

Impact performance of environmentally friendly fiber reinforced concrete under repeating impact

S. Moazami Goodarzi¹, F. Omidinasab^{2*}, A. Sahraei Moghadam³

1- M.Sc., Faculty of Engineering, Lorestan University, Khorramabad, Iran.

2- Associate Professor, Faculty of Engineering, Lorestan University, Khorramabad, Iran.

3- Ph.D student, Faculty of Civil Engineering, Babol Noshirvani University of Technology, Babol, Iran.

ABSTRACT

Nowadays, the need to move towards sustainable development emphasizes the need to investigate the behavior of environmentally friendly concrete. So far, several studies have investigated the mechanical properties of this type of concrete, but their impact properties have rarely been investigated. In this research, impact performance of environmentally friendly fiber reinforced concrete was investigated under drop weight impact, according to the method proposed by ACI C544. In order to achieve environmentally friendly concrete, natural aggregates (NA) was replaced by recycled concrete aggregate (RCA) with amounts of 0, 50, and 100%, and ordinary Portland cement (OPC) was replaced by ground granulated blast furnace slag (GGBFS) with amounts of 0, 15, and 30%. Moreover, specimens made in this study were reinforced by 0, 0.5, and 1% hooked-end steel fibers. The results of this test include the number of impacts to create the first visible crack, the number of impacts to create ultimate destruction, and impact energy absorption. The results of investigations showed a 20.1% and 3.6% reduction in ultimate impact resistance due to the use of 100% RCA and 30% GGBFS, respectively, while the addition of 1% steel fibers increased this parameter by 8 times. Finally, statistical analysis on the results of impact tests showed that two-parameter Weibull distribution is a suitable statistical distribution for the statistical investigation of the impact resistance of concrete containing RCA and GGBFS.

ARTICLE INFO

Receive Date: 02 March 2022

Revise Date: 22 June 2022

Accept Date: 16 July 2022

Keywords:

Impact resistance

RCA

GGBFS

Steel fiber

Weibull distribution

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: <https://doi.org/10.22065/jsce.2022.332033.2746>

*Corresponding author: Fereydoon Omidinasab

Email address: omidinasab.f@lu.ac.ir

رفتار ضربه‌ای بتن‌های الیافی سازگار با محیط زیست تحت اثر ضربه تکرار شونده

سعیده معظمی گودرزی^۱، فریدون امیدی نسب^{۲*}، امیرحسین صحرایی مقدم^۳

۱- کارشناسی ارشد مهندسی عمران، دانشگاه لرستان، خرم آباد، ایران

۲- دانشیار گروه مهندسی عمران، دانشگاه لرستان، خرم آباد، ایران

۳- دانشجوی دکتری مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی نوشیروانی، بابل، ایران

چکیده

امروزه، لزوم حرکت در راستای دستیابی به توسعه پایدار بر ضرورت بررسی رفتار بتن‌های سازگار با محیط زیست تاکید می‌کند. تاکنون تحقیقات متعددی به بررسی خصوصیات مکانیکی این نوع بتن‌ها پرداخته است، اما خصوصیات ضربه‌ای آن‌ها به ندرت بررسی شده است. بنابراین، این تحقیق به بررسی خصوصیات ضربه‌ای بتن‌های سازگار با محیط زیست تحت اثر ضربه وزنه افتان مطابق با روش پیشنهادی توسط ACI C544 پرداخته است. به منظور دستیابی به بتن سازگار با محیط زیست، سنگدانه‌های طبیعی (NA) با سنگدانه‌های حاصل از بازیافت نخاله‌های بتنی (RCA) و سیمان پرتلند معمولی (OPC) با پودر سرباره کوره آهن گدازی (GGBFS) جایگزین شدند. علاوه بر این، نمونه‌ها با الیاف فولادی دو سر قلاب مسلح شدند. در ساخت نمونه‌های این تحقیق از ۲۷ طرح اختلاط مختلف شامل جایگزینی ۰، ۵۰ و ۱۰۰ درصد NA با RCA، ۰، ۱۵ و ۳۰ درصد OPC با GGBFS و مسلح شده با ۰، ۵ و ۱ درصد حجمی الیاف فولادی استفاده شد. بر روی نمونه‌ها آزمایش ضربه وزنه افتان انجام و پارامترهای مقاومت اولین ترک، مقاومت نهایی و انرژی جذب شده اندازه‌گیری شد. نتایج آزمایش‌ها نشان دهنده کاهش ۲۰/۱ و ۳/۶ درصدی مقاومت ضربه‌ای نهایی به ترتیب در اثر استفاده از ۱۰۰ درصد RCA و ۳۰ درصد GGBFS بود، در صورتی که افزودن ۱ درصد الیاف فولادی موجب افزایش ۸ برابری این پارامتر شد. در نهایت، تحلیل آماری انجام گرفته بر روی نتایج نشان داد که توزیع دو پارامتری Weibull یک توزیع آماری مناسب به منظور تجزیه و تحلیل مقاومت ضربه‌ای بتن‌های الیافی حاوی RCA و GGBFS است.

کلمات کلیدی: مقاومت ضربه‌ای، سنگدانه بازیافتی، سرباره کوره آهن گدازی، الیاف فولادی، توزیع ویبول.

شناسه دیجیتال:		سابقه مقاله:				
doi:	https://doi.org/10.22065/jsce.2022.332033.2746	چاپ	انتشار آنلاین	پذیرش	بازنگری	دریافت
	10.22065/jsce.2022.332033.2746	۱۴۰۲/۰۲/۳۱	۱۴۰۱/۰۴/۲۵	۱۴۰۱/۰۴/۲۵	۱۴۰۱/۰۴/۰۱	۱۴۰۰/۱۲/۱۱
				فریدون امیدی نسب omidinasab.f@lu.ac.ir		*نویسنده مسئول: پست الکترونیکی:

¹ Natural aggregates

² Recycled concrete aggregate

³ Ordinary Portland cement

⁴ Ground granulated blast furnace slag

۱- مقدمه

در سال‌های اخیر با توجه به افزایش استفاده از بتن در پروژه‌های عمرانی، این ماده نقش کلیدی و غیر قابل انکاری در توسعه شهرنشینی کنونی داشته است. طبق گزارشات، سالانه بیش از ۱۰ میلیارد تن بتن در جهان تولید و مصرف می‌شود که برای تولید این مقدار بتن در سال، حدوداً به ترتیب ۵، ۰/۹ و ۰/۶ میلیارد تن سیمان، سنگدانه و آب مورد نیاز است [۱-۳]. با توجه به رشد روز افزون بتن در ساخت و ساز، با تسریع روند کاهشی معادن طبیعی مواجه هستیم. همچنین، سالانه مقدار بسیار زیادی نخاله بتنی از تخریب ساختمان‌های قدیمی حاصل می‌گردد [۴-۵]. با توجه به تجدید ناپذیر بودن بتن، دفع نخاله‌های آن از طریق دفن یا انباشته کردن انجام می‌شود. هر دو روش مذکور علاوه بر هزینه‌های حمل و نقل، باعث تغییرات زیست محیطی و اکوسیستم نیز می‌گردند [۶]. در صورتی که استفاده از ضایعات بتنی در ساخت بتن‌های جدید، می‌تواند علاوه بر کاهش نخاله‌های ساختمانی، به حفظ منابع طبیعی نیز کمک کند [۷]. از طرفی، در حال حاضر محققان با کاربرد سرباره‌های معدنی بعنوان جایگزین سیمان پرتلند معمولی (OPC) به دنبال راه حلی برای رفع آلودگی ناشی از تولید سیمان می‌باشند [۸]. استفاده از مواد افزودنی معدنی موجب اصلاح برخی خواص بتن از جمله خواص رئولوژیکی و مکانیکی می‌شود [۹]. محصول جانبی فرآیند تولید فولاد (GGBFS)، ده‌ها سال است که در پروژه‌های مهندسی عمران مورد استفاده قرار می‌گیرد. GGBFS با سرد کردن سریع سرباره آهن در آب بدست می‌آید. از آنجا که این سرباره به علت میزان زیاد آهک دارای فعالیت پوزولانی می‌باشد، بطور موفقیت آمیزی در مخلوط‌های بتنی مورد استفاده قرار می‌گیرد [۱۰-۱۲]. در دهه‌های اخیر، کاربرد الیاف‌های مختلف به منظور بهبود رفتار بتن رواج پیدا کرده است [۱۳]. نتایج تحقیقات نشان می‌دهد حتی استفاده به میزان کم از الیاف، مقاومت ضربه‌ای و اختلاف بین مقاومت ضربه‌ای اولین ترک و مقاومت ضربه‌ای نهایی را نسبت به بتن معمولی افزایش می‌دهد. در مورد میزان افزایش مقاومت ضربه‌ای بتن الیافی نسبت به بتن معمولی اعداد مختلفی ذکر شده است، که تغییر در ترکیبات و مشخصات الیاف مورد استفاده را می‌توان از مهمترین دلایل این تفاوت دانست [۱۴]. افزودن الیاف به بتن می‌تواند باعث افزایش جذب انرژی و بهبود مقاومت ضربه‌ای بتن شود و از گسترش ترک‌ها جلوگیری بعمل آورد. همچنین الیاف‌های کوتاه و مجزا می‌تواند باعث به تاخیر افتادن توزیع ترک‌های ناشی از برخورد ضربه شود. این امر ناشی از این علت است که الیاف همانند یک پل بر روی ترک‌ها عمل کرده و از گسترش آن‌ها جلوگیری می‌کند [۱۵].

آیدوکیویچ^۵ و کلیشچویچ^۶ [۱۶] به بررسی خصوصیات مکانیکی بتن‌های ساخته شده با سنگدانه‌های بازیافت شده از نخاله‌های بتنی (RCA) بعنوان جایگزین سنگدانه‌های طبیعی (NA) پرداختند. آن‌ها در این تحقیق بتن‌های با مقاومت فشاری ۴۰ تا ۷۰ مگاپاسکال را برای بازیافت انتخاب کردند. با انجام آزمایش بر روی بتن‌های ساخته شده از RCA این نتیجه حاصل شد که استفاده از این سنگدانه‌ها تاثیر قابل توجهی بر روی مقاومت فشاری بتن نخواهد داشت. پاچکو^۷ و همکاران [۱۷] به بررسی تجربی خصوصیات مکانیکی بتن تولید شده با درشت‌دانه‌های بازیافتی پرداختند و بعد از انجام آزمایش‌ها و تحلیل آماری به این نتیجه رسیدند که استفاده ۱۰۰ درصدی مصالح بازیافتی بیشترین پراکندگی و جایگزینی ۵۰ درصد سنگ‌دانه‌های بازیافتی کمترین پراکندگی را در نتایج ایجاد می‌کند. یانگ^۸ [۱۸] 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. ناک^۹ و کوراما^{۱۰} [۱۹] رفتار تیرهای بتن مسلح ساخته شده با درشت‌دانه‌های بازیافتی را بررسی کردند. نتایج این مطالعه نشان داد که تاثیر استفاده از درشت‌دانه‌های بازیافتی بر مقاومت خمشی و برشی اندک است و تغییر قابل ملاحظه‌ای در نحوه شکست تیر به وجود نمی‌آورد. آرورا^{۱۱} و سینگ^{۱۲} [۲۰] احتمال شکست خمشی بتن‌های ساخته شده با RCA را مورد بررسی قرار دادند. در این تحقیق نمونه‌های خمشی

⁵ Ajdukiewicz

⁶ Kliszczewicz

⁷ Pacheco

⁸ Yang

⁹ Knaack

¹⁰ Kurama

¹¹ Arora

¹² Singh

با ابعاد سطح مقطع $10 \times 10 \text{ cm}^2$ و طول 50 cm ساخته و آزمایش شد. نتایج این تحقیق نشان داد که احتمال شکست با افزایش مقدار RCA افزایش می‌یابد، در صورتی که انتظار می‌رود با اضافه کردن افزودنی‌های معدنی بتوان این ضعف را برطرف نمود. ساینی^{۱۳} و سینگ^{۱۴} [۲۱] مطالعه‌ای را به منظور بررسی طول عمر خستگی بتن خودتراکم ساخته شده با ۱۰۰ درصد RCA تحت بارگذاری خمشی انجام دادند. نتایج نشان داد که توزیع ویبول دو پارامتری یک فرض صحیح و معتبر برای مدل‌سازی عمر خستگی بتن خودتراکم ساخته شده با RCA است. از طرفی، مطالعات زیادی به منظور بررسی تاثیر GGBFS در مخلوط‌های بتنی انجام شده است، این تحقیقات نشان داده است که بتن سرباره‌ای در مقایسه با بتن معمولی دارای خصوصیات مکانیکی مطلوب‌تری می‌باشد [۲۲]. افروغ ثابت^{۱۵} و همکاران [۲۳] اثرات جایگزینی ۳۰ درصدی OPC با GGBFS را در بتن‌های ساخته شده با RCA بررسی کردند. ایشان با انجام آزمایش‌های متنوع گزارش کردند که جایگزینی ۳۰ درصدی OPC با GGBFS تغییری در مقاومت فشاری بتن ایجاد نمی‌کند، در صورتی که موجب افزایش مقاومت کششی و خمشی بتن نیز می‌شود. در این تحقیق مشاهده شد که این سرباره موجب کاهش کارایی و جذب آب بتن می‌شود. راماکریشنا^{۱۶} و ساندارراجان^{۱۷} [۱۳] نشان دادند که استفاده از الیاف طبیعی در بتن سبب افزایش ۳ تا ۱۸ برابری مقاومت آن در مقابل ضربه در مقایسه با بتن بدون الیاف می‌گردد. سروشیان^{۱۸} و همکاران [۲۴] نشان دادند که اثر الیاف پلیمری متداول در افزایش مقاومت ضربه‌ای اولین ترک و نهایی بیشتر از اثر آن‌ها در افزایش مقاومت خمشی است. پراساد^{۱۹} و کومار^{۲۰} [۲۵] 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 الیاف های مذکور می‌توان به جبران این ضعف پرداخت. این تحقیق عملکرد بهتر الیاف شیشه نسبت به الیاف پلی پروپیلن را گزارش کرد در تحقیق دیگری، بیندیانویل^{۲۱} و بانزیا^{۲۲} [۲۶] مقاومت ضربه‌ای بتن حاوی نسل جدید الیاف‌های پلیمری و الیاف فولادی را با هم مقایسه کردند. در این تحقیق جذب انرژی تیرهای بتنی توسط دستگاه ضربه وزنه افتان اندازه‌گیری و مشاهده شد که بتن‌های دارای الیاف فولادی دارای جذب انرژی به مراتب بالاتری می‌باشند. چابکی^{۲۳} و همکاران [۲۷] 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 را در مقایسه با تیرهای طبیعی تحمل می‌کنند که با استفاده از الیاف فولادی می‌توان به جبران این کاهش مقاومت پرداخت. نتایج تحقیقات دنگ^{۲۴} و لی^{۲۵} [۲۸] نیز نشان داد که استفاده از ۱ و ۱/۵ درصدی الیاف فولادی و پلیمری موجب افزایش مقاومت ضربه‌ای بتن می‌شوند، در صورتی که این افزایش برای الیاف فولادی به مراتب بیشتر است.

هدف محققان در این تحقیق، بررسی رفتار ضربه‌ای بتن‌های حاوی سنگدانه‌های بازیافت شده از نخاله‌های بتنی (RCA)، پودر سرباره کوره آهن‌گدازی (GGBFS) و الیاف فولادی تحت اثر ضربه وزنه افتان می‌باشد. بدین منظور، خصوصیات ضربه‌ای بتن‌های ساخته شده از ۲۷ طرح اختلاط مختلف شامل جایگزینی ۰، ۵۰ و ۱۰۰ درصدی NA با RCA، ۰، ۱۵ و ۳۰ درصدی OPC با GGBFS و مسلح شده با ۰، ۵/۰ و ۱ درصد حجمی الیاف فولادی بررسی شد. روند انجام این تحقیق در شکل (۱) نشان داده شده است. نتایج آزمایش‌های این تحقیق می‌تواند در راستای توسعه‌ی هر چه بیشتر بتن‌های سازگار با محیط زیست موثر واقع شود.

13 Saini

14 Singh

15 Afroughsabet

16 Ramakrishna

17 Sundararajan

18 Soroushian

19 Prasad

20 Kumar

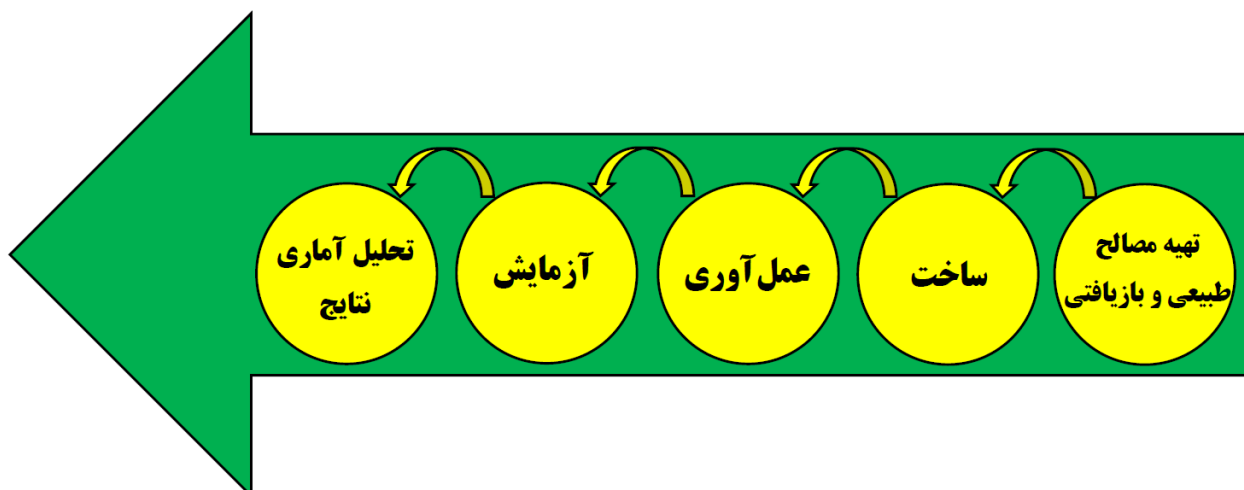
21 Bindiganavile

22 Banthia

23 Chaboki

24 Deng

25 Li



شکل ۱: روند انجام تحقیق.

۲- برنامه آزمایشگاهی

۲-۱- مصالح

سنگدانه: دو نوع سنگدانه شامل سنگدانه طبیعی (NA) و بازیافت شده از نخاله‌های بتنی (RCA) در این تحقیق استفاده شد. NA از نوع ماسه و شن نخودی کوهستانی می‌باشند. RCA نیز از بازیافت نخاله‌های بتنی توسط دستگاه سنگ شکن بدست آمد. ریزدانه‌های طبیعی و بازیافتی به ترتیب دارای وزن مخصوص 2597 kg/m^3 و 2438 kg/m^3 و درشت دانه‌های طبیعی و بازیافتی نیز به ترتیب دارای وزن مخصوص 2461 kg/m^3 و 2443 kg/m^3 بودند. میزان جذب آب برای NA، $4/3\%$ و برای RCA، $7/5\%$ بدست آمد. افزایش جذب آب RCA نسبت به NA با توجه به ملات چسبیده به سطح این سنگدانه‌ها منطقی است. تصویر NA و RCA مورد استفاده در شکل (۲) نشان داده شده است. NA و RCA با دانه بندی یکسانی مطابق شکل (۳) آماده شدند.

مواد چسبنده: در ساخت نمونه‌های این تحقیق از سیمان پرتلند معمولی (OPC) و سرباره کوره آهن گدازی (GGBFS) بر اساس ASTM C150 [۲۹] استفاده شد. ترکیبات شیمیایی و خصوصیات فیزیکی سیمان و GGBFS مورد استفاده در جدول (۱) آمده است. تصویر GGBFS مورد استفاده نیز در شکل (۴) نشان داده شده است.

الیاف فولادی: الیاف‌های فولادی مورد استفاده در این تحقیق از نوع دو سر قلاب با طول 50 mm و ضخامت $0/8 \text{ mm}$ می‌باشند. خصوصیات الیاف‌های فولادی در جدول (۲) آمده است.

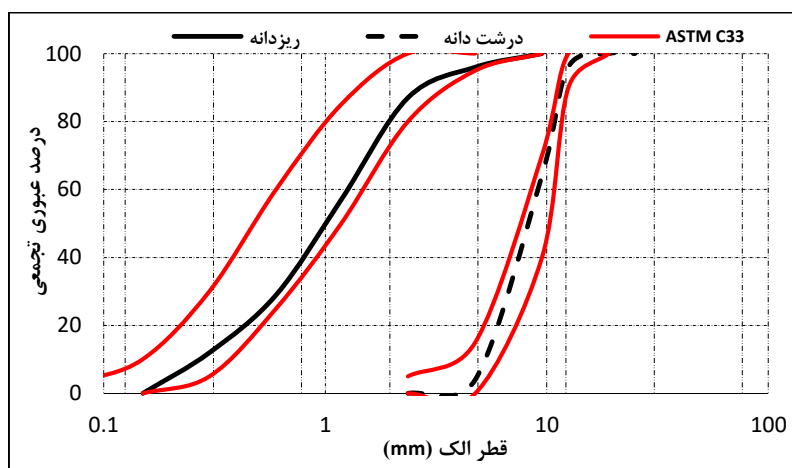
فوق روان کننده: به منظور ایجاد روانی کافی در طرح‌های اختلاط، از فوق روان کنندهی کربوکسیلاتی با نام تجاری Dezobuild D40 استفاده شد.



(ب)

(الف)

شکل ۲: تصویری از (الف) NA، (ب) RCA.



شکل ۳: منحنی دانه بندی سنگدانه ها.



شکل ۴: تصویری از GGBFS مورد استفاده.

جدول ۱: ترکیبات شیمیایی و خصوصیات فیزیکی OPC و GGBFS مورد استفاده [۱۰].

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)

جدول ۲: خصوصیات الیاف فولادی مورد استفاده.

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

۲-۲- طرح‌های اختلاط

در ساخت نمونه‌های این تحقیق از ۲۷ طرح اختلاط مختلف استفاده شد. در این طرح‌های اختلاط سه متغیر شامل درصد جایگزینی NA با RCA، درصد جایگزینی OPC با GGBFS و درصد الیاف فولادی بکار رفته است. در این طرح‌های اختلاط میزان ۰، ۵۰ و ۱۰۰ درصد از NA با RCA و ۰، ۱۵، ۳۰ درصد از OPC با GGBFS جایگزین شد. علاوه بر این، طرح‌های اختلاط با ۰، ۵/۰ و ۱ درصد حجمی الیاف فولادی دوسر قلاب مسلح شدند. اساس تغییر در میزان فوق روان کننده‌ی مورد استفاده، ایجاد روانی مشابه در طرح‌های اختلاط مختلف بود. با توجه به جذب آب بیشتر سنگدانه‌های بازیافتی در مقایسه با سنگدانه‌های طبیعی، استفاده از میزان آب ثابت موجب کاهش روانی در طرح‌های اختلاط حاوی سنگدانه‌های بازیافتی شد. اما از آنجایی که هدف این تحقیق بررسی تاثیر دو پارامتر GGBFS و RCA بر خصوصیات رفتاری بتن بود، سعی شد با تغییر در میزان مصرف فوق روان کننده‌ی مورد استفاده، روانی تمام طرح‌های اختلاط در عین استفاده از مقدار آب مساوی، ثابت نگه داشته شود. بدین منظور، در طرح‌های اختلاط حاوی سنگدانه‌های طبیعی از فوق روان کننده استفاده نگردید، در صورتی که در طرح‌های اختلاط حاوی ۵۰ و ۱۰۰ درصد RCA به ترتیب از فوق روان کننده به میزان ۰/۲۵ و ۰/۵ درصد وزنی سیمان استفاده شد. از این طریق، در عین استفاده از مقدار آب مشابه، روانی طرح‌های اختلاط ثابت نگه داشته شد. جزئیات طرح‌های اختلاط مورد استفاده در جدول (۳) آمده است.

۲-۳- ساخت و عمل آوری نمونه‌ها

مراحل ساخت بتن به گونه‌ای بود که ابتدا سنگدانه‌ها و مواد چسبنده (OPC و GGBFS) بصورت خشک به مدت ۲ دقیقه در میکسر مخلوط شدند. سپس ۹۰ درصد آب مورد نیاز بصورت تدریجی به مخلوط اضافه شد و در نهایت، آب باقیمانده و الیاف‌های فولادی برای جلوگیری از مشکل گلوله شدن به آرامی به مخلوط اضافه شدند.

نمونه‌های ساخته شده برای آزمایش مقاومت ضربه‌ای نمونه‌های دیسکی به قطر ۱۵ و ارتفاع ۶/۴ سانتی متر بودند. تصویری از نمونه‌های دیسکی ساخته شده در شکل (۵) نشان داده شده است. تمامی نمونه‌ها بعد از مدت ۲۴ ساعت از قالب جدا شده و ۲۸ روز در حوضچه آب عمل‌آوری شدند. در سن ۲۸ روز نمونه‌ها تحت آزمایش قرار گرفتند.

جدول ۳: طرح‌های اختلاط.

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



شکل ۵: نمونه‌های دیسکی ساخته شده در این تحقیق.

۳- روش آزمایش‌ها

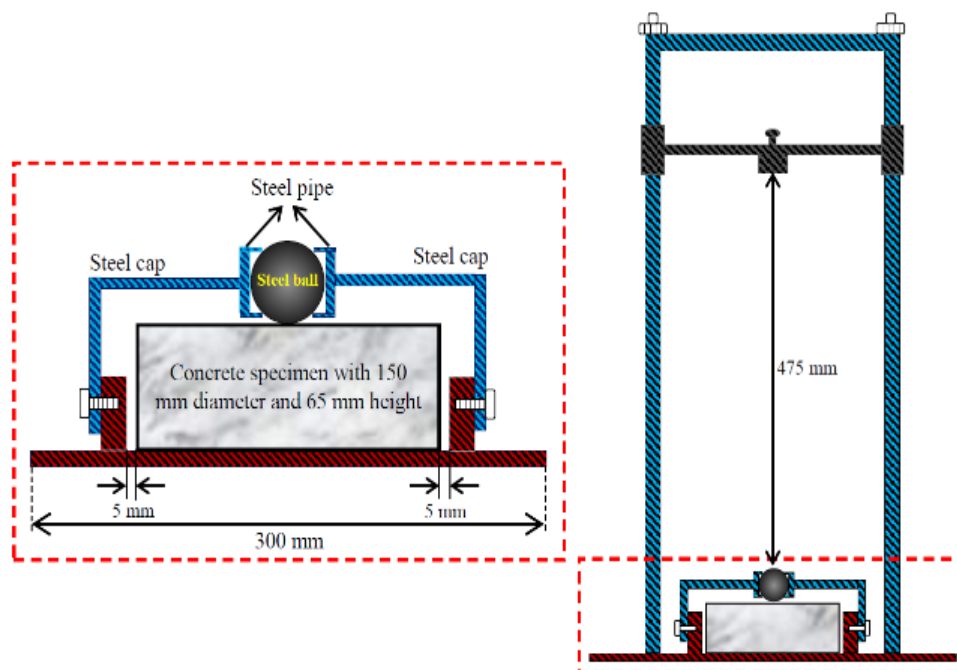
در این تحقیق به منظور تعیین خصوصیات مکانیکی طرح‌های اختلاط مورد استفاده، آزمایش‌های مقاومت فشاری بر اساس ASTM C39 [۳۰]، آزمایش جذب آب بر اساس ASTM C642 [۳۱] و آزمایش سرعت موج اولتراسونیک بر اساس BS 1881 [۳۲] انجام شد. علاوه بر این، آزمایش مقاومت ضربه‌ای بصورت ضربه وزن افتان تکرار شونده و بر اساس روش پیشنهادی توسط ACI C544 [۳۳] انجام گرفت. شکل (۶) جزئیات دستگاه مورد استفاده در انجام این آزمایش را نشان می‌دهد. در انجام این آزمایش از نمونه‌های دیسکی به قطر ۱۵ و ارتفاع ۶/۴ سانتی‌متر استفاده شد. در این آزمایش دیسک‌های بتنی در داخل دستگاه قرار داده شده و سپس یک چکش به وزن ۴/۴۵ کیلوگرم به طور مکرر از ارتفاع ۴۵۷ میلی‌متری بر روی یک گوی فولادی به قطر ۶۳/۵ میلی‌متر که بر روی نمونه قرار داشت، رها شد. نتایج این آزمایش شامل تعداد ضربات برای ایجاد اولین ترک قابل روئیت، تعداد ضربات برای ایجاد گسیختگی نهایی و انرژی جذب شده توسط نمونه می‌باشد. انرژی وارده در هر ضربه با استفاده از روابط (۱-۳) محاسبه شد.

$$H = \frac{gt^2}{2} \quad (1)$$

$$V = gt \quad (2)$$

$$U = \frac{WV^2}{2g} \quad (3)$$

در رابطه (۱)، H ارتفاع سقوط چکش و برابر با ۴۵۷ میلی‌متر، g شتاب گرانش زمین و برابر با ۹۸۲۰ میلی‌متر بر مجذور ثانیه و t زمان سقوط چکش در هر ضربه می‌باشد. در رابطه (۲)، V سرعت چکش در زمان برخورد با نمونه می‌باشد. در رابطه (۳) نیز، U انرژی وارده بر نمونه در هر ضربه و W وزن چکش مورد استفاده می‌باشد. با توجه به اطلاعات موجود، زمان سقوط چکش در هر ضربه ۰/۳۰۵۲ ثانیه بدست آمد. بر اساس رابطه (۲)، سرعت چکش در زمان برخورد به نمونه برابر با ۲۹۹۴/۰۱ میلی‌متر بر ثانیه می‌باشد. با توجه به اطلاعات بدست آمده و بر اساس رابطه (۳)، انرژی وارده در هر ضربه چکش ۲۰/۳۴۵ ژول بدست آمد که با ضرب تعداد دفعات ضربه در این عدد، انرژی جذب شده توسط نمونه حاصل گردید. این آزمایش بر روی دیسک‌های بتنی ساخته شده از ۲۷ طرح اختلاط مختلف انجام شد.



شکل ۶: جزئیات دستگاه مورد استفاده در آزمایش ضربه وزنه افتان.

۴- تجزیه و تحلیل نتایج

۴-۱- خصوصیات مکانیکی

به جهت تعیین خصوصیات مکانیکی، آزمایش‌های مقاومت فشاری، جذب آب و سرعت موج اولتراسونیک (UPV) انجام شد.

۴-۱-۱- مقاومت فشاری

نتایج مربوط به آزمایش مقاومت فشاری در جدول (۴) نشان داده شده است. این نتایج نشان دهنده آن است که جایگزینی NA با RCA موجب کاهش مقاومت فشاری شده است. هرچه میزان استفاده از RCA افزایش یافت، مقاومت فشاری بتن کاهش پیدا کرد. جایگزینی ۵۰ و ۱۰۰ درصدی NA با RCA به ترتیب موجب کاهش ۱۰/۳ و ۲۰/۱ درصدی مقاومت فشاری نمونه‌ها نسبت به نمونه شاهد (R0-G0-F0) شد. کاهش مقاومت فشاری در اثر جایگزینی NA با RCA در طرح‌های اختلاط حاوی الیاف‌های فولادی قابل توجه‌تر بوده است. بطوری‌که در طرح‌های اختلاط حاوی ۱ درصد الیاف فولادی استفاده از ۵۰ و ۱۰۰ درصد RCA به ترتیب موجب کاهش ۱۰/۷ و ۲۴/۴ درصدی مقاومت فشاری نسبت به نمونه R0-G0-F1 شد. کیفیت ملات قدیمی احاطه کننده RCA و کیفیت دو ناحیه انتقال بین سطحی (ITZ) بین ملات قدیمی و RCA (ITZ قدیمی) و بین ملات قدیمی و ملات جدید (ITZ جدید) از جمله عوامل تاثیرگذار بر مقاومت فشاری بتن‌های بازیافتی می‌باشند. معمولاً، ITZ قدیمی نسبت به ITZ جدید ضعیف‌تر است. بنابراین، ITZ قدیمی می‌تواند بعنوان نقطه شروع و گسترش ترک‌ها و ایجاد خرابی‌ها در بتن‌های بازیافتی در نظر گرفته شود و این خود یکی از دلایل کاهش مقاومت این نوع بتن‌ها می‌باشد [۳۴]. در اکثر تحقیقات پیشین، کاهش مقاومت فشاری در اثر استفاده از RCA گزارش شده است [۳۵]. با این حال، در تحقیقاتی مقاومت فشاری برابر [۳۶] و حتی در برخی دیگر مقاومت فشاری بالاتر بتن‌های ساخته شده با RCA در مقایسه با بتن‌های ساخته شده با NA گزارش شده است [۳۷]. از طرفی، نتایج نشان دهنده آن است که جایگزینی OPC با GGBFS نیز موجب کاهش مقاومت فشاری شده است. در طرح‌های اختلاط حاوی ۱۰۰ درصد NA جایگزینی ۱۵ و ۳۰ درصدی OPC با GGBFS به ترتیب موجب کاهش ۶/۹ و ۱۲ درصدی مقاومت فشاری نسبت به نمونه R0-G0-F0 شد. کاهش مقاومت فشاری در اثر جایگزینی OPC با GGBFS در طرح‌های اختلاط حاوی RCA قابل توجه‌تر بود. بطوری‌که جایگزینی ۱۵ و ۳۰ درصدی OPC با GGBFS در طرح اختلاط حاوی ۱۰۰ درصد RCA به ترتیب موجب کاهش ۱۳/۸ و ۲۲ درصدی مقاومت فشاری نسبت به نمونه R100-G0-F0 شد. علاوه بر این، نتایج نشان داد که استفاده از الیاف‌های فولادی می‌تواند هم تاثیر مثبت و هم تاثیر منفی بر مقاومت فشاری بتن داشته باشد. نتایج نشان دهنده آن است که افزودن

۰/۵ درصد الیاف فولادی دو سر قلاب موجب افزایش مقاومت فشاری شده است، در صورتی که افزایش حجم الیاف فولادی به ۱ درصد حجم بتن موجب کاهش مقاومت فشاری شده است. ۰/۵ درصد الیاف فولادی در طرح‌های اختلاط حاوی ۱۰۰ درصد NA و ۱۰۰ درصد RCA به ترتیب موجب افزایش ۶/۷ و ۶/۴ درصدی مقاومت فشاری شد. در حالی که ۱ درصد الیاف فولادی در طرح‌های اختلاط حاوی ۱۰۰ درصد NA و ۱۰۰ درصد RCA به ترتیب موجب کاهش ۵/۷ و ۱۰/۸ درصدی مقاومت فشاری شد. افزایش مقاومت فشاری طرح‌های اختلاط در اثر افزودن الیاف را می‌توان به قابلیت پل زدن الیاف‌ها بر روی ترک‌ها نسبت داد. از طرف دیگر، هرچه مقدار الیاف مصرفی در بتن افزایش یابد، تخلخل ناشی از آن نیز افزایش می‌یابد و این می‌تواند یکی از دلایل کاهش مقاومت فشاری در اثر افزایش میزان الیاف مصرفی باشد. در تحقیقات گذشته نیز هر دو نوع اثر افزایشی و کاهش الیاف فولادی بر مقاومت فشاری بتن گزارش شده است. اصلانی^{۲۶} و خالو^{۲۸} و همکاران [۳۹] کاهش مقاومت فشاری بتن را در اثر افزودن الیاف فولادی به طول ۲۰/۶ میلی‌متر گزارش کردند.

جدول ۴: نتایج آزمایش مقاومت فشاری.

مقاومت فشاری (MPa)	طرح اختلاط	مقاومت فشاری (MPa)	طرح اختلاط	مقاومت فشاری (MPa)	طرح اختلاط
۴۷/۹۶	R100-G0-F0	۵۳/۸۳	R50-G0-F0	۶۰/۰۳	R0-G0-F0
۵۱/۰۳	R100-G0-F0.5	۵۵/۰۳	R50-G0-F0.5	۶۴/۱۶	R0-G0-F0.5
۴۲/۸	R100-G0-F1	۵۰/۵۷	R50-G0-F1	۵۶/۶۳	R0-G0-F1
۴۱/۳۲	R100-G15-F0	۴۶/۸۳	R50-G15-F0	۵۵/۹	R0-G15-F0
۴۵/۶۸	R100-G15-F0.5	۴۹/۳۵	R50-G15-F0.5	۵۹/۱۲	R0-G15-F0.5
۳۹/۶۹	R100-G15-F1	۴۳/۲۲	R50-G15-F1	۵۲/۱	R0-G15-F1
۳۷/۴	R100-G30-F0	۴۴/۷۳	R50-G30-F0	۵۲/۸۳	R0-G30-F0
۴۰/۷۱	R100-G30-F0.5	۴۸	R50-G30-F0.5	۵۶/۴۵	R0-G30-F0.5
۳۵/۱۸	R100-G30-F1	۴۰/۱۹	R50-G30-F1	۵۰/۰۲	R0-G30-F1

۴-۱-۲- جذب آب

از نتایج مربوط به آزمایش جذب آب که در جدول (۵) نشان داده است، می‌توان اینگونه استنباط کرد که RCA نسبت به NA جذب آب بتن را افزایش می‌دهد. افزایش جذب آب نمونه‌های حاوی RCA، به دلیل وجود ملات چسبیده به سطح RCA توجیه‌پذیر است [۴]. از طرفی، با توجه به جذب آب بیشتر RCA در مقایسه با NA، افزایش جذب آب بتن‌های حاوی RCA منطقی است [۱۰]. جایگزینی ۵۰ و ۱۰۰ درصدی NA با RCA به ترتیب موجب افزایش ۱۱/۱ و ۳۰/۶ درصدی جذب آب نهایی بتن شده است. در تحقیقات گذشته نیز افزایش ۱۴/۲ [۴۰]، ۱۷/۵ [۴۱]، ۱۹/۸ [۴۲]، ۶۲ [۴۳] و ۶۸/۹ درصدی [۴۴] جذب آب بتن در اثر جایگزینی NA با RCA گزارش شده است. از طرفی در نتایج این آزمایش شاهد کاهش میزان جذب آب نمونه‌های حاوی GGBFS نسبت به نمونه‌های فاقد آن هستیم. این سرباره با توجه به قابلیت پرکنندگی خود می‌تواند موجب کاهش تخلخل در بتن شده و جذب آب آن را کاهش دهد [۱۰]. جایگزینی ۱۵ و ۳۰ درصدی OPC با این سرباره به ترتیب موجب کاهش ۲۵ و ۳۸/۸ درصدی جذب آب نهایی در طرح اختلاط حاوی ۱۰۰ درصد NA و کاهش ۱۲/۸ و ۲۵/۵ درصدی در طرح اختلاط حاوی ۱۰۰ درصد RCA شد. الیاف‌های فولادی نیز در افزایش جذب آب بتن تاثیر قابل توجهی داشتند. با توجه به نقش الیاف فولادی در کاهش کارایی و ایجاد تخلخل در بتن، افزایش جذب آب نمونه‌های حاوی این الیاف منطقی بنظر می‌رسد [۱۴]. افزودن ۰/۵ و ۱ درصد حجمی الیاف فولادی در طرح اختلاط حاوی ۱۰۰ درصد NA به ترتیب موجب افزایش ۳۰/۶ و ۵۵/۶ درصدی جذب آب نهایی بتن شد. این در صورتی است که همین میزان الیاف فولادی در طرح‌های اختلاط حاوی ۱۰۰ درصد RCA به ترتیب موجب افزایش ۴۲/۶ و ۷۰/۲ درصدی جذب آب نهایی بتن شد. این نتیجه بیانگر آن است که نقش الیاف‌های فولادی در افزایش

²⁶ Aslani

²⁷ Nejadi

²⁸ Khaloo

جذب آب بتن‌های حاوی RCA قابل توجه‌تر می‌باشد. از این آزمایش می‌توان اینگونه استنباط کرد که به منظور دستیابی به کمترین میزان جذب آب استفاده از ترکیب NA و GGBFS و عدم استفاده از الیاف فولادی مناسب‌ترین شیوه است. بطوری که کمترین میزان جذب آب مربوط به نمونه حاوی ۱۰۰ درصد NA، ۳۰ درصد GGBFS و فاقد الیاف (R0-G30-F0) و بیشترین میزان جذب آب مربوط به نمونه حاوی ۱۰۰ درصد RCA، فاقد GGBFS و ۱ درصد الیاف فولادی (R100-G0-F1) می‌باشد.

جدول ۵: نتایج آزمایش جذب آب.

جذب آب (%)			جذب آب (%)			جذب آب (%)		
طرح اختلاط		اولیه	طرح اختلاط		اولیه	طرح اختلاط		اولیه
نهایی	اولیه	نهایی	اولیه	نهایی	اولیه	نهایی	اولیه	نهایی
۴/۷	۳/۳	R100-G0-F0	۴	۲/۶	R50-G0-F0	۳/۶	۲/۲	R0-G0-F0
۵/۴	۴/۴	R100-G0-F0.5	۵/۴	۳/۴	R50-G0-F0.5	۴/۷	۲/۸	R0-G0-F0.5
۶/۴	۵/۹	R100-G0-F1	۶/۵	۴	R50-G0-F1	۵/۶	۳/۵	R0-G0-F1
۴/۱	۲/۹	R100-G15-F0	۳/۲	۲	R50-G15-F0	۲/۷	۱/۸	R0-G15-F0
۴/۹	۳/۴	R100-G15-F0.5	۴/۹	۲/۷	R50-G15-F0.5	۳/۸	۲/۳	R0-G15-F0.5
۶	۵/۱	R100-G15-F1	۵/۷	۳/۶	R50-G15-F1	۴/۸	۲/۹	R0-G15-F1
۳/۵	۲/۳	R100-G30-F0	۲/۸	۱/۶	R50-G30-F0	۲/۲	۱/۳	R0-G30-F0
۴/۳	۳	R100-G30-F0.5	۳/۶	۲/۲	R50-G30-F0.5	۳/۴	۱/۹	R0-G30-F0.5
۵/۱	۴/۶	R100-G30-F1	۴/۷	۳/۲	R50-G30-F1	۴/۱	۲/۷	R0-G30-F1

۴-۱-۳- سرعت موج اولتراسونیک (UPV)

نتایج آزمایش UPV در جدول (۶) آمده است. نتایج نشان دهنده‌ی تاثیر منفی RCA و تاثیر مثبت GGBFS بر نتایج آزمایش اولتراسونیک می‌باشد. با بررسی طرح‌های اختلاط حاوی درصد‌های مختلف RCA مشاهده شد که این سنگدانه‌ها موجب کاهش سرعت موج اولتراسونیک در بتن شده‌اند. نتیجه این آزمایش برای طرح اختلاط R0-G0-F0، که حاوی ۱۰۰ درصد NA می‌باشد، ۴/۲۲ km/sec حاصل شد، که نشان دهنده‌ی تراکم خوب این نمونه می‌باشد. با جایگزینی ۵۰ درصدی NA با RCA شاهد کاهش سرعت موج اولتراسونیک تا ۴/۰۳ km/sec بودیم. با توجه به ساختار متخلخل RCA، کاهش سرعت موج اولتراسونیک در طرح‌های اختلاط حاوی این سنگدانه، نتیجه‌ای منطقی است [۴۵]. سرعت موج اولتراسونیک در نمونه R100-G0-F0، که حاوی ۱۰۰ درصد RCA بود، ۳/۷۹ km/sec بدست آمد. منصور^{۲۹} و چاکیر^{۳۰} [۴۲] کاهش ۸، ۱۰ و ۱۲ درصدی سرعت موج اولتراسونیک را در ازای استفاده از ۲۵، ۵۰ و ۱۰۰ درصد RCA گزارش کردند. تحقیقات انجام شده توسط ساسانی‌پور^{۳۱} و همکاران [۴۶] نیز نشان داد که جایگزینی ۲۵، ۵۰، ۷۵ و ۱۰۰ درصدی NA با RCA به ترتیب موجب کاهش ۵، ۶، ۹ و ۱۰ درصدی سرعت موج اولتراسونیک در بتن می‌شود. از طرفی، با مقایسه سرعت موج اولتراسونیک در نمونه‌های حاوی مقادیر مختلف GGBFS شاهد آن بودیم که استفاده از این سرباره موجب افزایش سرعت موج اولتراسونیک در بتن شده است. با توجه به قابلیت پرکنندگی GGBFS، افزایش سرعت موج اولتراسونیک در طرح‌های اختلاط حاوی این سرباره منطقی بنظر می‌رسد [۱۰]. جایگزینی ۱۵ و ۳۰ درصدی OPC با GGBFS موجب افزایش ۱ و ۲ درصدی سرعت موج اولتراسونیک در طرح اختلاط حاوی ۱۰۰ درصد NA و افزایش ۲ و ۳ درصدی در طرح اختلاط حاوی ۱۰۰ درصد RCA شد. از طرفی، با مقایسه سرعت موج اولتراسونیک در نمونه‌های فاقد و حاوی الیاف فولادی شاهد آن بودیم که این الیاف نیز موجب کاهش سرعت موج اولتراسونیک در بتن شده است. استفاده ۰/۵ و ۱ درصد حجمی الیاف فولادی موجب کاهش ۱ و ۲ درصدی سرعت موج اولتراسونیک در طرح اختلاط حاوی ۱۰۰ درصد NA و کاهش ۱ و ۳ درصدی در طرح اختلاط حاوی ۱۰۰ درصد RCA شده است.

29 Mansur

30 Çakır

31 Sasanipour

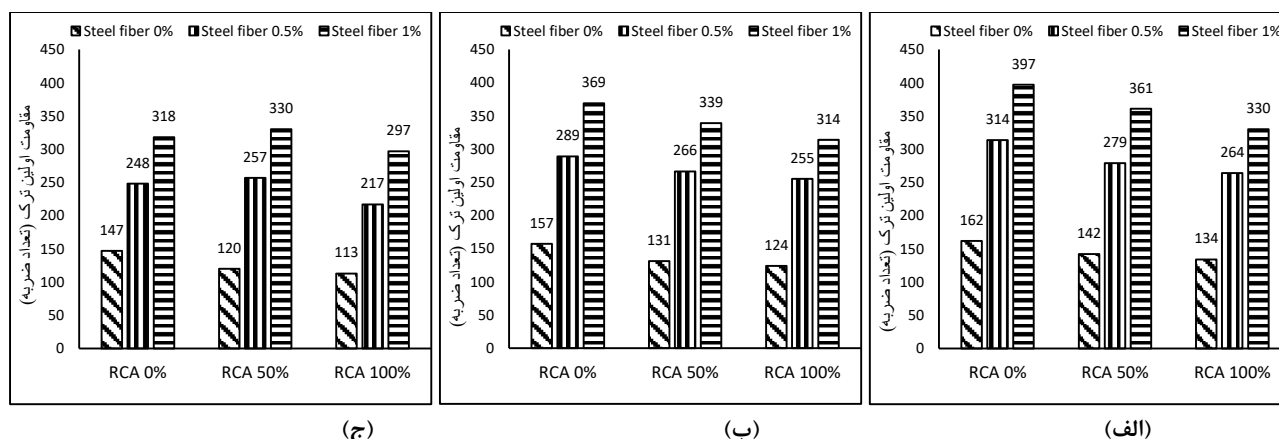
جدول ۶: نتایج آزمایش UPV.

UPV (km/sec)	طرح اختلاط	UPV (km/sec)	طرح اختلاط	UPV (km/sec)	طرح اختلاط
۳/۷۹	R100-G0-F0	۴/۰۳	R50-G0-F0	۴/۲۲	R0-G0-F0
۳/۷۴	R100-G0-F0.5	۳/۹۹	R50-G0-F0.5	۴/۱۹	R0-G0-F0.5
۳/۶۹	R100-G0-F1	۳/۹	R50-G0-F1	۴/۱۵	R0-G0-F1
۳/۸۶	R100-G15-F0	۴/۰۷	R50-G15-F0	۴/۲۸	R0-G15-F0
۳/۸	R100-G15-F0.5	۳/۹۹	R50-G15-F0.5	۴/۲۶	R0-G15-F0.5
۳/۷۸	R100-G15-F1	۳/۹۴	R50-G15-F1	۴/۲۲	R0-G15-F1
۳/۸۹	R100-G30-F0	۴/۰۹	R50-G30-F0	۴/۳۱	R0-G30-F0
۳/۸۵	R100-G30-F0.5	۴/۰۲	R50-G30-F0.5	۴/۲۵	R0-G30-F0.5
۳/۸۱	R100-G30-F1	۳/۹۷	R50-G30-F1	۴/۲۳	R0-G30-F1

۴-۲- خصوصیات ضربه‌ای

۴-۲-۱- مقاومت اولین ترک

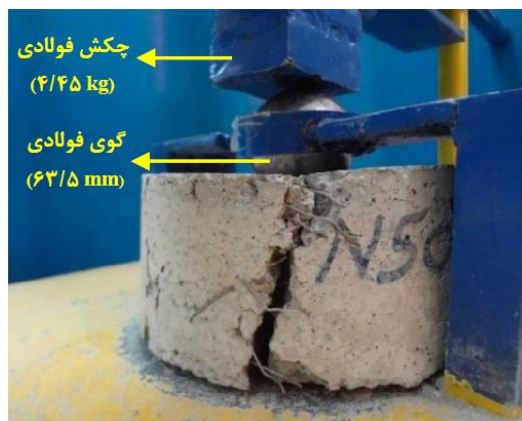
تعداد ضربات برای ایجاد اولین ترک قابل رویت در دیسک‌های بتنی ثبت و در جدول (۷) نشان داده شده است. بر اساس نتایج بدست آمده، اولین ترک قابل رویت بعد از ۱۶۲ ضربه در نمونه‌ی شاهد (R0-G0-F0) ایجاد شده است. نتایج نشان می‌دهد که جایگزینی NA با RCA موجب کاهش مقاومت ضربه‌ای اولین ترک بتن شده است. جایگزینی ۵۰ و ۱۰۰ درصدی NA با RCA به ترتیب موجب کاهش ۱۲/۴ و ۱۷/۳ درصدی مقاومت ضربه‌ای اولین ترک در طرح‌های اختلاط حاوی ۱۰۰ درصد OPC و کاهش ۱۸/۴ و ۲۳/۱ درصدی در طرح‌های اختلاط حاوی ۷۰ درصد OPC و ۳۰ درصد GGBFS شده است. بنابراین، مقاومت ضربه‌ای نمونه‌های ساخته شده با RCA در تمام طرح‌های اختلاط، اعم از طرح‌های اختلاط حاوی و فاقد GGBFS، اختلاف کمی با نمونه‌های ساخته شده با NA دارد. این نتیجه نشان داد که می‌توان از RCA بدون ایجاد کاهش قابل توجه در مقاومت ضربه‌ای استفاده نمود. از طرفی، جایگزینی OPC با GGBFS نیز موجب کاهش مقاومت ضربه‌ای اولین ترک نمونه‌ها شد. براساس نتایج بدست آمده، کاهش مقاومت اولین ترک بتن به ازای جایگزینی ۳۰ درصدی OPC با GGBFS تقریباً کمتر از ۱۵ درصد بدست آمد. کاهش مقاومت ایجاد شده در ازای جایگزینی OPC با GGBFS در تمام طرح‌های اختلاط، اعم از طرح‌های اختلاط حاوی NA، RCA و ترکیب آن‌ها، جزئی و قابل چشم‌پوشی بود. بطوریکه استفاده از ۱۵ و ۳۰ درصد GGBFS به ترتیب موجب کاهش ۳/۱ و ۹/۳ درصدی مقاومت اولین ترک در نمونه‌های حاوی ۱۰۰ درصد NA و کاهش ۷/۵ و ۱۵/۷ درصدی در نمونه‌های حاوی ۱۰۰ درصد RCA شد. از طرفی، نتایج نشان دهنده‌ی تاثیر بسیار قابل توجه الیاف فولادی در افزایش مقاومت ضربه‌ای اولین ترک بتن می‌باشد. افزودن ۱ درصد الیاف فولادی دو سر قلاب به طرح اختلاط حاوی ۱۰۰ درصد NA موجب افزایش مقاومت اولین ترک از ۱۶۲ ضربه به ۳۹۷ ضربه شد که این نتیجه نشان دهنده‌ی رشد ۱۴۵ درصدی این پارامتر می‌باشد. افزودن مقدار مشابه الیاف فولادی به طرح اختلاط حاوی ۱۰۰ درصد RCA نیز مقاومت اولین ترک را از ۱۳۴ ضربه به ۳۳۰ ضربه رساند که این نتیجه نیز نشان دهنده‌ی رشد ۱۴۶ درصدی مقاومت اولین ترک در اثر افزودن ۱ درصد الیاف فولادی می‌باشد. شکل (۷) نتایج مربوط به مقاومت اولین ترک نمونه‌ها را نشان می‌دهد. علاوه بر این، با ضرب تعداد ضربات در انرژی وارده در ازای یک ضربه (۲۰/۳۴۵ kN.mm)، انرژی جذب شده توسط نمونه‌ها تا لحظه‌ی ایجاد اولین ترک بدست آمد. نتایج این پارامتر بر حسب کیلو ژول (kJ) در جدول (۷) نشان داده شده است. نتایج مربوط به این پارامتر نیز نشان دهنده‌ی کاهش جزئی و قابل چشم‌پوشی مقاومت اولین ترک نمونه‌های حاوی RCA و GGBFS در مقایسه با نمونه‌های حاوی NA و OPC است.



شکل ۷: نتایج پارامتر مقاومت اولین ترک در طرح‌های اختلاط حاوی (الف) ۰، (ب) ۱۵ و (ج) ۳۰ درصد GGBFS.

۴-۲-۲- مقاومت نهایی

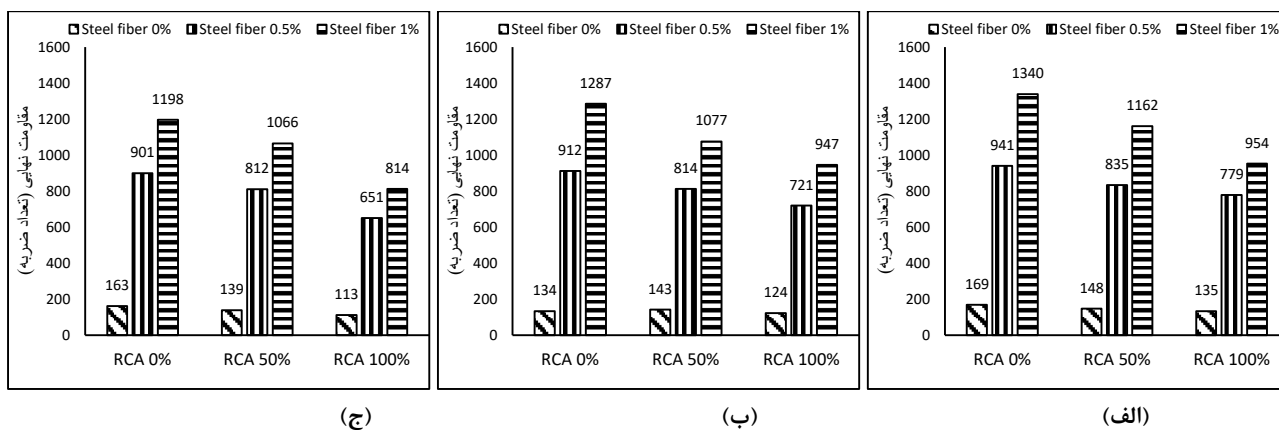
عمل ضربه زدن به نمونه‌ها تا ایجاد گسیختگی در آن‌ها ادامه پیدا کرد. تعداد ضربات برای ایجاد گسیختگی در جدول (۷) نشان داده شده است. همچنین با ضرب تعداد ضربات ثبت شده در انرژی وارده به ازای یک ضربه (۲۰/۳۴۵ kN.mm)، انرژی جذب شده توسط نمونه‌ها تا لحظه‌ی ایجاد گسیختگی بدست آمد. نتایج مربوط به این پارامتر بر حسب کیلو ژول (kJ) در جدول (۷) نشان داده شده است. نتایج بدست آمده نشان دهنده‌ی افت مقاومت نهایی نمونه‌های ساخته شده با RCA نسبت به نمونه‌های ساخته شده با NA بود. استفاده از ۵۰ و ۱۰۰ درصد RCA بعنوان جایگزین NA، به ترتیب موجب کاهش ۱۱/۸ و ۲۰/۱ درصدی انرژی جذب شده نهایی در نمونه‌های حاوی ۱۰۰ درصد OPC شد. این افت مقاومت در نمونه‌های حاوی GGBFS تشدید شد. به گونه‌ای که طرح اختلاط حاوی ۳۰ درصد GGBFS کاهش ۱۵/۲ و ۳۰/۳ درصدی انرژی جذب شده نهایی را به ترتیب در ازای استفاده از ۵۰ و ۱۰۰ درصد RCA تجربه کرد. در تحقیقات پیشین نیز کاهش مقاومت نمونه‌های حاوی RCA در آزمایش ضربه وزنه افتان گزارش شده است [۴۷]. از طرفی، جایگزینی OPC با GGBFS در نمونه‌های ساخته شده با NA، RCA و ترکیب آن‌ها موجب کاهش جزئی مقاومت ضربه‌ای نهایی شد. جایگزینی ۱۵ و ۳۰ درصدی OPC با GGBFS موجب کاهش ۳ و ۳/۶ درصدی مقاومت ضربه‌ای نهایی در طرح اختلاط حاوی ۱۰۰ درصد NA و کاهش ۸/۲ و ۱۶/۳ درصدی در طرح اختلاط حاوی ۱۰۰ درصد RCA شد. محققانی همچون گوری^{۳۲} و همکاران [۴۸] نتایج مشابهی را در آزمایش ضربه بر روی بتن‌های حاوی GGBFS گزارش کرده‌اند. از طرفی، الیاف فولادی اثر بسیار قابل توجهی در افزایش مقاومت ضربه‌ای نمونه‌های بتنی داشت. نمونه‌های الیاف فولادی مقاومت ضربه‌ای بسیار بیشتری را نسبت به نمونه‌های مشابه فاقد الیاف تجربه کردند. الیاف‌های فولادی مورد استفاده با ایجاد دوختگی در ریز ترک‌های ایجاد شده در بتن، موجب افزایش قابل ملاحظه مقاومت ضربه‌ای شدند. اشکال (۸ و ۹) عمل پل زدن الیاف بر روی ترک‌های ایجاد شده در بتن و تفاوت در نحوه گسیختگی نمونه‌های حاوی و فاقد الیاف در اثر ضربه را نشان می‌دهند. محققانی متعددی در گذشته تاثیر مثبت الیاف فولادی در افزایش مقاومت ضربه‌ای بتن را گزارش کرده‌اند [۴۹-۵۱]. مطابق با نتایج این تحقیق، افزودن ۱ درصد حجمی الیاف فولادی در بهترین وضعیت موجب افزایش تقریباً ۸ برابری جذب انرژی نهایی نمونه‌های بتنی شد. علاوه بر این، نتایج نشان دهنده‌ی آن بود که افزودن الیاف فولادی فاصله‌ی میان تعداد ضربه برای ایجاد اولین ترک و گسیختگی را بطور قابل توجهی افزایش داده است، در صورتی که جایگزینی NA با RCA موجب کاهش این فاصله شده است. در شکل (۱۰) نتایج مقاومت نهایی نمونه‌ها در آزمایش مقاومت ضربه‌ای نشان داده شده است. در نهایت، با انجام تحلیل رگرسیون میان پارامتر جذب انرژی نهایی نمونه‌ها و مقدار RCA مورد استفاده در آن‌ها، این نتیجه حاصل شد که میان این دو پارامتر رابطه‌ای خطی و معکوس برقرار است. نتیجه‌ی این تحلیل بدان معناست که هرچه میزان جایگزینی NA با RCA در ساخت بتن افزایش یابد، جذب انرژی ضربه‌ای بتن با شیب ثابتی کاهش پیدا خواهد کرد. نتایج مربوط به این تحلیل در شکل (۱۱) نشان داده شده است.



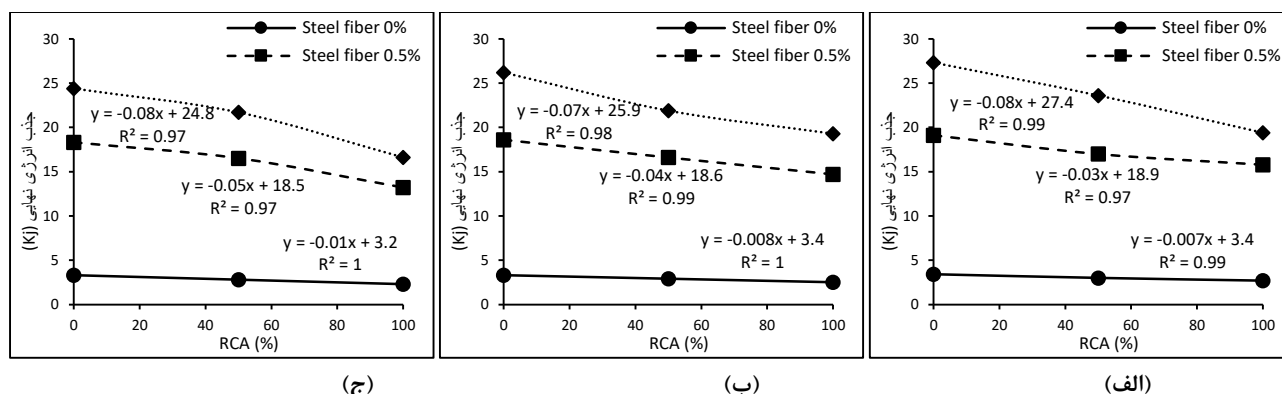
شکل ۸: دوختگی ترک‌ها توسط الیاف‌های فولادی در آزمایش ضربه وزنه افتان.



شکل ۹: تفاوت در نحوه گسیختگی نمونه‌های حاوی و فاقد الیاف در آزمایش ضربه وزنه افتان.



شکل ۱۰: نتایج پارامتر مقاومت نهایی در طرح‌های اختلاط حاوی (الف) ۰، (ب) ۱۵ و (ج) ۳۰ درصد GGBFS.



شکل ۱۱: نتایج تحلیل رگرسیون میان پارامتر جذب انرژی و میزان RCA در طرح‌های اختلاط حاوی (الف) ۰، (ب) ۱۵ و (ج) ۳۰ درصد GGBFS.

۴-۲-۳- تحلیل آماری نتایج

در چند دهه‌ی گذشته مدل‌های احتمالاتی متنوعی برای آنالیز آماری مقاومت ضربه‌ای بتن ارائه شده است. کارایی روش توزیع دو پارامتری Weibull در این زمینه توسط برخی محققین ثابت شده است [۵۲ و ۵۳]. بنابراین، در این تحقیق به منظور انجام آنالیز آماری بر روی نتایج آزمایش ضربه وزنه افتان، توزیع دو پارامتری Weibull از طریق روش گرافیکی مورد استفاده قرار گرفته است [۵۴]. تابع توزیع تجمعی $F(n)$ مربوط به قانون احتمال دو پارامتری Weibull به صورت تابع چگالی احتمال، مطابق رابطه (۴) بیان می‌شود [۵۵].

$$F(n) = 1 - \exp \left[- \left(\frac{n}{u} \right)^\alpha \right] \quad (4)$$

که در آن، n دوام ضربه‌ای بتن، α شیب Weibull و u پارامتر مقیاس است. تابع $F(n)$ بیان کننده‌ی احتمال شکست است. بنابراین، تابع احتمال بقا توسط رابطه (۵) ارائه می‌شود.

$$L(n) = 1 - F(n) = \exp \left[- \left(\frac{n}{u} \right)^\alpha \right] \quad (5)$$

رابطه (۶) با گرفتن دو بار لگاریتم طبیعی از طرفین رابطه (۵) حاصل شد.

$$\ln \ln \left(\frac{1}{L(n)} \right) = \alpha \ln(n) - \alpha \ln(u) \quad (6)$$

همانطور که در روابط (۷ و ۸) نشان داده شده است، رابطه (۶) بیان کننده‌ی یک رابطه خطی میان $\ln(n)$ و $\ln \ln \left(\frac{1}{L(n)} \right)$ می‌باشد.

$$Y = \ln \ln \left(\frac{1}{L(n)} \right), X = \ln(n), \beta = \alpha \ln(u) \quad (7)$$

$$Y = \alpha X - \beta \quad (8)$$

تابع بقای تجربی $L(n)$ برای داده‌های آزمایش ضربه مطابق با رابطه (۹) بدست آمد [۵۶-۵۸].

$$L = 1 - \frac{i}{1+k} \quad (9)$$

که در آن، i ترتیب شماره نمونه‌های آزمایش شده ($i = 1, 2, 3, 4$) و k تعداد کل نمونه‌های ضربه‌ای برای یک گروه خاص است. در این روش، نمودار بین X و Y بر اساس رابطه (۸) ترسیم شد. چنانچه بین X و Y رابطه‌ای خطی حاصل شود، این روش بعنوان یک روش آماری مناسب برای بیان مقاومت اولین ترک (N_1) و مقاومت نهایی (N_2) تلقی می‌شود. با توجه به معادلات بدست آمده از طریق رگرسیون خطی

بین X و Y ، ضرایب α و β در رابطه (V) و ضریب تعیین (R^2) بدست آمد. آنالیز داده‌های تجربی برای مقاومت اولین ترک (N_1) و مقاومت نهایی (N_2) برای درصدهای مختلف RCA، GGBFS و الیاف فولادی در نمودارهای اشکال (۱۲ و ۱۳) نشان داده شده است. علاوه بر این، ضرایب α ، β و R^2 بدست آمده برای N_1 و N_2 در جدول (۸) نشان داده شده است. تمامی نتایج بدست آمده برای ضریب تعیین (R^2) بیشتر از ۰/۹ هستند، که این موضوع نشان دهنده‌ی آن است که توزیع دو پارامتری Weibull یک روش مناسب برای تجزیه و تحلیل آماری مقاومت ضربه‌ای بتن‌های الیافی حاوی RCA و GGBFS است.

جدول ۷: نتایج آزمایش ضربه وزنه افتان.

طرح اختلاط	مقاومت ضربه‌ای		جذب انرژی ضربه‌ای (kJ)	
	اولین ترک (N_1)	نهایی (N_2)	اولین ترک	نهایی
R0-G0-F0	۱۶۲	۱۶۹	۳/۳	۳/۴
R0-G0-F0.5	۳۱۴	۹۴۱	۶/۴	۱۹/۱
R0-G0-F1	۳۹۷	۱۳۴۰	۸/۱	۲۷/۳
R0-G15-F0	۱۵۷	۱۶۴	۳/۲	۳/۳
R0-G15-F0.5	۲۸۹	۹۱۲	۵/۹	۱۸/۶
R0-G15-F1	۳۶۹	۱۲۸۷	۷/۵	۲۶/۲
R0-G30-F0	۱۴۷	۱۶۳	۳	۳/۳
R0-G30-F0.5	۲۴۸	۹۰۱	۵	۱۸/۳
R0-G30-F1	۳۱۸	۱۱۹۸	۶/۵	۲۴/۴
R50-G0-F0	۱۴۲	۱۴۸	۲/۹	۳
R50-G0-F0.5	۲۷۹	۸۳۵	۵/۷	۱۷
R50-G0-F1	۳۶۱	۱۱۶۲	۷/۳	۲۳/۶
R50-G15-F0	۱۳۱	۱۴۳	۲/۷	۲/۹
R50-G15-F0.5	۲۶۶	۸۱۴	۵/۴	۱۶/۶
R50-G15-F1	۳۳۹	۱۰۷۷	۶/۹	۲۱/۹
R50-G30-F0	۱۲۰	۱۳۹	۲/۴	۲/۸
R50-G30-F0.5	۲۵۷	۸۱۲	۵/۲	۱۶/۵
R50-G30-F1	۳۳۰	۱۰۶۶	۶/۷	۲۱/۷
R100-G0-F0	۱۳۴	۱۳۵	۲/۷	۲/۷
R100-G0-F0.5	۲۶۴	۷۷۹	۵/۴	۱۵/۸
R100-G0-F1	۳۳۰	۹۵۴	۶/۷	۱۹/۴
R100-G15-F0	۱۲۴	۱۲۴	۲/۵	۲/۵
R100-G15-F0.5	۲۵۵	۷۲۱	۵/۲	۱۴/۷
R100-G15-F1	۳۱۴	۹۴۷	۶/۴	۱۹/۳
R100-G30-F0	۱۱۳	۱۱۳	۲/۳	۲/۳
R100-G30-F0.5	۲۱۷	۶۵۱	۴/۴	۱۳/۲
R100-G30-F1	۲۹۷	۸۱۴	۶	۱۶/۶

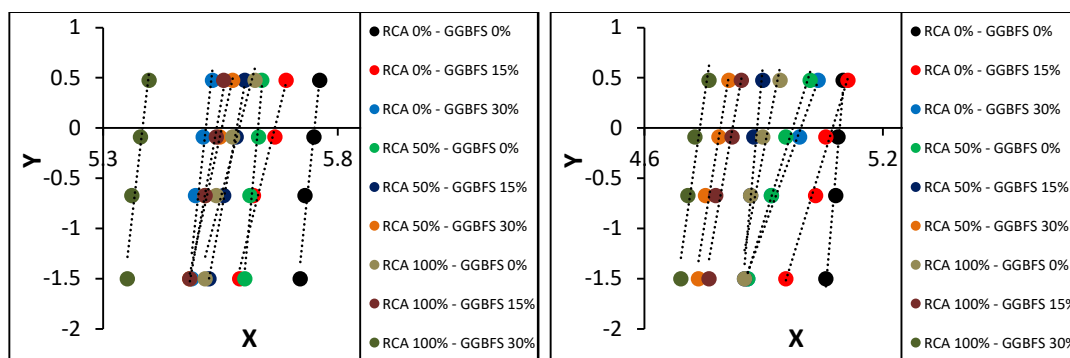
جدول ۸: رگرسیون خطی نتایج آزمایش مقاومت ضربه‌ای در توزیع آماری Weibull.

شاخص	طرح اختلاط	α	β	R^2	شاخص	طرح اختلاط	α	β	R^2
	R0-G0-F0	۴۰/۲۱	-۲۳۰/۱۷	۰/۹۶۷		R0-G0-F0	۱۳/۸۲	-۷۰/۹۵	۰/۹۶۳
	R0-G0-F0.5	۴۴/۰۷	-۲۵۳/۴۳	۰/۹۶۱		R0-G0-F0.5	۲۶/۸۲	-۱۸۳/۷۲	۰/۹۹۳
	R0-G0-F1	۸/۳۶	-۵۰/۰۷	۰/۹۵۱		R0-G0-F1	۱۰/۰۱	-۷۲/۱۴	۰/۹۸۶
	R0-G15-F0	۱۲/۹۳	-۶۵/۵۸	۰/۹۸۵		R0-G15-F0	۱۴/۴۳	-۷۳/۵۵	۰/۹۶۴
	R0-G15-F0.5	۱۸/۶۵۱	-۱۰۵/۶۷	۰/۹۷۶		R0-G15-F0.5	۳۶/۸۲	-۲۵۱/۰۵	۰/۹۹۶
	R0-G15-F1	۱۱/۶۶	-۶۹	۰/۹۹۷		R0-G15-F1	۹/۰۹	-۶۴/۹۹	۰/۹۶۲
	R0-G30-F0	۱۰/۷۹	-۵۳/۸۵	۰/۹۹۰		R0-G30-F0	۱۴/۱۶	-۷۲/۲۲	۰/۹۶۸
	R0-G30-F0.5	۴۱/۴۸	-۲۲۸/۹۱	۰/۹۲۸		R0-G30-F0.5	۲۲/۸۸	-۱۵۵/۶۳	۰/۹۸۳
	R0-G30-F1	۷/۰۹	-۳۹/۲۶	۰/۹۷۱		R0-G30-F1	۲۳/۰۸	-۱۵۷/۱۹	۰/۹۵۹
	R50-G0-F0	۱۲/۷۳	-۶۳/۲۹	۰/۹۸۷		R50-G0-F0	۲۸/۷۵	-۱۴۳/۸۴	۰/۹۷۸
	R50-G0-F0.5	۵۰/۱۸۱	-۲۸۲/۵۲	۰/۹۶۹		R50-G0-F0.5	۲۰/۱۰	-۱۳۵/۵۷	۰/۹۲۴
	R50-G0-F1	۱۰	-۵۹/۱۰	۰/۹۹۱		R50-G0-F1	۷/۷۶	-۵۵/۰۳	۰/۹۷۵
	R50-G15-F0	۴۳/۰۸۶	-۲۱۰/۴۱	۰/۹۴۷		R50-G15-F0	۴۲/۰۷۱	-۲۰۸/۸۶	۰/۹۳۴
	R50-G15-F0.5	۲۵/۳۰	-۱۴۱/۲۹	۰/۹۹۷	N_2	R50-G15-F0.5	۱۶/۰۹	-۱۰۷/۸۸	۰/۹۷۴
	R50-G15-F1	۱۴/۶۲	-۸۵/۱۷	۰/۹۸۷		R50-G15-F1	۱۴/۰۸	-۹۸/۲۶	۰/۹۸۰
	R50-G30-F0	۲۴/۳۱	-۱۱۶/۴۸	۰/۹۵۶		R50-G30-F0	۲۷/۳۷	-۱۳۴/۹۷	۰/۹۶۸
	R50-G30-F0.5	۲۱/۳۸	-۱۱۸/۷۰	۰/۹۹۶		R50-G30-F0.5	۱۹/۱۱	-۱۲۸/۲۸	۰/۹۸۱
	R50-G30-F1	۱۸/۷۳	-۱۰۸/۸۵	۰/۹۴۳		R50-G30-F1	۸/۶۵	-۶۰/۲۸	۰/۹۵۳
	R100-G0-F0	۲۰/۴۳	-۱۰۰/۳۵	۰/۹۱۲		R100-G0-F0	۲۰/۸۱۴	-۱۰۲/۱۸	۰/۹۷۱
	R100-G0-F0.5	۱۷/۷۱	-۹۸/۹۶	۰/۹۴۲		R100-G0-F0.5	۱۹/۴۰	-۱۲۹/۱۲	۰/۹۴۳
	R100-G0-F1	۱۴/۵۲	-۸۴/۳۹	۰/۹۹۰		R100-G0-F1	۲۹/۰۵	-۱۹۹/۳۹	۰/۹۵۱
	R100-G15-F0	۲۱/۹۳	-۱۰۵/۷۳	۰/۹۴۹		R100-G15-F0	۲۶/۸۳	-۱۲۹/۴۳	۰/۹۱۳
	R100-G15-F0.5	۲۶/۸۶	-۱۴۸/۸۳	۰/۹۹۵		R100-G15-F0.5	۳۶/۹۲	-۲۴۳/۱۳	۰/۹۴۱
	R100-G15-F1	۱۷/۰۹	-۹۸/۶۴	۰/۹۳۶		R100-G15-F1	۳۲/۷۰	-۲۲۴/۳۴	۰/۹۸۸
	R100-G30-F0	۲۷/۰۷	-۱۲۸/۳	۰/۹۳۷		R100-G30-F0	۲۲/۵۵	-۱۰۶/۸۲	۰/۹۸۶
	R100-G30-F0.5	۴۰/۰۴	-۲۱۵/۴۰	۰/۹۴۶		R100-G30-F0.5	۳۱/۶۳	-۲۰۵/۰۹	۰/۹۷۸
	R100-G30-F1	۱۶/۶۲	-۹۴/۸۰	۰/۹۹۸		R100-G30-F1	۱۷/۱۰	-۱۱۴/۶	۰/۹۸۴

۵- نتایج

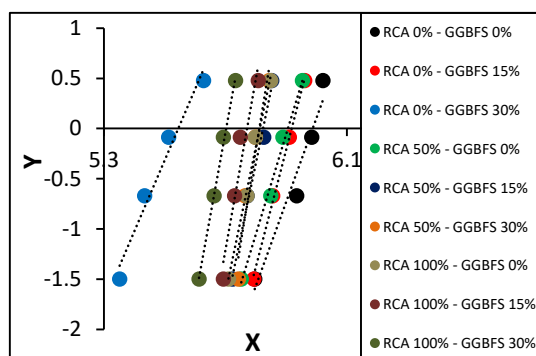
محققان در این پژوهش مقاومت ضربه‌ای و خصوصیات مکانیکی بتن‌های سازگار با محیط زیست را تحت اثر ضربه وزنه افتان بررسی کردند. بدین منظور، در ساخت بتن، RCA جایگزین NA و GGBFS جایگزین OPC شد. علاوه بر این، نمونه‌ها با ۰، ۵ و ۱ درصد حجمی الیاف فولادی دو سر قلاب مسلح شدند. با انجام آزمایش‌های مختلف، نتایج زیر بصورت خلاصه حاصل شد:

- نتایج آزمایش UPV نشان داد که جایگزینی NA با RCA و همچنین استفاده از الیاف فولادی از کیفیت بتن می‌کاهد. از طرفی، GGBFS با توجه به ساختار پرکنندگی خود موجب افزایش سرعت موج اولتراسونیک در بتن می‌شود.
- نتایج آزمایش مقاومت فشاری نشان دهنده‌ی تاثیر منفی RCA و GGBFS بر مقاومت فشاری بتن بود. جایگزینی ۱۰۰ درصدی NA با RCA و ۳۰ درصدی OPC با GGBFS به ترتیب موجب کاهش ۲۰/۱ و ۱۲ درصدی مقاومت فشاری شد.



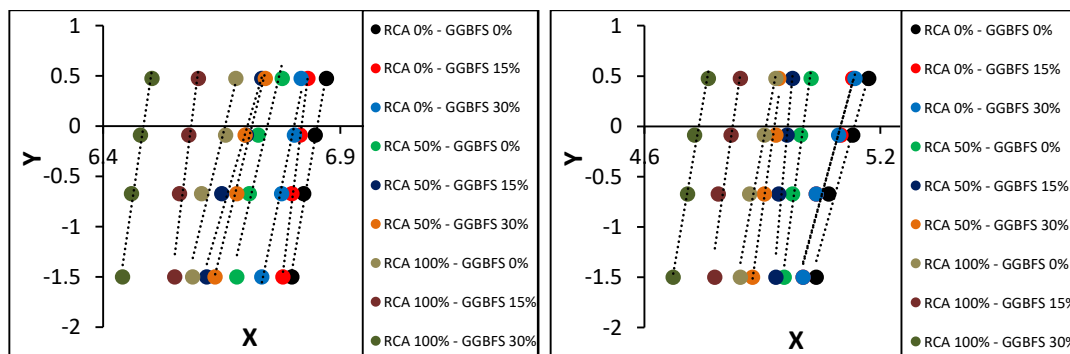
(ب)

(الف)



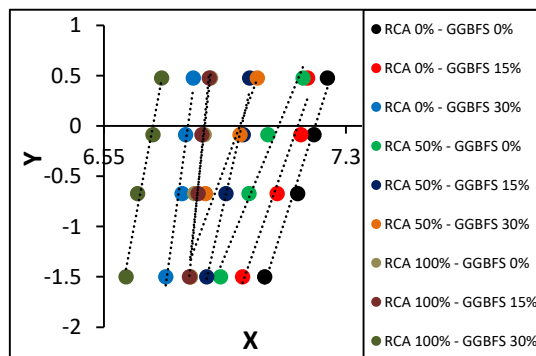
(ج)

شکل ۱۲: رگرسیون خطی N_1 در توزیع Weibull برای نمونه‌های دیسکی حاوی (الف) ۰، (ب) ۵/۰ و (ج) ۱ درصد الیاف فولادی.



(ب)

(الف)



(ج)

شکل ۱۳: رگرسیون خطی N_2 در توزیع Weibull برای نمونه‌های دیسکی حاوی (الف) ۰، (ب) ۵/۰ و (ج) ۱ درصد الیاف فولادی.

- ۳) نمونه‌های حاوی الیاف فولادی رفتار دوگانه‌ای را در آزمایش مقاومت فشاری از خود نشان دادند. به گونه‌ای که افزودن ۰/۵ و ۱ درصد الیاف فولادی به ترتیب موجب افزایش ۶/۷ درصدی و کاهش ۵/۷ درصدی مقاومت فشاری شد. بنابراین، الیاف فولادی بایستی به اندازه‌ی مناسب در بتن مورد استفاده قرار گیرد، زیرا استفاده بیش از حد از آن موجب کاهش مقاومت فشاری می‌شود.
- ۴) نتایج آزمایش مقاومت ضربه‌ای نشان دهنده‌ی تاثیر منفی RCA بر مقاومت اولین ترک و مقاومت نهایی نمونه‌های بتنی بود. استفاده از ۵۰ و ۱۰۰ درصد RCA به ترتیب موجب کاهش ۱۲/۴ و ۱۷/۳ درصدی مقاومت اولین ترک و ۱۲/۴ و ۱۷/۳ درصدی مقاومت نهایی شد.
- ۵) جایگزینی OPC با GGBFS موجب کاهش مقاومت ضربه‌ای نمونه‌های بتنی شد. تاثیر منفی GGBFS در نمونه‌های حاوی RCA قابل توجه‌تر بود. استفاده از ۱۵ درصد GGBFS در نمونه‌های ساخته شده با NA و RCA به ترتیب موجب کاهش ۳/۱ و ۷/۵ درصدی مقاومت اولین ترک و ۳ و ۸/۲ درصدی مقاومت نهایی شد. این در صورتی است که استفاده ۳۰ درصدی از GGBFS مقاومت اولین ترک و نهایی نمونه‌های ساخته شده با NA را به ترتیب ۹/۳ و ۳/۶ درصد و مقاومت اولین ترک و نهایی نمونه‌های ساخته شده با RCA را به ترتیب ۱۵/۷ و ۱۶/۳ درصد کاهش داد.
- ۶) استفاده از الیاف‌های فولادی موجب افزایش قابل ملاحظه‌ی مقاومت اولین ترک و نهایی نمونه‌ها شد و توانست ضعف مربوط به استفاده از RCA و GGBFS را برطرف نماید. نتایج نشان داد که افزودن ۰/۵ و ۱ درصدی الیاف فولادی به ترتیب موجب افزایش ۵/۶ و ۸ برابری مقاومت ضربه‌ای نهایی شده است.
- ۷) با انجام تحلیل آماری بر روی نتایج آزمایش مقاومت ضربه‌ای، توزیع دو پارامتری Weibull بعنوان یک توزیع آماری مناسب در مورد مقاومت ضربه‌ای بتن‌های الیافی حاوی RCA و GGBFS شناخته شد.

مراجع

- [1] Meyer. C. (2008). The greening of the concrete industry. *Cement and concrete composites*, 31 (8), 601–605.
- [2] Pachideh. Gh, Gholhaki. M. (2021). An experimental investigation into effect of temperature rise on mechanical and visual characteristics of concrete containing recycled metal spring. *Structural Concrete*, 22 (1), 550-565.
- [3] Pachideh. Gh, Gholhaki. M, Moshtagh. A. (2021). An experimental investigation into effect of temperature rise on mechanical and visual characteristics of concrete containing recycled metal spring. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Structures and Buildings*, 173 (1), 3-16.
- [4] Omidinasab. F, Moazami Goodarzi. F, Sahraei Moghadam. A. (2021). Characterization and Optimization of Mechanical and Impact Properties of Steel Fiber Reinforced Recycled Concrete. *International Journal of Civil Engineering*, 20, 41-55.
- [5] Seddighi. F, Pachideh. GH, Salimbahrami. SB. (2021). A study of mechanical and microstructures properties of autoclaved aerated concrete containing nano-graphene. *Journal of Building Engineering*, 43, 103106.
- [6] Vazqnez. E, Bara. M. (1996). The influence of retained moisture in aggregates from recycling on the properties of new hardened concrete. *Waste management*, 16 (1-3), 113-117.
- [7] Sahraei Moghadam. A, Omidinasab. F, Abdalikia. M. (2021). The effect of initial strength of concrete wastes on the fresh and hardened properties of recycled concrete reinforced with recycled steel fibers. *Construction and Building Materials*, 300, 124284.
- [8] Yu. R, Spiesz. P, Brouwers. H.J.H. (2015). Development of an eco-friendly Ultra- High Performance Concrete (UHPC) with efficient cement and mineral admixtures uses. *Cement and Concrete Composites*, 55, 383-394.
- [9] Khan. M.I, Siddique. R. (2011). Utilization of silica fume in concrete: Review of durability properties. *Resources, Conservation and Recycling*, 57, 30-35.
- [10] Sahraei Moghadam. A, Omidinasab. F, Moazami Goodarzi. S. (2021). Characterization of concrete containing RCA and GGBFS: Mechanical, microstructural and environmental properties. *Construction and Building Materials*, 289, 123134.
- [11] Gholhaki. M, Pachideh. GH, Rezayfar. O. (2017). Experimental Study on Mechanical Properties of Concrete Containing Steel Fibres, and Polypropylene in high temperatures. *Journal of Structural and Construction Engineering*, 4 (3), 167-179.

- [12] Pachideh. GH, Gholhaki. M. (2020). An experimental study on the performance of fine-grained concrete incorporating recycled steel spring exposed to acidic conditions. *Advances in Structural Engineering*, 23 (11), 2458-2470.
- [13] Ramakrishna. G, Sundararajan. T. (2005). Impact strength of a few natural fibre reinforced cement mortar slabs: a comparative study. *Cement & Concrete Composites*, 27, 547-553.
- [14] Sahraei Moghadam. A, Omidinasab. F. (2020). Assessment of hybrid FRSC cementitious composite with emphasis on flexural performance of functionally graded slabs. *Construction and Building Materials*, 250, 118904.
- [15] Sahraei Moghadam. A, Omidinasab. F. (2021) Effect of Purposive Distribution of Fibers to Prevent the Penetration of Bullet in Concrete Walls. *KSCE J Civ Eng*, 25, 843-853.
- [16] Ajdukiewicz. A, Kliszczewicz. A. (2002). Influence of recycled aggregates on mechanical properties of HS/HPC. *Cement and concrete composites*, 24 (2), 269-279.
- [17] Pacheco. J, de Brito. J, Chastre. C, Evangelista. L. (2019). Experimental investigation on the variability of the main mechanical properties of concrete produced with coarse recycled concrete aggregates. *Construction and Building Materials*, 201, 110-120.
- [18] Yang. S. (2018). Effect of different types of recycled concrete aggregates on equivalent concrete strength and drying shrinkage properties. *Applied Sciences*, 8 (11), 2190.
- [19] Knaack. M, Kurama. C. (2015). Behavior of reinforced concrete beams with recycled concrete coarse aggregates. *Structural Engineering*, 141 (3), B4014009.
- [20] Arora. A, Singh. S.P. (2018). Probability of flexural fatigue failure of concrete made with recycled concrete aggregate. *Materials Science and Engineering*, 431, 102004.
- [21] Saini. B.S, Singh. S.P. (2020). Flexural fatigue life analysis of self compacting concrete containing 100% coarse recycled concrete aggregates. *Construction and Building Materials*, 253, 119176.
- [22] Bouikni. A, Swamy. R.N, Bali. A. (2009). Durability properties of concrete containing 50% and 65% slag. *Construction and Building Material*, 23, 2836-2845.
- [23] Afroughsabet. V, Biolzi. L, Ozbakkaloglu. T. (2017). Influence of double hooked-end steel fibers and slag on mechanical and durability properties of high performance recycled aggregate concrete. *Composite Structures*, 181, 273-284.
- [24] Soroushian. P, Khan. A, Hsu. J.W. (1992). Mechanical properties of concrete materials reinforced with polypropylene or polyethylene fibers. *ACI Materials Journal*, 89 (6), 535-540.
- [25] Prasad. M.L.V, Kumar. R. (2007). Mechanical Propertis of fiber Reinforced Concretes Produced from Building Demolished Waste. *Environmental Researh And Development*, 2 (2), 180-187.
- [26] Bindiganavile. V, Banthia. N. (2001). Polymer and steel fiber-reinforced cementitious composites under impact loading_Part 2: Flexural toughness. *ACI Materials Journal*, 98 (1), 17-24.
- [27] Chaboki. H.R, Ghalehnovi. M, Karimipour. A, Brito. J. (2018). Experimental study on the flexural behaviour and ductility ratio of steel fibres coarse recycled aggregate concrete beams. *Construction and Building Materials*, 186, 400-422.
- [28] Deng. Z, Li. J. (2007). Tension and impact behaviors of new type fiber reinforced concrete. *Computers and Concrete*, 4, 19-32.
- [29] ASTM C150 (2012). "Standard Specification for Portland Cement".
- [30] ASTM C 39/C 39M-03 (2003). "Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens."
- [31] ASTM C 642-13 (2013). "Standard Test Method for Density, Absorption, and Voids in Hardened Concrete."
- [32] BS 1881 - Part 201 \Guide to the use of nondestructive methods of test for hardened concrete", British Standards Institution (2009).
- [33] ACI Committee 544, Measurement of properties of fiber reinforced concrete, *ACI Mater. J.* 85 (1988) 583-593.
- [34] Senˆas. L, Priano. C, Marfil. S. (2016). Influence of recycled aggregates on properties of self-consolidating concretes. *Constr Build Mater*, 113, 498-505.
- [35] Tabsh. S.W, Abdelfatah. A.S. (2009). Influence of recycled concrete aggregates on strength properties of concrete. *Constr Build Mater*, 23, 1163-1167.
- [36] Olorunsogo. F.T, Padayachee. N. (2002). Performance of recycled aggregate concrete monitored by durability indexes. *Cem Concr Res*, 32, 179-185.
- [37] Sagoe-Crentsil. K.K, Brown. T, Taylor. A.A. (2001). Performance of concrete made with commercially produced coarse recycled concrete aggregate. *Cem Concr Res*, 31, 707-712.
- [38] Aslani. F, Nejadi. S. (2013). 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, 121-133.

- [39] Khaloo. A, Molaei Raisi. E, Hosseini. P, Tahsiri. H. (2014). Mechanical performance of self-compacting concrete reinforced with steel fibers. *J. Constr. Build. Mater*, 51, 179–186.
- [40] Oliveira. M.E, Assis. C.C, Terni. A.W. (2008). 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*. 636- 642.
- [41] Matias. D, Brito. J, Rosa. A, Pedro. D. (2014). Durability of concrete with recycled coarse aggregates: influence of superplasticizers. *Journal of materials in civil engineering*, 26 (7), 06014011.
- [42] Mansur. M, Çakır. Ö. (2017). An Investigation on Mechanical and Physical Properties of Recycled Coarse Aggregate (RCA) Concrete with GGBFS. *Int J Civ Eng*, 15, 549–563.
- [43] Correia. J.R, Brito. J, Pereira. A.S. (2006). Effects on concrete durability of using recycled ceramic aggregates. *Materials and Structures*, 39 (2), 169-177.
- [44] Bravo. M, Brito. J, Pontes. J, Evangelista. J. (2015). Durability performance of concrete with recycled aggregates from construction and demolition waste plants. *Construction and Building Materials*, 77, 357-369.
- [45] Behera. M, Bhattacharyya. S.K, Minocha. A.K, Deoliya. R, Maiti. S. (2014). Recycled aggregate from C&D waste & its use in concrete—A breakthrough towards sustainability in construction sector: A review. *Constr. Build. Mater*, 68, 501–516.
- [46] Sasanipour. H, Aslani. F, Taherinezhad. J. (2019). Effect of silica fume on durability of self-compacting concrete made with waste recycled concrete aggregates. *Construction and Building Materials*, 227, 116598.
- [47] Nazarimofrada. E, Shaikhb. F, Nili. M. (2017). Effects of steel fibre and silica fume on impact behaviour of recycled aggregate concrete. *Journal of Sustainable Cement-Based Materials*, 6 (1), 54-68.
- [48] Gowri. T.V, Sravana. P, Rao. P.S. (2016). Impact Resistance Of Fibre Reinforced High Volumes Of Slag Concrete For Rigid Pavements. *IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering*, 13 (1), 36-45.
- [49] Öksal. F, Altun. F, Yigit. L, Sahin. Y. (2008). Combined effect of silica fume and steel fiber on the mechanical properties of high strength concretes. *Construction and Building Materials*, 22 (8), 1874-1880.
- [50] Sahraei Moghadam. A, Omidinasab. F. (2021). Flexural and impact performance of functionally graded reinforced cementitious composite (FGRCC) panels. *Structures*, 29, 1723–1733.
- [51] Sahraei Moghadam. A, Omidinasab. F, Dalvand. A. (2020). Experimental investigation of (FRSC) cementitious composite functionally graded slabs under projectile and drop weight impacts. *Construction and Building Materials*, 237, 117522.
- [52] Li. J, Zhang. K, Deng. Z. (2007). Distribution regularity of flexural impact resistance of synthetic macro-fiber reinforced concrete. *Journal of Architectural Engineering*, 24, 54–59.
- [53] Raif. S, Irfan. A. (2008). Statistical analysis of bending fatigue life data using Weibull distribution in glass-fiber reinforced polyester composites. *Materials & Design*, 29, 1170–1181.
- [54] Goel. S, Singh. S.P, Singh. P. (2012). Fatigue analysis of plain and fiber-reinforced self-consolidating concrete. *ACI Materials Journal*, 109, 573–582.
- [55] Ding. Y, Li. D, Zhang. Y, Azevedo. C. (2017). Experimental investigation on the composite effect of steel rebars and macro fibers on the impact behavior of high performance self-compacting concrete. *Construction and Building Materials*, 136, 495–505.
- [56] Mastali. M, Dalvand. A, Sattarifard. A.R, Abdollahnejad. Z, Illikainen. M. (2018). Characterization and optimization of hardened properties of selfconsolidating concrete incorporating recycled steel, industrial steel, polypropylene and hybrid fibers. *Composites Part B*, 151, 186–200.
- [57] Li. H, Zhang. M, Ou. J. (2007). Flexural fatigue performance of concrete containing nanoparticles for pavement. *International Journal of Fatigue*, 29, 1292–1301.
- [58] Wang. L, Wang. H, Jia. J. (2009). Impact resistance of steel-fibre-reinforced lightweight-aggregate concrete. *Magazine of Concrete Research*, 67, 539–547.