و استفاده از همین مقدار RCA با مقاومت اولیه ۸۰ مگاپاسکال موجب کاهش مقاومت فشاری تا ۳۷/۹ و ۳۵/۲ مگاپاسکال شد. با بررسی این نتایج مشخص می‌شود که هر چه میزان استفاده از RCA افزایش یابد،

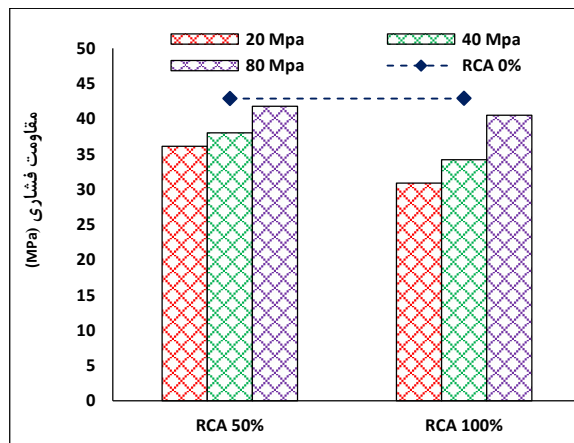
بتن‌ها می‌شود. افزایش مقاومت اولیه RCA از ۲۰ به ۴۰ مگاپاسکال موجب افزایش UPV از ۴ به ۴/۰۸ کیلومتر بر ثانیه و افزایش آن به ۸۰ مگاپاسکال موجب افزایش UPV تا ۴/۱۸ کیلومتر بر ثانیه شد. با توجه به آن که افزایش مقاومت اولیه RCA موجب کاهش تخلخل این سنگدانه‌ها می‌شود، افزایش UPV در این بتن‌ها منطقی می‌باشد. از طرفی، با بررسی و مقایسه UPV در بتن‌های غیر مسلح و مسلح شده به RSF شاهد کاهش کیفیت بتن‌های مسلح به RSF و در نتیجه کاهش UPV در این بتن‌ها بودیم. کاهش کیفیت بتن‌های حاوی RSF در تمام طرح‌های اختلاط اعم از طرح‌های اختلاط حاوی NA و طرح‌های اختلاط حاوی RCA مشاهده شد. افزودن ۱ درصد RSF در طرح اختلاط حاوی ۱۰۰ درصد NA موجب کاهش UPV از ۴/۳۱ کیلومتر بر ثانیه به ۴/۰۱ کیلومتر بر ثانیه و افزودن همین مقدار RSF به طرح‌های اختلاط حاوی ۱۰۰ درصد RCA با مقاومت‌های اولیه ۲۰، ۴۰ و ۸۰ مگاپاسکال موجب کاهش UPV به ترتیب تا ۳/۷۹، ۳/۸۵ و ۳/۹۶ کیلومتر بر ثانیه شد. Khaloo و همکاران [۵۵] در تحقیقات خود گزارش کردند که استفاده از RSF موجب کاهش UPV می‌شود که این کاهش تحت تاثیر حجم به کار رفته و طول این الیاف می‌باشد. مطابق با طبقه‌بندی ارائه شده توسط Whitehurst [۵۶] کیفیت بتن بر مبنای UPV در محدوده‌ی کمتر از ۲ km/sec خیلی ضعیف، بین ۲ km/sec



(ب)



(الف)



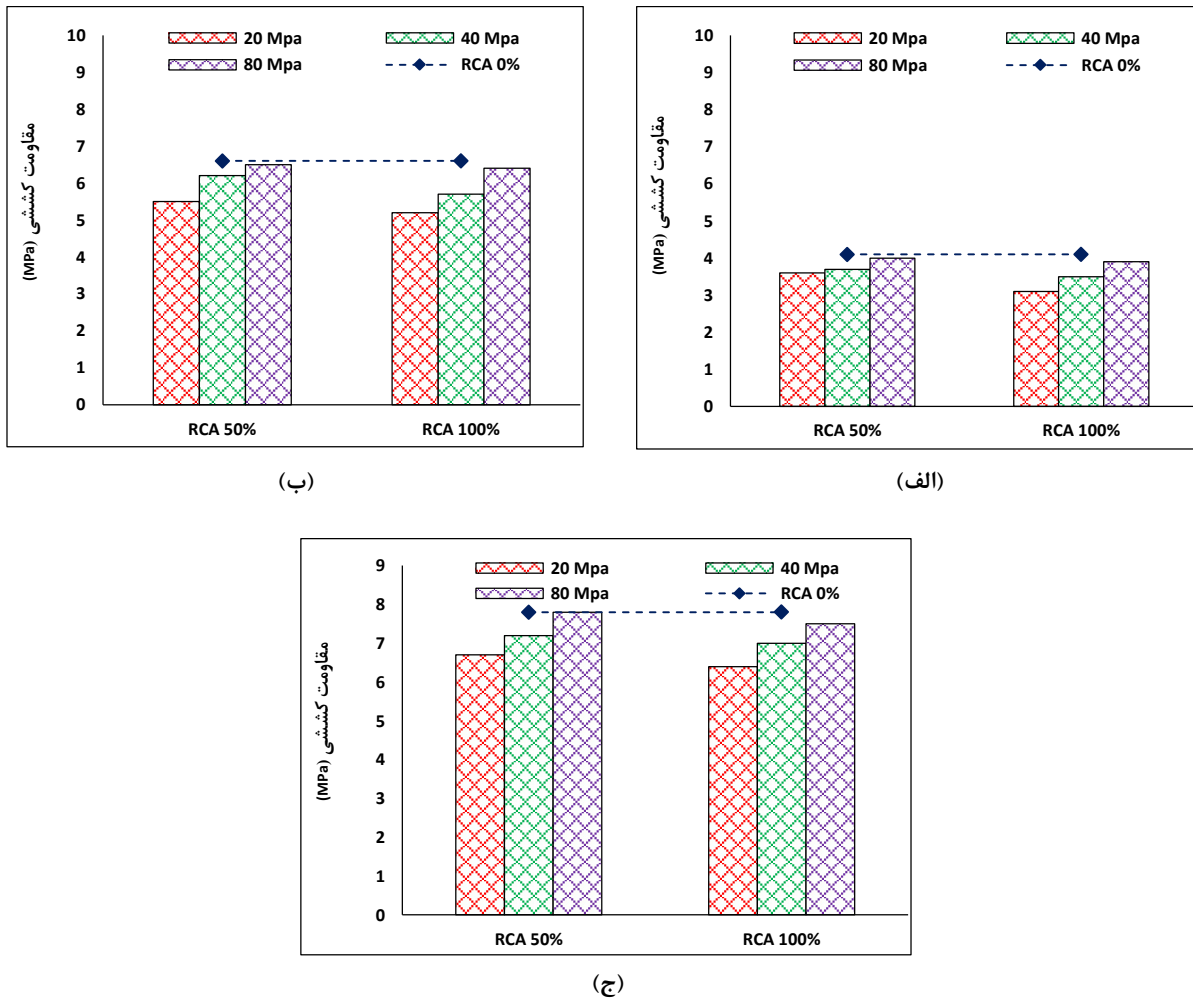
(ج)

شکل ۱۳. نتایج آزمایش مقاومت فشاری برای طرح‌های اختلاط حاوی (الف) ۰٪، (ب) ۰/۵٪ و (ج) ۱٪ RSF.

Fig. 13. Compressive strength test results: (a) 0, (b) 0.5, and (c) 1% RSF

مقاومت فشاری بتن به میزان بیشتری کاهش می‌یابد. علاوه بر این، نتایج به خوبی نشان دهنده آن است که افزایش مقاومت اولیه RCA می‌تواند از افت مقاومت بتن‌های بازیافتی تا حدودی جلوگیری نماید. به طوری که جایگزینی ۵۰ درصدی NA با RCA با مقاومت‌های اولیه ۲۰، ۴۰ و ۸۰ مگاپاسکال به ترتیب موجب کاهش ۱۲، ۷ و ۲ درصدی مقاومت فشاری نسبت به نمونه شاهد شد. این کاهش مقاومت برای جایگزینی ۱۰۰ درصدی به ترتیب تا ۲۷، ۱۶ و ۹ درصد رسید. این نتایج حاکی از اهمیت مقاومت اولیه RCA در رفتار بتن‌های بازیافتی می‌باشد. اکثر تحقیقات پیشین نیز کاهش

مقاومت فشاری بتن در اثر استفاده از RCA را گزارش کرده‌اند [۵۷]. با این حال، در برخی تحقیقات مقاومت فشاری برابر [۵۸] و حتی در برخی دیگر مقاومت فشاری بالاتر بتن‌های حاوی RCA در مقایسه با بتن‌های حاوی NA گزارش شده است [۵۹]. به نظر می‌رسد یکی از دلایل رفتار متغیر بتن‌های بازیافتی در گذشته تاثیر مقاومت اولیه RCA مورد استفاده می‌باشد. یکی دیگر از عوامل تاثیرگذار در نتایج آزمایش مقاومت فشاری این تحقیق RSF می‌باشد. استفاده از این الیاف‌ها نتوانست به طور قابل توجهی موجب افزایش مقاومت فشاری شود. استفاده از ۰/۵ و ۱ درصد RSF نتوانست



شکل ۱۴. نتایج آزمایش مقاومت کششی برای طرح‌های اختلاط حاوی (الف) ۰٪، (ب) ۰/۵٪ و (ج) ۱٪ RSF.

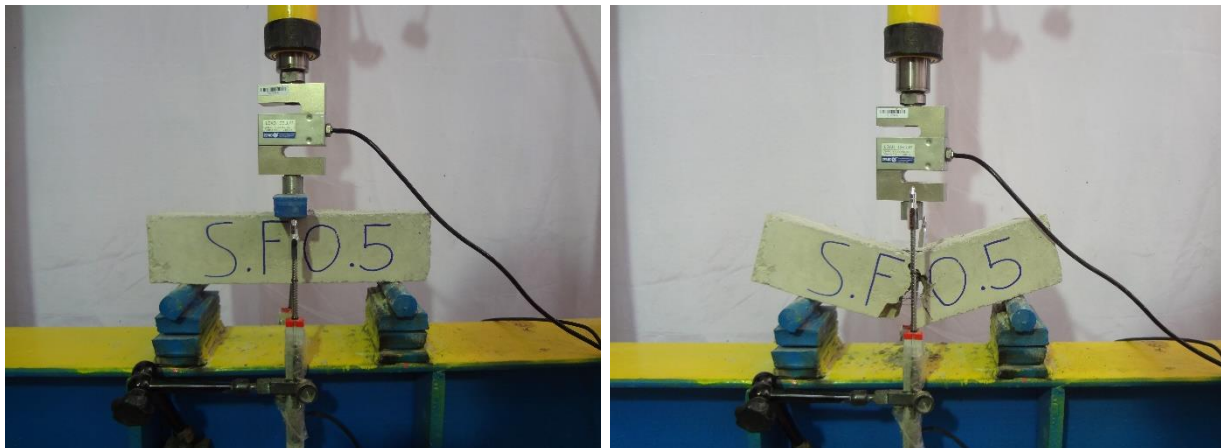
Fig. 14. Splitting tensile strength test results: (a) 0, (b) 0.5, and (c) 1% RSF

نیز تاثیر مثبت قابل توجهی از RSF بر روی مقاومت فشاری بتن گزارش نشده است. Krolo و همکاران [۶۰] در تحقیقات خود گزارش کردند که استفاده از ۰/۵ درصد RSF تاثیر قابل توجهی بر روی مقاومت فشاری بتن نداشته و تنها موجب افزایش آن از ۳۶/۷ به ۳۷/۴ مگاپاسکال شده است.

۵-۵- مقاومت کششی

این آزمایش به صورت آزمایش کشش غیرمستقیم (برزیلی) بر روی ۶۳ نمونه استوانه‌ای انجام و نتایج مربوط به آن در شکل ۱۴ نشان داده شده است. مشاهدات در انجام این آزمایش نشان داد که RSF می‌تواند

مقاومت فشاری نمونه‌های حاوی ۱۰۰ درصد NA را از ۳۸/۵ مگاپاسکال به ترتیب تا ۴۱/۷ و ۴۲/۹ مگاپاسکال برساند. این تاثیرات معادل ۸ و ۱۱ درصد مقاومت فشاری نمونه مرجع بود. تاثیر RSF در افزایش مقاومت فشاری نمونه‌های حاوی RCA نیز حداکثر ۱۳ درصد بود. استفاده از ۱ درصد از این الیاف در نمونه‌های حاوی ۱۰۰ درصد RCA با مقاومت اولیه ۲۰، ۴۰ و ۸۰ مگاپاسکال موجب افزایش مقاومت فشاری به ترتیب تا ۹/۶، ۵/۲ و ۱۳ درصد شد. بر اساس نتایج این آزمایش می‌توان این گونه نتیجه گرفت که استفاده از RSF در افزایش مقاومت فشاری نمونه‌های حاوی NA و RCA تاثیر مثبت دارد، در حالی که این تاثیر چندان قابل توجه نیست. در تحقیقات پیشین



شکل ۱۵. تصویری از نحوه انجام آزمایش مقاومت خمشی تیرها.

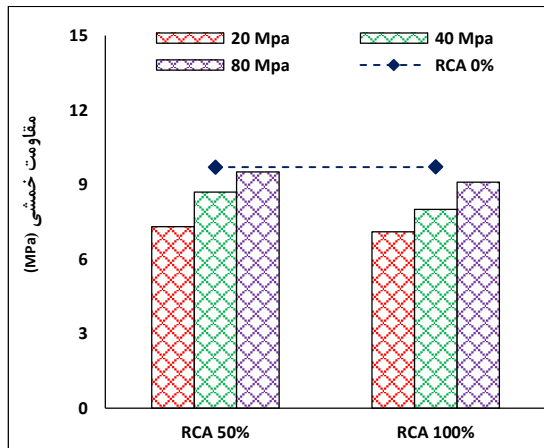
Fig. 15. Three-point bending test

با نمونه‌های حاوی NA بودیم. این تاثیر منفی با افزایش مقاومت اولیه RCA تقلیل یافت. جایگزینی ۵۰ و ۱۰۰ NA با RCA با مقاومت اولیه ۲۰ مگاپاسکال مقاومت کششی را نسبت به نمونه مرجع به ترتیب ۱۲ و ۲۳ درصد کاهش داد. این میزان کاهش برای مقادیر مشابه RCA با مقاومت اولیه ۴۰ مگاپاسکال به ترتیب تا ۱۰ و ۱۵ درصد و برای مقادیر مشابه RCA با مقاومت اولیه ۸۰ مگاپاسکال به ترتیب تا ۲ و ۵ درصد رسید. این نتایج نشان دهنده‌ی تاثیر مثبت افزایش مقاومت اولیه RCA بر روی مقاومت کششی بتن‌های بازیافتی می‌باشد. به طوری که مقاومت کششی نمونه‌های حاوی RCA با مقاومت اولیه ۸۰ مگاپاسکال تقریباً مشابه مقاومت کششی نمونه مرجع به دست آمد. در تحقیقات گذشته نیز نتایج مشابه‌ای حاصل شده است. Vagih و همکاران [۶۳] کاهش ۱۴ و ۲۳ درصدی مقاومت کششی بتن را در اثر جایگزینی ۵۰ و ۱۰۰ درصد NA با RCA گزارش کردند.

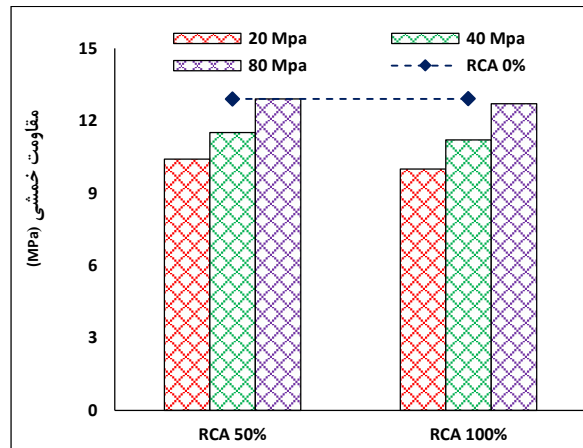
۵-۶- مقاومت خمشی

این آزمایش به صورت خمش سه نقطه‌ای بر روی ۶۳ عدد تیر بتنی انجام شد. تصویری از نحوه انجام این آزمایش در شکل ۱۵ و نتایج مربوط به آن در شکل ۱۶ نشان داده شده است. همانند آزمایش مقاومت کششی، در این آزمایش نیز تاثیر قابل توجه RSF در افزایش مقاومت خمشی مشاهده شد. این الیاف با ایجاد پیوستگی در دو طرف ترک خمشی ایجاد شده در ناحیه کششی تیر بتنی، مقاومت خمشی را به طور قابل توجهی افزایش داد. تاثیر قابل توجه RSF در افزایش مقاومت خمشی تمام تیرهای بتنی اعم از

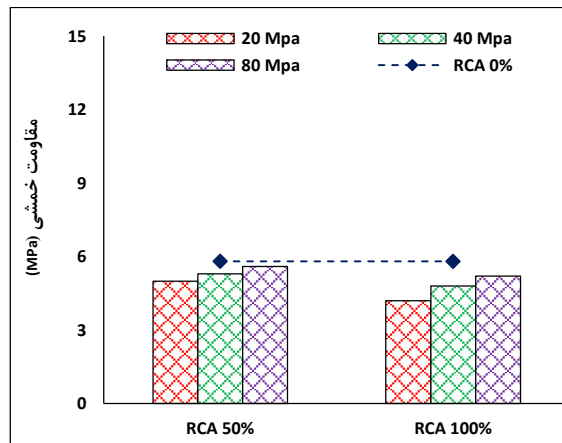
به صورت قابل توجهی مقاومت کششی نمونه‌های بتنی را افزایش دهد. RSF توانست با ایجاد پل بر روی ترک‌های کششی ایجاد شده در وسط نمونه بتنی از گسیختگی این نمونه‌ها جلوگیری به عمل آورد و از این طریق مقاومت کششی نمونه‌ها را به صورت قابل توجهی افزایش دهد. افزودن ۰/۵ و ۱ درصد RSF به طرح اختلاط مرجع (فاقد RCA و RSF) به ترتیب موجب افزایش مقاومت کششی نمونه از ۴/۱ مگاپاسکال تا ۶/۶ و ۷/۸ مگاپاسکال شد. این نتیجه بیانگر آن است که افزودن ۰/۵ و ۱ درصد RSF توانسته است به ترتیب ۶۱ و ۹۰ درصد مقاومت کششی نمونه بتنی را افزایش دهد. تاثیر قابل توجه RSF در نمونه‌های حاوی RCA با مقاومت‌های اولیه مختلف نیز مشاهده شد. ۰/۵ درصد از این الیاف توانست به ترتیب ۶۸، ۶۳ و ۶۴ درصد مقاومت کششی نمونه‌های حاوی ۱۰۰ درصد RCA با مقاومت‌های اولیه ۲۰، ۴۰ و ۸۰ مگاپاسکال را افزایش دهد. افزایش میزان RSF مورد استفاده به ۱ درصد توانست این تاثیر مثبت را به ترتیب تا ۱۰۷، ۱۰۰ و ۹۲ درصد برساند. بنابراین با افزایش میزان RSF شاهد افزایش مقاومت کششی در تمام نمونه‌های حاوی NA و RCA بودیم. نمودارهای نشان دهنده‌ی نتایج این آزمایش نیز بیانگر این واقعیت است. در تحقیقات متعددی در گذشته نیز از RSF به جهت افزایش مقاومت کششی بتن استفاده شده است که همگی آن‌ها تاثیر مثبت این الیاف را گزارش کرده‌اند [۶۲-۶۱]. در این آزمایش نیز همانند آزمایش مقاومت فشاری، شاهد کاهش مقاومت کششی نمونه‌های حاوی RCA در مقایسه



(ب)



(الف)



(ج)

شکل ۱۶. نتایج آزمایش مقاومت خمشی برای طرح‌های اختلاط حاوی (الف) ۰٪، (ب) ۰/۵٪ و (ج) ۱٪ RSF.

Fig. 16. Flexural strength test results: (a) 0, (b) 0.5, and (c) 1% RSF

دهد. این در صورتی است که همین مقدار RSF مقاومت خمشی تیرهای حاوی ۱۰۰ درصد RCA با مقاومت اولیه ۴۰ مگاپاسکال را ۶۷ و ۱۳۳ درصد و مقاومت خمشی تیرهای حاوی ۱۰۰ درصد RCA با مقاومت اولیه ۸۰ مگاپاسکال را ۷۵ و ۱۴۴ درصد افزایش داد. Martinelli و همکاران [۱۹] نیز با کاربرد RSF در تیرهای بتنی و انجام آزمایش خمش، تاثیر مثبت RSF بر مقاومت خمشی را گزارش کردند. اما برخلاف تاثیر مثبت RSF، استفاده از RCA موجب کاهش مقاومت خمشی تیرهای بتنی شد. با افزایش درصد جایگزینی NA با RCA شاهد کاهش شدیدتر مقاومت خمشی

تیرهای حاوی NA و RCA مشاهده شد. مقاومت خمشی تیر بتنی مرجع (فقدان RCA و RSF) برابر با ۵/۸ مگاپاسکال به دست آمد که افزودن ۰/۵ و ۱ درصد RSF توانست آن را به ترتیب تا ۹/۷ و ۱۲/۹ مگاپاسکال افزایش دهد. این نتایج نشان دهنده آن است که ۰/۵ و ۱ درصد RSF می‌تواند به ترتیب ۶۷ و ۱۲۲ درصد مقاومت خمشی تیرهای بتنی ساخته شده با NA را افزایش دهد. تاثیر مثبت RSF در افزایش مقاومت خمشی تیرهای بازیافتی نیز مشاهده شد. ۰/۵ و ۱ درصد RSF توانست تیر بتنی حاوی ۱۰۰ درصد RCA با مقاومت اولیه ۲۰ مگاپاسکال را به ترتیب ۶۸ و ۱۳۸ درصد افزایش

شده است که تابع مطلوبیت نامیده می‌شود [۶۶]. مقدار این تابع بین ۰ و ۱ می‌باشد. مقدار تابع مطلوبیت با استفاده از روابط (۵) و (۶) محاسبه شد [۶۷].

$$d_j = \left[\frac{Y_j - \min f_j}{\max f_j - \min f_j} \right]^{t_j} \quad (۵)$$

$$d_j = \left[\frac{\max f_j - Y_j}{\max f_j - \min f_j} \right]^{t_j} \quad (۶)$$

که در آن، d_j مقدار تابع مطلوبیت، Y_j پاسخ و $\min f_j$ و $\max f_j$ 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 [۲۰]. تابع مطلوبیت برای معیارهایی مانند روانی، کیفیت، مقاومت فشاری، مقاومت کششی و مقاومت خمشی که حد بالای آن مطلوب می‌باشد، با استفاده از رابطه (۵) و برای معیارهایی مانند جذب آب و هزینه که حد پایین آن مطلوب می‌باشد، با استفاده از رابطه (۶) به دست آمد. سپس، تابع مطلوبیت کلی (D) به عنوان تابع هدف مطابق با رابطه (۷) در نظر گرفته شد.

$$D = (d_1 \times d_2 \times d_3 \times \dots \times d_m)^{\frac{1}{m}} \quad (۷)$$

که در آن، m تعداد معیارها می‌باشد. از آنجایی که در این تحقیق معیارهای تصمیم‌گیری شامل روانی، کیفیت، جذب آب، خصوصیات مکانیکی (مقاومت‌های فشاری، کششی و خمشی) و هزینه می‌باشد، $m = 7$ در نظر گرفته شد. هر چقدر مقدار تابع مطلوبیت کلی برای یک طرح اختلاط بیشتر باشد، نشان دهنده آن است که این طرح اختلاط روانی، کیفیت و مقاومت مکانیکی بیشتر و هزینه‌ی ساخت کمتری دارد. روانی، کیفیت، جذب آب و خصوصیات مکانیکی طرح‌های اختلاط در بخش‌های قبلی مقاله محاسبه شدند. بنابراین، به محاسبه‌ی هزینه طرح‌های اختلاط می‌پردازیم. هزینه مواد تشکیل دهنده‌ی طرح‌های اختلاط در جدول ۴ نشان داده شده است. با توجه به هزینه هر جزء، هزینه کلی هر طرح

تیرهای بتنی بودیم. این در صورتی است که هر چه مقاومت اولیه RCA مورد استفاده در ساخت تیرهای بتنی بازیافتی افزایش می‌یابد، کاهش مقاومت ناشی از RCA تقلیل می‌یابد. استفاده از ۵۰ درصد RCA با مقاومت اولیه ۲۰ مگاپاسکال موجب کاهش مقاومت خمشی از ۵/۸ مگاپاسکال در تیر بتنی مرجع تا ۵ مگاپاسکال شد. در صورتی که افزایش میزان استفاده از این نوع RCA به ۱۰۰ درصد موجب کاهش مقاومت خمشی تا ۴/۲ مگاپاسکال شد. این نتایج بدان معناست که استفاده از ۵۰ و ۱۰۰ درصد RCA با مقاومت اولیه ۲۰ مگاپاسکال به ترتیب موجب کاهش ۱۴ و ۲۷ درصدی مقاومت خمشی شده است. این در حالی است که استفاده از ۵۰ و ۱۰۰ درصد RCA با مقاومت اولیه ۴۰ مگاپاسکال به ترتیب موجب کاهش ۹ و ۱۷ درصدی و استفاده از همین مقدار RCA با مقاومت اولیه ۸۰ مگاپاسکال به ترتیب موجب کاهش ۳ و ۱۰ درصدی مقاومت خمشی شده است. این نتایج نشان دهنده‌ی تاثیر مثبت افزایش مقاومت اولیه RCA بر مقاومت خمشی تیرهای بتنی می‌باشد. در تحقیقات گذشته نیز، همسو با نتایج این تحقیق، تاثیر منفی RCA بر مقاومت خمشی تیرهای بتنی گزارش شده است [۶۴].

۶- بهینه‌یابی چند متغیره

با استفاده از نتایج حاصل شده از آزمایش‌ها و هزینه طرح‌های اختلاط، یک روش بهینه‌یابی مورد مطالعه قرار گرفت، تا مناسب‌ترین طرح اختلاط از نظر روانی، کیفیت، جذب آب، خصوصیات مکانیکی (مقاومت‌های فشاری، کششی و خمشی) و جنبه‌های 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 تاثیر می‌گذارند [۶۵]. مواد تشکیل دهنده‌ی طرح‌های اختلاط، متغیرهای مستقل می‌باشند، در حالی که روانی، کیفیت، جذب آب، خصوصیات مکانیکی و هزینه متغیرهای وابسته‌ای هستند که بر اساس 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 مختلفی همچون روانی (آزمایش اسلامپ)، کیفیت (آزمایش UPV)، جذب آب، مقاومت فشاری، مقاومت کششی، مقاومت خمشی و همچنین معیار اقتصادی مد نظر است، بایستی طرح‌های اختلاطی با بیشترین روانی، کیفیت و مقاومت و همچنین کمترین جذب آب و هزینه از طریق بهینه‌یابی انتخاب شوند. از آنجایی که بهینه‌یابی معمولاً شامل تابع هدف است، در این تحقیق از یک روش بهینه‌یابی چند متغیره استفاده

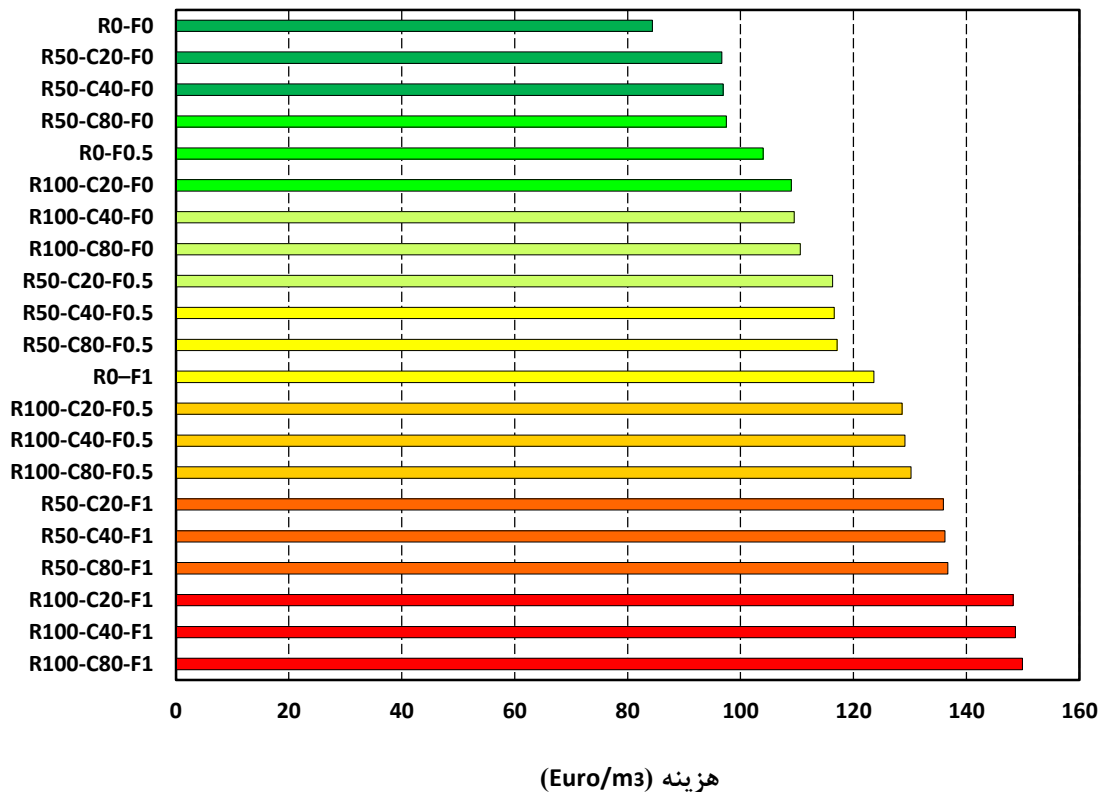
جدول ۴. هزینه مواد (Euro/kg) [۶۸-۶۹].

Table 4. Cost of materials (Euro/kg)

سیمان	آب	NA	RCA	RSF
۰/۱	۰/۰۱	۰/۰۲	۰/۰۴۷	۰/۵

اختلاط برای یک متر مکعب محاسبه شد. نتایج مربوط به هزینه‌ی هر یک متر مکعب بتن برای تمام طرح‌های اختلاط به ترتیب صعودی در شکل ۱۷ نشان داده شده است. نتایج این محاسبات نشان دهنده‌ی آن است که کمترین هزینه مربوط به طرح اختلاط حاوی ۱۰۰ درصد NA و فاقد RSF است (حدوداً ۸۴ Euro/kg). این در صورتی است که بیشترین هزینه مربوط به طرح اختلاط حاوی ۱۰۰ درصد RCA با مقاومت اولیه ۸۰ مگاپاسکال و ۱

درصد RSF است (حدوداً ۱۵۰ Euro/m³). بنابراین، میزان تابع مطلوبیت مربوط به معیار هزینه برای طرح اختلاط R0-F0 برابر با ۱ و برای طرح اختلاط R100-C80-F1 برابر صفر به دست آمد. این پارامتر برای مابقی طرح‌های اختلاط عددی بین ۰ و ۱ به دست آمد. هر چه میزان هزینه هر طرح اختلاط نسبت به طرح‌های اختلاط دیگر کمتر باشد، این پارامتر به سمت ۱ میل می‌کند. بعد از محاسبه تابع مطلوبیت برای تمام معیارها، تابع مطلوبیت کلی نیز مطابق با رابطه (۷) محاسبه شد. نتایج مربوط به بهینه‌یابی در جدول ۵ نشان داده شد. برای طرح اختلاطی که تابع مطلوبیت مربوط به حتی یک معیار برای آن صفر به دست آمده باشد، تابع مطلوبیت کلی آن نیز صفر خواهد شد [۲۰]. میزان مطلوبیت کلی طرح‌های اختلاط به ترتیب نزولی در شکل ۱۸ نشان داده شده است. تابع مطلوبیت کلی برای طرح‌های اختلاط R100-C20-F1، R100-C40-F1، R100-C80-F1 و



شکل ۱۷. هزینه ساخت طرح‌های اختلاط به ترتیب صعودی

Fig. 17. Cost of mix designs

جدول ۵. میزان مطلوبیت طرح‌های اختلاط.

Table 5. Overall desirability of mix designs

مطلوبیت کلی	مطلوبیت						طرح اختلاط
	اقتصاد	مقاومت خمشی	مقاومت کششی	مقاومت فشاری	جذب آب	کیفیت روانی	
۰/۶	۱	۰/۱۸	۰/۲۱	۰/۷	۱	۱	R0-F0
۰/۶۷	۰/۷	۰/۶۳	۰/۷۴	۰/۹۲	۰/۶۴	۰/۶۵	R0-F0.5
۰/۵۶	۰/۴	۱	۱	۱	۰/۴۵	۰/۵	R0-F1
۰/۳۹	۰/۸۱	۰/۰۹	۰/۱۱	۰/۳۹	۰/۸۶	۰/۶۷	R50-C20-F0
۰/۳۵	۰/۵۱	۰/۳۶	۰/۵۱	۰/۴۹	۰/۲۴	۰/۱۸	R50-C20-F0.5
۰/۲۵	۰/۲۱	۰/۷۱	۰/۷۷	۰/۵۴	۰/۱۲	۰/۱۳	R50-C20-F1
۰	۰/۶۲	۰	۰	۰	۰/۸۱	۰/۴۸	R100-C20-F0
۰/۲۲	۰/۳۳	۰/۳۳	۰/۴۵	۰/۱۵	۰/۱۴	۰/۱	R100-C20-F0.5
۰	۰/۰۲	۰/۶۷	۰/۷	۰/۱۸	۰	۰	R100-C20-F1
۰/۴۵	۰/۸۱	۰/۱۳	۰/۱۳	۰/۵۳	۰/۹	۰/۷۷	R50-C40-F0
۰/۴۹	۰/۵۱	۰/۵۲	۰/۶۶	۰/۶۵	۰/۳۸	۰/۴۳	R50-C40-F0.5
۰/۳۱	۰/۲۱	۰/۸۴	۰/۷۷	۰/۶۷	۰/۲۱	۰/۲۳	R50-C40-F1
۰/۳۱	۰/۶۲	۰/۰۷	۰/۰۹	۰/۲۹	۰/۸۳	۰/۶۲	R100-C40-F0
۰/۳۴	۰/۳۲	۰/۴۴	۰/۵۵	۰/۳۳	۰/۲۶	۰/۴	R100-C40-F0.5
۰	۰/۰۲	۰/۸	۰/۸۳	۰/۴۱	۰/۱۴	۰/۱۸	R100-C40-F1
۰/۵۲	۰/۸	۰/۱۶	۰/۱۹	۰/۶۶	۰/۹۸	۰/۹۷	R50-C80-F0
۰/۵۸	۰/۵	۰/۶۱	۰/۷۲	۰/۸۲	۰/۵۵	۰/۶	R50-C80-F0.5
۰/۴۳	۰/۲	۱	۱	۰/۹۳	۰/۴	۰/۴۲	R50-C80-F1
۰/۴	۰/۶	۰/۱۱	۰/۱۷	۰/۴۸	۰/۸۶	۰/۷۸	R100-C80-F0
۰/۴۵	۰/۳	۰/۵۶	۰/۷	۰/۸	۰/۴۸	۰/۵۲	R100-C80-F0.5
۰	۰	۰/۹۸	۰/۹۴	۰/۸۴	۰/۳۸	۰/۳۳	R100-C80-F1

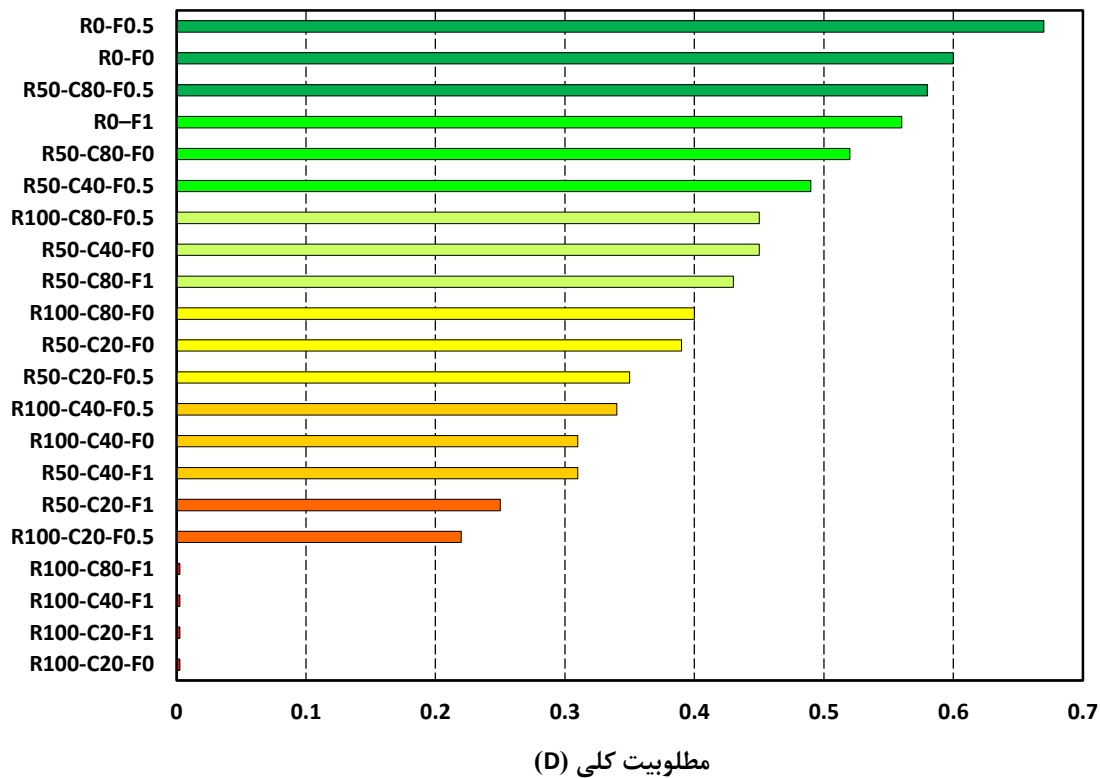
شدند. ۳ نوع RCA با مقاومت اولیه ۲۰، ۴۰ و ۸۰ مگاپاسکال مورد استفاده قرار گرفت. علاوه بر این، نمونه‌ها با استفاده از ۰، ۰/۵ و ۱ درصد حجمی الیاف فولادی بازیافتی از لاستیک خودرو (RSF) مسلح شدند. با انجام آزمایش‌های مختلف، به صورت خلاصه نتایج زیر به دست آمد:

- ۱- RCA در مقایسه با NA چگالی و مقاومت سائیدگی کمتر و جذب آب بیشتری دارد.
- ۲- افزایش مقاومت اولیه RCA موجب افزایش مقاومت سائیدگی و کاهش جذب آب و مقدار ملات چسبیده به سطح این سنگدانه‌ها شد.
- ۳- بین مقاومت اولیه RCA با درصد جذب آب و سایش این سنگدانه‌ها رابطه‌ای خطی و معکوس وجود داشت.
- ۴- جایگزینی NA با RCA و همچنین استفاده از RSF موجب کاهش روانی

R100-C20-F0 برابر صفر به دست آمد. این نتیجه بیان کننده‌ی آن است که استفاده از این طرح‌های اختلاط کمترین منفعت را به دنبال خواهد داشت. در بین طرح‌های اختلاطی که بیشترین مقدار مطلوبیت کلی را به خود اختصاص داده‌اند، طرح‌های اختلاط حاوی ۰/۵ و ۱ درصد RSF و ۵۰ درصد RCA با مقاومت اولیه ۴۰ و ۸۰ مگاپاسکال به چشم می‌خورد. این نتیجه بیانگر آن است که جایگزینی ۵۰ درصد NA با RCA با مقاومت اولیه بالا و همچنین استفاده از RSF می‌تواند منفعت به دنبال داشته باشد.

۷- نتیجه‌گیری

در این تحقیق بتن‌های سازگار با محیط زیست مورد بررسی قرار گرفتند. در ساخت نمونه‌ها سنگدانه‌های طبیعی (NA) به میزان ۰، ۵۰ و ۱۰۰ درصد با سنگدانه‌های حاصل از بازیافت نخاله‌های بتنی (RCA) جایگزین



شکل ۱۸. مطلوبیت کلی طرح‌های اختلاط به ترتیب نزولی

Fig. 18. Overall desirability of mix designs

منابع

- [1] M. Ahmadi, A. Hasani, M. Soleymani., Role of Recycled Steel Fibers from Tires on Concrete Containing Recycled Aggregate from Building Waste, *Concrete research journal*. 7 (2) (2014) 57–68. (In Persian)
- [2] N. D. Oikonomou., Recycled concrete aggregates, *Cem Concr Compos*. 27 (2) (2005) 315–318.
- [3] C. 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 (2017) 886–893.
- [4] R. Chan, X. Liu, I. Galobardes., Parametric study of functionally graded concretes incorporating steel fibres and recycled aggregates, *Construction and Building Materials*. 242 (2020) 118186.
- [5] A. Sahraei Moghadam, F. Omidinasab, S. Moazami

بتن شد، در صورتی که افزایش مقاومت اولیه RCA تأثیری در این مورد نداشت. RCA-۵ و RSF موجب افزایش تخلخل، کاهش کیفیت و در نتیجه کاهش UPV در بتن شدند، در حالی که افزایش مقاومت اولیه RCA موجب بهبود کیفیت بتن‌های بازیافتی شد. RSF-۶ موجب بهبود خصوصیات مکانیکی بتن شد، در صورتی که تأثیر آن در بهبود مقاومت کششی و خمشی بسیار قابل توجه‌تر بود. RCA-۷ موجب کاهش خصوصیات مکانیکی بتن شد، در صورتی که با افزایش میزان استفاده از RCA این کاهش تشدید یافت. RCA-۸ افزایش مقاومت اولیه RCA موجب بهبود خصوصیات مکانیکی بتن‌های بازیافتی شد، به طوری که نمونه‌های حاوی RCA با مقاومت اولیه ۸۰ مگاپاسکال دارای خصوصیات مکانیکی تقریباً مشابهی با بتن‌های حاوی NA بودند. ۹-انجام بهینه‌یابی چند متغیره در بین طرح‌های اختلاط نشان داد که استفاده از RSF و ۵۰ درصد RCA با مقاومت اولیه ۴۰ و ۸۰ مگاپاسکال از لحاظ اقتصادی، مقاومتی، روانی و کیفیت توجیه‌پذیر است.

- aggregate concrete, *Composite Structures*. 181 (2017) 273–284.
- [16] M. L. V. Prasad, R. Kumar., Mechanical Properties of fiber Reinforced Concretes Produced from Building Demolished Waste, *Environmental Research And Development*. 2 (2) (2007) 180–187.
- [17] H. R. Chaboki, M. Ghalehnovi, A. Karimipour, J. Brito., Experimental study on the flexural behaviour and ductility ratio of steel fibres coarse recycled aggregate concrete beams, *Construction and Building Materials*. 186 (2018) 400–422.
- [18] M. Mastali, A. Dalvand, A. R. Sattarifard, Z. Abdollahnejad, B. Nematollahi, J. G. Sanjayan, M. Illikainen., A comparison of the effects of pozzolanic binders on the hardened-state properties of high-strength cementitious composites reinforced with waste tire fibers, *Compos. Pt. B-Eng*. 162 (2019) 134–153.
- [19] E. Martinelli, A. Caggiano, H. Xargay., An experimental study on the post-cracking behaviour of hybrid industrial/recycled steel fiber-reinforced concrete, *Construct Build Mater*. 94 (2015) 290–298.
- [20] O. Sengul., Mechanical behavior of concretes containing waste steel fibers recovered from scrap tires, *Construct Build Mater*. 122 (2016) 649–658.
- [21] ASTM C 39/C 39M-03 (2003). “Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens.”
- [22] ASTM C150 (2012). “Standard Specification for Portland Cement.”
- [23] 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.
- [24] A. Sahraei Moghadam, F. Omidinasab., Assessment of hybrid FRSC cementitious composite with emphasis on flexural performance of functionally graded slabs, *Construction and Building Materials*. 250 (2020) 118904.
- [25] A. Sahraei Moghadam, F. Omidinasab., Flexural and Goodarzi., Characterization of concrete containing RCA and GGBFS: Mechanical, microstructural and environmental properties, *Construction and Building Materials*. 289 (2021) 123134.
- [6] M. Leone, F. Micelli, M.A. Aiello, G. Centonze, D. Colonna., Experimental study on bond behavior in fiber-reinforced concrete with low content of recycled steel fiber, *J. Mater. Civ. Eng*. 28 (9) (2016) 87–99.
- [7] M. Jalal., Compressive strength enhancement of concrete reinforced by waste steel fibers utilizing nano SiO₂, *Middle East J. Sci. Res*. 12 (3) (2012) 382–391.
- [8] L. Lourenco, Z. Zamanzadeh, J.A.O. Barros, M. Rezazadeh., Shear strengthening of RC beams with thin panels of mortar reinforced with recycled steel fibres, *J. Clean.Prod*. 194 (2018) 112–126.
- [9] A. Caggiano, P. Folino, C. Lima, E. Martinelli, M. Pepe., On the mechanical response of Hybrid Fiber Reinforced Concrete with Recycled and Industrial Steel Fibers, *Constr. Build. Mater*. 147 (2017) 286–295.
- [10] M. Mastali, A. Dalvand., Use of silica fume and recycled steel fibers in self-compacting concrete (SCC), *Constr. Build. Mater*. 125 (2016) 196–209.
- [11] G. Centonze, M. Leone, M.A. Aiello., Steel fibers from waste tires as reinforcement in concrete: a mechanical characterization, *Constr. Build. Mater*. 36 (2012) 46–57.
- [12] V. Revilla-Cuesta, V. Ortega-López, M. Skaf, J. Manuel Manso., Effect of fine recycled concrete aggregate on the mechanical behavior of self-compacting concrete, *Construction and Building Materials*. 263 (2020) 120671.
- [13] A. B. Ajdukiewicz, A. T. Kliszczewicz., Comparative tests of beams and columns made of recycled aggregate concrete and natural aggregate concrete, *J. Adv. Concr. Technol*. 5 (2) (2007) 259–273.
- [14] S. Yang., Effect of different types of recycled concrete aggregates on equivalent concrete strength and drying shrinkage properties, *Applied Sciences*. 8 (2016) 2190.
- [15] V. Afroughsabet, L. Biolzi, T. Ozbakkaloglu., Influence of double hooked-end steel fibers and slag on mechanical and durability properties of high performance recycled

- into the mechanical properties of structural lightweight concrete reinforced with waste steel wires, *Mag. Concr. Res.* 67 (4) (2015) 197–205.
- [36] Z. Al-Kamyani, F. P. Figueiredo, H. Hu, M. Guadagnini, K. Pilakoutas., Shrinkage and flexural behaviour of free and restrained hybrid steel fibre reinforced concrete, *Constr. Build. Mater.* 189 (2018) 1007–1018.
- [37] 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.
- [38] 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.
- [39] ASTM C125-19, Standard Terminology Relating to Concrete and Concrete Aggregates, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2019.
- [40] 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.”
- [41] ASTM C 143/C 143M-15a (2015). “Standard Test Method for Slump of Hydraulic-Cement Concrete.”
- [42] ASTM C 642-13 (2013). “Standard Test Method for Density, Absorption, and Voids in Hardened Concrete.”
- [43] BS 1881 - Part 201 \Guide to the use of nondestructive methods of test for hardened concrete”, British Standards Institution (2009).
- [44] ASTM C 496/C 496M-11 (2011). “Standard Test Method for Splitting Tensile Strength of Cylindrical Concrete Specimens.”
- [45] ASTM C1609 / C1609M-19 (2019). “Standard Test Method for Flexural Performance of Fiber-Reinforced Concrete (Using Beam with Third-Point Loading).”
- [46] 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.
- [47] H. Sasanipour, F. Aslani, J. Taherinezhad., Effect of silica impact performance of functionally graded reinforced cementitious composite (FGRCC) panels, structures. 29 (2021) 1723–1733.
- [26] F. Omidinasab, A. Sahraei Moghadam., Effect of Purposive Distribution of Fibers to Prevent the Penetration of Bullet in Concrete Walls, *KSCE J Civ Eng.* 25 (3) (2021) 843-483.
- [27] M. Pajak, T. Ponikiewski., Flexural behavior of self-compacting concrete reinforced with different types of steel fibers, *Constr. Build. Mater.* 47 (2013) 397–408.
- [28] D. Burchart-Korol., Life cycle assessment of steel production in Poland: a case study, *J. Clean. Prod.* 54 (2013) 235–243.
- [29] V. G. Ghorpade, H. Sudarsana Rao., Strength and permeability characteristics of Fibre reinforced recycled aggregate concrete with different fibres, *Nat. Environ. Pollut. Technol.* 9 (1) (2010) 179–188.
- [30] N. Taranu, R. Andrei, L. Dumitrescu, S. G. Maxineasa., Using Recycled Components from Post-Consumer Tyres in Construction Materials Industry, *Geoconference on Energy and Clean Technologies, Stef92 Technology Ltd, Sofia.* (2014) 259–264.
- [31] A. Caggiano, P. Folino, C. Lima, E. Martinelli, M. Pepe., On the mechanical response of Hybrid Fiber Reinforced Concrete with Recycled and Industrial Steel Fibers, *Constr. Build. Mater.* 147 (2017) 286–295.
- [32] M. H. Sotoudeh, M. Jalal., Effects of waste steel fibers on strength and stress strain behavior of concrete incorporating silica nanopowder, *Indian J. Sci. Technol.* 6 (11) (2013) 5411–5417.
- [33] D. Atoyebi Olumoyewa, O. Odeyemi Samson, A. Bello Sefiu, O. Ogbeifun Cephas., Splitting tensile strength assessment of lightweight foamed concrete reinforced with waste tyre steel fibres, *Int. J. Civ. Eng. Technol.* 9 (9) (2018) 1129–1137.
- [34] M. A. Aiello, F. Leuzzi, G. Centonze, A. Maffezzoli., Use of steel fibres recovered from waste tyres as reinforcement in concrete: pull-out behaviour, compressive and flexural strength, *Waste Manage.* 29 (6) (2009) 1960–1970.
- [35] K. Aghaee, M. A. Yazdi, K. D. Tsavdaridis., Investigation

- [57] S. W. Tabsh, A. S. Abdelfatah., Influence of recycled concrete aggregates on strength properties of concrete, *Constr Build Mater.* 23 (2009) 1163–1167.
- [58] F. T. Olorunsogo, N. Padayachee., Performance of recycled aggregate concrete monitored by durability indexes, *Cem Concr Res.* 32 (2002) 179–185.
- [59] A. Ajdukiewicz, A. Kliszczewicz., Influence of recycled aggregates on mechanical properties of HS/HPC. *Cement Concrete Compos.* 24 (2002) 269–79.
- [60] J. Krolo, D. Damjanovic, I. Duvnjak, D. Bjegovic, S. Lakusic, A. Baricevic., Innovative low cost fibre-reinforced concrete – part II: fracture toughness and impact strength, *Concrete Repair, Rehabilitation and Retrofitting III*, in: *Proceedings of the 3rd International Conference on Concrete Repair, Rehabilitation and Retrofitting*, ICCRRR (2012) 204–209.
- [61] G. F. Peng, X. J. Niu, Q. Q. Long., Experimental study of strengthening and toughening for recycled steel fiber reinforced ultra-high performance concrete, *Key Eng. Mater.* 629 (2014) 104–111.
- [62] F. A. Fauzan, R. Ismail, Z. Sandi, A. I. Jauhari., The influence of steel fibers extracted from waste tire on properties of concrete containing fly ash, *Int. J. Adv. Sci. Eng. Inf. Technol.* 7 (6) (2017) 2232–2236.
- [63] A. M. Wagih, H. Z. El-Karmoty, M. Ebid, S. H. Okba., Recycled construction and demolition concrete waste as aggregate for structural concrete, *Housing and Building National Research Center.* 9 (2013) 193–200.
- [64] Y. Hua, Z. Tang, W. Li, Y. Li, V. W. Y. Tamd., Physical-mechanical properties of fly ash/GGBFS geopolymer composites with recycled aggregates, *Construction and Building Materials.* 226 (2019) 139–151.
- [65] 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.
- [66] W. F. Smith., *Experimental design for formulation*, American Statistical Association. (2005).
- [67] O. Sengul, M. A. Tasdemir., Compressive strength and fume on durability of self-compacting concrete made with waste recycled concrete aggregates, *Construction and Building Materials.* 227 (2019) 116598.
- [48] G. Centonze, M. Leone, F. Micelli, D. Colonna, M. A. Aiello., Concrete reinforced with recycled steel fibers from end of life tires: Mix-design and application, *Key Eng. Mater.* 59 (2016) 224–231.
- [49] 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 *Interantional RILEM Conference on the Use of recycled Materials and Structures.* (2008) 636–642.
- [50] D. Matias, J. De 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.
- [51] 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.
- [52] 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.
- [53] M. Bravo, J. De Brito, J. Pontes, L. Evangelista., Durability performance of concrete with recycled aggregates from construction and demolition waste plants, *Construction and Building Materials.* 77 (2015) 357–369.
- [54] 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.
- [55] A. Khaloo, A. Esrafil, M. Kalani, M. H. Mobini., Use of polymer fibres recovered from waste car timing belts in high performance concrete, *J Const Building Materials.* 80 (2015) 31–37.
- [56] E. A. Whitehurst., Soniscope tests concrete structures, *Journal of the American Concrete Institute.* 47 (1951) 443–444.

- Structural Engineering. (2018) 299–348.
- [69] M. Mastali, A. Dalvand, A.R. Sattarifard, Z. Abdollahnejad, M. Illikainen., Characterization and optimization of hardened properties of selfconsolidating concrete incorporating recycled steel, industrial steel, polypropylene and hybrid fibers, Composites Part B. 151 (2018) 186–200.
- rapid chloride permeability of concretes with ground fly ash and slag, Mater Civ Eng. 21 (2009) 494–501.
- [68] M. Mastali, Z. Abdollahnejad, F. Pacheco-Torgal., Carbon dioxide sequestration on fly ash/waste glassalkali-based mortars with recycled aggregates: compressive strength, hydration products, carbon footprint, and cost analysis, Woodhead Publishing Series in Civil and

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

A. Sahraei Moghadam, F. Omidinasab, M. Abdali Kia, Selection of optimal mix design with simultaneous use of RSF and RCA with emphasis on the initial strength of RCA, Amirkabir J. Civil Eng., 54(3) (2022) 907-932.

DOI: 10.22060/ceej.2021.19157.7087

