

A. Eskandari

Faculty of Engineering,
Lorestan University.

e-mail:
askandari71@gmail.com

F. Omidinasab*

Faculty of Engineering,
Lorestan University.

e-mail: omidinasab.f@lu.ac.ir

A. Dalvand

Faculty of Engineering,
Lorestan University.

e-mail: dalvand.a@lu.ac.ir

Experimental Study to Improve the Flexural Behavior of Recycled Reinforced Concrete Beams Using Separate and Hybrid Fibers of Steel and Kortta

Given that in the last one or two decades, research on fiber concrete has developed well and is currently considered as one of the important research axes in concrete technology. Also the use of concrete with recycled aggregates for which research is increasing. Due to the use of recycled aggregates, some of their mechanical properties are weaker than concrete with natural aggregates, and therefore the use of fibers in concrete construction has strengthened some mechanical properties of concrete and the weaknesses of concrete in these mechanical properties have been eliminated to a large extent. In the present study, different fibers in terms of material and materials have been used separately and in combination in concrete with recycled aggregates and the flexural behavior parameters of these beams made with them have been investigated and compared. For this purpose, two types of steel fibers and Kortta were used separately and in combination in making beams with real dimensions (three beam samples). Also, to compare the results, two samples of beams without fibers with natural and artificial aggregates were made and the results of fiber beams with recycled aggregates were compared with them. Four-point flexural strength test was performed on the samples. Fracture mode and flexural behavior parameters of beams with recycled aggregates were investigated. The results showed that the addition of composite fibers has a much better effect on improving the flexural behavior of reinforced concrete beams than individual fibers and eliminates the weakness of using recycled aggregates in the flexural behavior of beams.

Keywords: Separate Fibers, Hybrid Fibers, Flexural Behavior, Reinforced Concrete Beam, Recycled Aggregate.

* Corresponding author

Received 05 July 2021, Revised 17 August 2021, Accepted 27 August 2021.
DOI: 10.22091/cer.2021.7119.1266

مطالعه آزمایشگاهی بهبود رفتار خمشی تیرهای بتن مسلح بازیافته از الیاف مجزا و هیبریدی فولادی و کورتا

عباس اسکندری

دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه
لرستان.

پست الکترونیک:

Askandari71@gmail.com

فریدون امیدی نسب*

دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه
لرستان.

پست الکترونیک:

Omidinasab.f@lu.ac.ir

احمد دالوند

دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه
لرستان.

پست الکترونیک:

Dalvand.a@lu.ac.ir

با توجه به اینکه در یکی دو دهه اخیر، تحقیقات در خصوص بتن‌های الیافی گسترش خوبی داشته و در حال حاضر به عنوان یکی از محورهای تحقیقاتی مهم در تکنولوژی بتن به حساب می‌آید. همچنین استفاده از بتن‌های بازیافته که تحقیقات در مورد آنها در حال افزایش است. بهدلیل استفاده از سنگدانه بازیافته، برخی مشخصات مکانیکی آنها نسبت به بتن با سنگدانه طبیعی ضعیفتر بوده و بنابراین استفاده از الیاف در ساخت بتن باعث تقویت برخی مشخصات مکانیکی بتن شده و ضعفهای بتن در این مشخصات مکانیکی تا حدود زیادی مرفوع نموده است. در تحقیق حاضر با استفاده از الیاف مختلف از نظر جنس و مصالح و به صورت مجزا و ترکیبی در بتن‌های با سنگدانه بازیافته مورد استفاده قرار گرفته و پارامترهای رفتار خمشی این تیرهای ساخته شده با آنها مورد بررسی و مقایسه قرار گرفته است. برای این منظور از دو نوع الیاف فولادی و کورتا به صورت مجزا و ترکیبی در ساخت تیرهایی با ابعاد واقعی (سه نمونه تیر) مورد استفاده قرار گرفت. همچنین برای مقایسه نتایج، دو نمونه تیر بدون الیاف و با سنگدانه طبیعی و مصنوعی ساخته شده و نتایج تیرهای الیافی با سنگدانه بازیافته با آنها مورد مقایسه قرار گرفت. آزمایش مقاومت خمشی چهار نقطه‌ای بر روی نمونه‌ها انجام شد. مود شکست و پارامترهای رفتار خمشی تیرهای با سنگدانه‌های بازیافته مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که افزودن الیاف ترکیبی نسبت به الیاف مجزا تأثیر بسیار بهتری در بهبود رفتار خمشی تیرهای بتن مسلح داشته و ضعف استفاده از سنگدانه‌های بازیافته را در رفتار خمشی تیر برطرف می‌کند.

وازگان کلیدی: الیاف مجزا، الیاف هیبریدی، رفتار خمشی، تیر بتن مسلح، سنگدانه بازیافته.

۱- مقدمه

تقویت خواص مکانیکی بتن آغاز شد. امروزه تحقیقات گستردگی‌های در مورد استفاده از فولاد، شیشه، سرامیک و الیاف مصنوعی جهت بهبود خصوصیات مکانیکی سازه‌های بتنی انجام شده است. الیاف به طور معمول در مقدار کافی برای بهبود عملکرد شکل‌پذیری با کنترل ترک‌خوردگی‌های ماکرو و میکرو در ماتریس بتن، افزایش مقاومت کششی و کاهش ماهیت شکننده ماتریس بتن با تقویت بسیار کم مقاومت فشاری اضافه می‌شوند. علاوه بر این، تکثیر و ایجاد ترک بهدلیل کوچک شدن سنین پایین می‌تواند با استفاده از الیاف به طور قابل توجهی کاهش یابد.

بتن‌های حاوی سیمان، آب، سنگدانه، الیاف پراکنده یا یکنواخت، بتن آرمه الیافی نامیده می‌شوند. این کامپوزیت با اضافه کردن یک نوع یا ترکیبی از الیاف به مخلوط بتن معمولی به دست می‌آید. استفاده از الیاف در سازه‌های بتنی در دهه ۱۹۷۰ بهدلیل توانایی آنها در

* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۴۰۰/۰۴/۱۴، بازنگری ۱۴۰۰/۰۵/۲۶، پذیرش ۱۴۰۰/۰۶/۰۵.
DOI: 10.22091/cer.2021.7119.1266

در اثر خرابی خستگی خمثی مورد مطالعه قرار دادند. در این مطالعه، نمونه‌های $100 \times 100 \times 500$ میلی‌متر ساخته و آزمایش شدند. همچنین بارگذاری خمثی چهار نقطه‌ای استفاده شده و نتایج با نتایج آن از تیرهای بتنی مصالح طبیعی مقایسه گردید. مشاهده شد که استفاده از ۱۰۰٪ سنگدانه قابل بازیافت در بتن به جای سنگدانه طبیعی باعث عدم کارآیی خستگی می‌شود [۱۳]. چوی و یون^۲ در مورد تغییرشکل طولانی‌مدت و رفتار خمثی تیرهای بتنی مسلح با مصالح بازیافته تحقیق کردند. در این مطالعه، نمونه‌ها تحت بارگذاری طولانی‌مدت به مدت ۳۶۰ روز مورد آزمایش قرار گرفتند. نمونه‌ها با استفاده از ۱۰۰٪ سنگدانه طبیعی، ۱۰۰٪ مصالح بازیافته و ۵۰٪ مصالح طبیعی به همراه ۵۰٪ مصالح بازیافته تولید شدند. علاوه بر این، نتایج تجربی با نتایج تحلیلی آبین‌نامه ACI-318 مقایسه و یک فرمول برای محاسبه تغییرشکل خمثی بلندمدت اصلاح شد. الگوهای ترک مشابه بدون توجه به نوع مصالح مشاهده گردید، حتی اگر چندین ترک در تیرهای ساخته شده با مصالح بازیافته رخداده است [۱۴].

در تحقیقی دیگر، رفتار خمثی تیرهای بتن آرمه که با مواد زاید بازیافت شده ساخته شده، مورد مطالعه قرار گرفت. در این مطالعه از ضایعات PET^۳ به عنوان ماده بازیافته استفاده شد. مقاومت فشاری، حداكثر ظرفیت بار، رفتار تغییرشکل-بار، حالت سختی و خرابی نمونه‌ها مشخص گردید. نتایج نشان داد که پسماندهای PET تا ۱۵ درصد می‌توانند به بتن اضافه شوند [۱۵]. گائو و ژانگ^۴، عملکرد خمثی بتن بازیافت شده درشت با الیاف را ارزیابی کردند. در این مطالعه، الیاف فولادی با صفر، ۰/۵، ۱، ۱/۵ و ۲ درصد (از نظر حجم) اضافه شدند. علاوه بر این، دانه درشت بازیافته سنگدانه‌های طبیعی را صفر، ۳۰، ۵۰ و ۱۰۰ درصد (در هر حجم) جایگزین

برخی تحقیقات در خصوص استفاده از الیاف در بتن انجام شده که نتایج نشان می‌دهد خصوصیات مکانیکی در انواع بتن‌های الیافی (بتن معمولی، بتن سبک و بتن مقاومت بالا) بهبود یافته و باعث افزایش مقاومت فشاری، کششی، سایشی و ضربه‌ای بتن شده است [۱، ۲ و ۳]. استفاده از الیاف فولادی در تیرهای بتن مسلح و بررسی رفتار خمثی آنها در تحقیقات زیادی انجام شده است که نشان می‌دهد استفاده از الیاف فولادی بهبود در مقاومت نهایی خمث، رفتار شکست، رفتار ترک‌خوردگی و کرنش خمثی را بهبودی دارد [۴، ۵ و ۶]. همچنین استفاده از الیاف پلیمری نظیر پلیپروپیلن در تیرهای بتن مسلح باعث بهبود پارامترها و رفتار خمثی تیرهای بتن مسلح می‌گردد [۷ و ۸]. با افزایش مقدار الیاف، مقدار انرژی شکست افزایش یافته و نتایج استفاده از الیاف مصنوعی در بتن نشان داد مقاومت ترک‌خوردگی و رفتار پس از ترک‌خوردگی به شدت وابسته به حجم الیاف است [۹ و ۱۰]. در تعداد کمی از مطالعات نیز در اعضای بتن مسلح و همچنین تیرهای بتن مسلح از الیاف فولادی و الیاف پلیمری (که عمدتاً الیاف پلیپروپیلن بوده) استفاده شده و رفتار خمثی آنها مورد بررسی قرار گرفته است. در این مطالعات مشخص شد که الیاف فولادی تأثیر بیشتری به نسبت سایر الیاف مصنوعی بر رفتار خمثی تیرهای بتن مسلح داشته و باعث بهبود رفتار خمثی آنها می‌گردد [۱۱ و ۱۲].

استفاده از ضایعات می‌تواند به محافظت از محیط‌زیست کمک کند. از مواد بازیافته برای ساخت اعضای بتنی استفاده می‌شود. این مواد را می‌توان با سیمان و سنگدانه جایگزین کرد یا به عنوان افزودنی به مخلوط بتن اضافه کرد. تحقیقات بسیاری در مورد استفاده از مواد بازیافته به جای مصالح طبیعی انجام شده است. در سال ۲۰۱۵، آرورا و سینگ^۱ رفتار خمثی یک تیر بتنی تولید شده با ۱۰۰٪ مصالح درشت بازیافت شده را

²- Choi and Yun

³- Polyethylene terephthalate

⁴- Guo and Zhang

¹- Arora and Singh

استفاده از مصالح آجری بازیافتی نه لنگر ترک خورده‌گی و نه ظرفیت خمی نهایی نمونه‌ها را نمی‌تواند کاهش دهد [۲۲]. زانگ^۷ و همکاران از سنگدانه بازیافتی بتن با صفر، ۴۰، ۶۰ و ۱۰۰ درصد استفاده کرد. مقاومت فشاری، چگالی، نفوذپذیری آب، هدایت حرارتی و مقاومت در برابر سایش سطحی بتن بازیافتی حاوی این سنگدانه‌ها تعیین شد. با توجه به نتایج، اگرچه مصالح بازیافتی ضعیفتر از سنگدانه‌های طبیعی بودند، اما در تقویت پیوند و مقاومت در برابر سایش به دلیل پیوند بهتر میان مصالح بازیافتی و خمیر سیمان به دلیل افزایش تخلخل سطح و زبری سنگدانه‌های مصنوعی بازیافت شده مؤثر بودند [۲۳].

توجه به تحقیقات گذشته در زمینه رفتار خمی اعضای بتنی با سنگدانه بازیافتی، نشان می‌دهد که سنگدانه بازیافتی باعث کاهش ظرفیت لنگر خمی و افزایش انتشار ترک می‌شود. الیاف فولادی نه تنها تشکیل ترک را کاهش می‌دهند، بلکه کنترل، تکثیر و رشد آنها را نیز کنترل می‌کنند [۲۴]. علاوه بر قابلیت پل زدن پس از ترک، الیاف در هنگام مقید بودن بتن، عرض و مساحت ترک را نیز کاهش می‌دهند [۲۵]. در حالت سخت شده، هنگامی که الیاف به درستی به بتن چسبیده باشند، در سطح میکرو، ترک با ماتریس تعامل برقرار کرده، به طور موقت، این ترک‌ها را می‌بندند و رشد ناپایدار آنها را به تأخیر می‌اندازن. اگر درصد حجمی الیاف به اندازه کافی زیاد باشد، ممکن است منجر به افزایش مقاومت کششی ماتریس شود [۲۶]. پس از رسیدن به ظرفیت کششی بتن و ایجاد انسجام و تبدیل میکروترک‌ها به ماکروترک‌ها، الیاف با توجه به طول و ویژگی‌های پیوندی خود، بازدارنده ترک می‌باشند و رشد ترک را با استفاده از پل زدن به طور مؤثر ادامه می‌دهند. این پل ماکروترک پس از اوج مکانیسم تقویت اولیه در اکثر کامپوزیت‌های بتنی

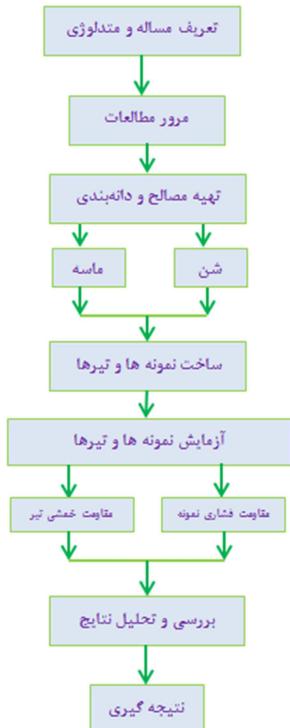
کردند [۱۲]. مقاومت خمی، چقرومگی و تغییرشکل چشمگیر با افزایش مقدار الیاف فولادی افزایش می‌یابد. براساس تحقیقات گذشته، مشخص است که اضافه کردن الیاف فولادی به تیرهای بتنی بازیافت شده روشن مؤثر در بهبود رفتار آنها می‌باشد [۱۶ و ۱۷].

همچنین مطالعات پیشین، تأثیر تقویت‌کننده الیاف فولادی را در بتن تأیید کرده است و باعث کاهش انتشار ترک می‌شود [۱۸ و ۱۹]. علاوه بر این، الیاف فولادی با افزایش مقاومت کششی و چقرومگی، به جلوگیری از شکست ترد کمک می‌کند. در مطالعه دیگری، اثر سنگدانه بازیافتی درشت بر رفتار خمی تیرهای بتن آرمه مورد مطالعه قرار گرفت هشت نمونه بتنی با استفاده از چهار نسبت جایگزینی از مصالح بازیافتی (صفر، ۲۰، ۵۰ و ۱۰۰ درصد) و دو نسبت آب/سیمان ۵/۰ و ۶۵/۰ ساخته شد. سپس نمونه‌ها در ۲۸ روز تحت بارگذاری چهار نقطه قرار گرفتند. لنگر خمی، منحنی بار- جابه‌جایی، کرنش‌ها و انحنایها مشخص شده و رفتار ترک خورده‌گی تفاوت بین بتن ساخته شده با سنگدانه بازیافتی و بتن معمولی را نشان داد. بنابراین، این امکان وجود دارد که استفاده از الیاف فولادی بتواند رفتار خمی تیرهای بتن با سنگدانه بازیافت شده را بهبود بخشد [۲۰]. توشیک^۵ و همکاران رفتار خمی بتن مسلح بازیافت شده را با معادلات آیین‌نامه یوروکد، براساس ۲۱۷ نمونه آزمایشی، مقایسه کردند. آنها نشان دادند که یوروکد می‌تواند مقاومت خمی و برشی تیرهای بتنی ساخته شده از سنگدانه‌های بازیافتی را بدون آرماتور عرضی برآورد کند [۲۱]. در پژوهشی دیگر، از آجر به عنوان سنگدانه برای تولید نمونه استفاده کردند. ۲۴ نمونه با $2100 \times 200 \times 250$ میلی‌متر ساخته شد. علاوه بر این، نتایج با فرمول پیشنهادی آیین‌نامه ACI318-14 برای محاسبه رفتار خمی تیرهای بتنی مقایسه شد. در مقایسه با مصالح آجر،

⁶- Zaetang

⁵- Tošić

بوده است.



شکل ۱- فلوچارت روند پژوهش

بنابراین در این تحقیق، بتن‌های ساخته شده از سنگدانه‌های طبیعی و بازیافتی و اضافه کردن الیاف مختلف از جمله الیاف فولادی و کورتا به صورت مجزا و ترکیبی مورد بررسی قرار گرفته و رفتار تیرهای بتن مسلح در مقیاس واقعی همراه با سنگدانه‌های طبیعی و بازیافتی بر روی پنج نمونه تیر با سنگدانه طبیعی و نقطه‌ای بر روی انجام شد و همچنین رفتار شکست و پارامترهای بازیافتی انجام شد و همچنین استفاده از آزمایش مقاومت خمثی چهار بار بررسی و مقایسه شد. آزمایش مقاومت خمثی چهار نهایی این تیرها مورد بررسی و مقایسه قرار گرفت. به عبارتی نوآوری این تحقیق استفاده از دو نوع الیاف به صورت مجزا و ترکیبی و همچنین استفاده از آنها در ساخت تیرهای بتن مسلح با سنگدانه بازیافتی بوده و رفتار خمثی این تیرها که در ابعاد واقعی ساخته شده در آزمایشگاه مورد بررسی قرار گرفته‌اند.

۳- معرفی نمونه‌ها

تقویت شده با الیاف است. در بتن‌هایی با درصدی از الیاف با حجم کم تا متوسط، مقاومت کششی و خمثی کامپوزیت را افزایش نمی‌دهد و فواید تقویت الیاف فقط در جذب انرژی یا افزایش چقرمگی فقط در رژیم پس از ترک خودگی محدود می‌شود. در مورد بتن‌هایی که الیاف بالایی دارد، مزایای آن در افزایش مقاومت کششی، پاسخ سخت‌شوندگی کرنش قبل تمرکز از افزایش مقاومت در خارج از محل تمرکز ترک ذکر شده است [۲۷]. هنگامی که عضو دارای الیاف فولادی در معرض خمث قرار بگیرد، حضور آنها باعث بهبود عملکرد خمثی می‌شود. استفاده از الیاف در محل ترک خودگی باعث تأخیر در افزایش سطح ترک می‌شود.

با جمع‌بندی مرور مطالعات، مشخص گردید که تحقیقات زیادی در خصوص بتن‌های با سنگدانه‌های طبیعی و بازیافتی و بتن‌های الیافی انجام شده است. همچنین در این تحقیقات رفتار خمثی تیرهای بتن مسلح حاوی سنگدانه طبیعی با الیاف فولادی و مصنوعی مانند پلی‌پروپیلن انجام شده است. از طرفی، در برخی تحقیقات، رفتار خمثی تیرهای بتن مسلح با سنگدانه‌های طبیعی و بازیافتی نیز مورد بررسی قرار گرفته است. در ادامه، فلوچارت روند پژوهش در شکل ۱ ارائه شده است.

۲- ضرورت و نوآوری تحقیق

مطالعات خیلی کمی در خصوص بررسی و مقایسه اثرات الیاف فولادی و الیاف مصنوعی در رفتار خمثی تیرهای بتن مسلح انجام شده است. همچنین با توجه به بررسی‌های انجام شده مشخص گردید مطالعات زیادی بر روی جنبه‌های مختلف بتن‌های الیافی و همچنین بتن‌های ساخته شده با سنگدانه‌های بازیافتی انجام شده است، ولی مطالعه خاصی در خصوص بتن‌های ساخته شده با سنگدانه بازیافتی همراه با الیاف صورت نگرفته است. در بیشتر مطالعات انجام شده تمرکز اصلی بر ظرفیت خمثی، ترک خودگی و نحوه شکست این تیرها

سنگدانه بازیافتی، SF الیاف فولادی، KF الیاف کورتا، HF الیاف هیبریدی می‌باشد. به عنوان نمونه، نماد HFRRCC به معنی تیر بتن مسلح با سنگدانه بازیافتی و الیاف هیبریدی است.

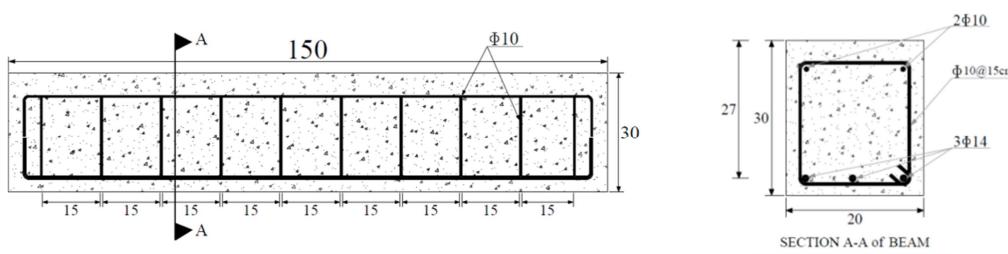
براساس شکل ۲، آرماتورگذاری تیرها برای همه نمونه‌ها یکسان بوده است. به عبارتی، تمام پنج تیر ساخته شده با سنگدانه‌های طبیعی و مصنوعی دارای آرماتورگذاری یکسانی در جهت طولی و عرضی هستند.

تمامی نمونه‌ها در مقیاس واقعی و سازه‌ای و با ابعاد $15 \times 30 \times 20$ متر ساخته شدند. پارامترهای ثابت آزمایشگاهی این تحقیق شامل طرح اختلاط، ابعاد نمونه‌ها و درصد الیاف و پارامترهای متغیر شامل استفاده از الیاف متفاوت در بتن‌های تقویت‌شده الیافی و سنگدانه طبیعی و بازیافتی می‌باشند. در جدول ۱، نام‌گذاری نمونه‌های مورد بررسی نشان داده شده است. شکل ۲ نیز طرح و نحوه آرماتورگذاری تیرها را نشان می‌دهد.

در نام‌گذاری انجام شده در جدول ۱، منظور از RC بتن مسلح با سنگدانه طبیعی، RRC بتن مسلح با

جدول ۱- نام‌گذاری نمونه‌های تیر بتنی ساخته شده با سنگدانه‌های بازیافتی و تیر مرجع

ردیف	توضیحات	الیاف	نماد
۱	تیر بتن مسلح با سنگدانه طبیعی (نمونه مرجع)	-	RC
۲	تیر بتن مسلح با سنگدانه بازیافتی	-	RRC
۳	تیر بتن مسلح بازیافتی تقویت‌شده با الیاف فولادی	(Steel)	SFRRC
۴	تیر بتن مسلح بازیافتی تقویت‌شده با الیاف پلیمری کورتا	پلیمری کورتا بلند (Kortta Blend)	KFRC
۵	تیر بتن مسلح بازیافتی تقویت‌شده با الیاف ترکیبی فولاد و کورتا	ترکیبی $0.15\% \text{ فولاد} + 0.35\% \text{ کورتا}$	HFRC



شکل ۲- جزئیات آرماتورگذاری تیرهای بتن مسلح با سنگدانه‌های طبیعی و بازیافتی

سیمان استفاده شده در تحقیق، سیمان پرتلند نوع II با چگالی نسبی $3/15$ گرم بر سانتیمترمکعب، منطبق بر آیین‌نامه ACI318-14 و براساس استاندارد ASTMC150/C150M-17 می‌باشد [۲۸ و ۲۹]. در جداول ۲ و ۳ به ترتیب، آنالیز شیمیایی و مشخصات فیزیکی سیمان مورد استفاده در تحقیق نشان داده شده است.

۴- مصالح

مصالح استفاده شده در ساخت تیرهای بتن مسلح بازیافتی شامل سیمان، آب، سنگدانه طبیعی و بازیافتی، آرماتور و الیاف فولادی و کورتا است. در ادامه، مشخصات هریک از این مصالح به صورت تفصیلی ارائه می‌گردد.

۴-۱- سیمان

جدول ۲- آنالیز شیمیایی سیمان

L.O.I	Cl	CaO.f	K ₂ O	Na ₂ O	SO ₃	MgO	CaO	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	SiO ₂	ترکیب شیمیایی (%)
۱/۰۵	-	۰/۷۵	-	-	۲/۱	۱/۷۵	۶۳/۲	۴/۴	۵/۱	۲۱/۵	(%)

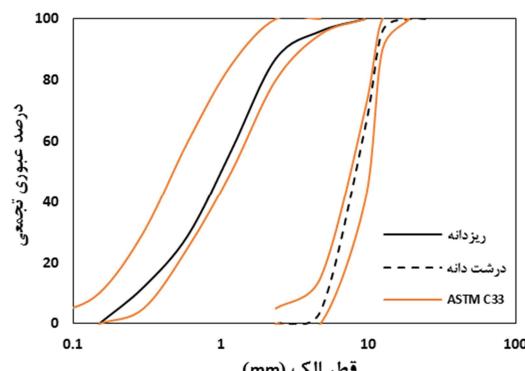
جدول ۳- مشخصات فیزیکی سیمان

بلین (cm ² /gr)	باقی مانده روی الک ۹۰ میکرون (Seive # 170)	انبساط طولی	درصد آب	زمان گیرش اولیه (min)	زمان گیرش نهایی (min)
۳۰۰۰	-	۰/۰۳	-	۱۳۰	۲۱۵

شکستگی ۶۷ درصد، طبق استانداردهای ASTMC125-16 و (ASTM D5821-13(2017) از محل مذکور تأمین گردیده است [۳۳ و ۳۴]. حداکثر اندازه اسمی درشتدانه‌ها (طبیعی و بازیافتی) با توجه به محدودیت‌های اجرایی که گاه بسته به شکل عضو بتنی، توزیع میلگردها در بتن و میزان پوشش بتن روی میلگردها بوجود می‌آید، مقدار کمینه موجود در آیین‌نامه مربوط به طرح اختلاط ((ACI 211.1-91 (R2002) در نظر گرفته شده است [۳۵].

ماسه طبیعی مورد استفاده در این تحقیق، ماسه کوهی شکسته شسته شده با مدول نرمی ۲/۳۹ (طبق استاندارد ۱۴ ASTM C136/C136M-14) و ارزش ماسه‌ای ASTM D2419-14، می‌باشد ۸۵ درصد طبق استاندارد [۳۲ و ۳۶]. مشخصات ماسه‌ها به کارخانجات ماسه‌شویی اطراف شهر خرم‌آباد سفارش و پس از غربال، از محل مذکور تأمین گردیده است.

در شکل ۳، منحنی لگاریتمی دانه‌بندی شن و ماسه طبیعی مورد استفاده در آزمایش نشان داده شده است، [۳۲]. مطابق آیین‌نامه ASTM C136/C136M-14 مدول نرمی سنگدانه‌های ماسه‌ای برابر با ۲/۳۹ محاسبه و به دست آمد.



شکل ۳- منحنی لگاریتمی دانه‌بندی شن و ماسه طبیعی و بازیافتی

۲-۴- آب

آب استفاده شده در تحقیق، آب شرب معمولی شهر خرم‌آباد (عاری از آلودگی‌های مضر) می‌باشد. که بنابر توصیه آیین‌نامه ACI318-14، الزامات مربوط به استاندارد ASTMC1602/C1602M-12 را برآورده می‌سازد [۲۸ و ۳۰].

۳-۴- سنگدانه

سنگدانه‌های مورد استفاده برای ساخت نمونه‌های تحقیق شامل دو گروه سنگدانه‌های طبیعی و بازیافتی می‌باشند که به ترتیب در ساخت تیرهای مورد استفاده قرار گرفته‌اند. در ادامه، مشخصات هریک از دو گروه سنگدانه‌های طبیعی و بازیافتی، مورد بررسی قرار خواهد گرفت.

دانه‌بندی سنگدانه‌های درشت و ریز براساس ضوابط مندرج در آیین‌نامه ASTM C33/C33M-16e1 صورت گرفته است [۳۱]. برای مشخص نمودن منحنی دانه‌بندی سنگدانه‌های مورد استفاده، از آزمایش الک مطابق با استاندارد ASTM C136/C136M-14 استفاده شده است. وزن‌های نمونه‌برداری جهت آزمایش دانه‌بندی بر حسب الزامات ذکر شده در آیین‌نامه مذکور صورت گرفته است [۳۲].

۴-۳-۴- سنگدانه‌های طبیعی

شن طبیعی مورد استفاده در این تحقیق، شن شکسته کوهی عاری از ذرات غیرمجاز رس، لای و مواد زیان‌آور می‌باشد که برای تولید با درجه شکستگی ۱۰ میلی‌متر به معدن شن موردنظر (واقع در اطراف شهر خرم‌آباد) سفارش داده شده و پس از غربال گری، با حداکثر اندازه اسمی دانه‌های ۱۰ میلی‌متر و با درصد

آزمایشگاه سازه دانشگاه منتقل و غربال گردیده است. حداقل اندازه اسمی درشتدانه‌ها به منظور یکسان بودن طرح اختلاط در گروه نمونه‌های طبیعی و بازیافتی با توجه به آییننامه (R2002) ACI 211.1-91، تقریب مناسب مشابه با درشتدانه‌های طبیعی درنظر گرفته شده و سفارش داده شده است [۳۶].



شکل ۴- نمونه‌های دپو شده مکعبی شکل بتن قدیمی و انتقال به کارخانه سنگشکن

ماسه بازیافتی مورد استفاده در این تحقیق، ریزدانه حاصل از شکستن و خردکردن مصالح بتی قدمی مینا توسط دستگاه سنگشکن می‌باشد، که با حداقل اندازه اسمی دانه‌های ۲ میلی‌متر (گذرنده از الک شماره ۸، طبق آییننامه ASTM C125-16) به کارخانه سنگشکن (واحه شهر خرم‌آباد) سفارش و پس از تولید به محل آزمایشگاه سازه دانشگاه منتقل و غربال گردیده است [۳۳]. سپس به منظور حذف ذرات رس و ناخالصی‌ها در حوضچه‌های مصنوعی استاندارد با دقت بالا مورد شستشو قرار گرفته و جهت خشکشدن دپو گردیده است. مدول نرمی این ماسه (براساس آییننامه ASTM C136/C136M-14 ۲۰۰۷ و ارزش ماسه‌ای آن ۸۷ درصد می‌باشد (طبق استاندارد ASTM D2419-14).

۴-۳-۲- سنگدانه‌های بازیافتی

بازیافت بتن در حالت کلی شامل یک فرآیند پنج مرحله‌ای است که شامل کندن و خرد کردن بتن قدیمی، شکستن بتن در سنگشکن اولیه و ثانویه، جدا کردن میلگردهای فولادی و قطعات دیگری که در بتن مدفون شده‌اند، دانه‌بندی و شستن و دپو کردن سنگدانه‌های درشت و ریز می‌باشد. محصول نهایی باید از موادی نظیر خاک، قطعات گچ، چوب و مصالح دیگری جز بتن عاری باشد. وجود این مواد موجب کاهش خواص مقاومتی و دوامی بتن ساخته شده می‌گردد [۳۷].

جهت تولید مصالح بازیافت شده، تعداد ۴۰۰ نمونه مکعبی شکل مقاومت‌سنگی بتن با ابعاد $15 \times 15 \times 15$ سانتی‌متر، با مقاومت فشاری مشخصه متوسط و با وزن تقریبی ۲ تن، از محل آزمایشگاه مکانیک خاک مستقر در سایت پژوهه انبوه‌سازی شهید نقدی خرم‌آباد جمع‌آوری و دپو گردیده سپس جهت خردایش و انجام فرآیند بازیافت (مطابق با استانداردهای ۱۶-ASTM D8038 و ۰۱-ACI 555R) به کارخانه سنگشکن واقع در اطراف شهر خرم‌آباد منتقل گردید. در شکل ۴ نمونه‌های دپوشده مکعبی‌شکل بتن قدیمی و نحوه انتقال نمونه‌ها و نمونه‌های در حال انتقال به کارخانه سنگشکن جهت انجام فرآیند بازیافت نشان داده شده‌اند.

شن بازیافتی^۷ مورد استفاده در این تحقیق، شن درشتدانه شکسته شده با حداقل اندازه اسمی ۹ میلی‌متر طبق آییننامه ASTM C125-16 از مصالح بتی قدیمی مینا توسط دستگاه سنگشکن می‌باشد [۳۳]. این شن عاری از ذرات غیرمجاز رس، لای و مواد زیان‌آور بوده و برای تولید با درجه شکستگی مورد نظر به کارخانه سنگشکن واقع در اطراف شهر خرم‌آباد سفارش داده شده و پس از تولید با درصد شکستگی ۸۷ درصد طبق استاندارد (ASTM D5821-13(2017)، به محل

⁷- Recycled Coarse Aggregates

می‌باشدند. جدول ۴، مشخصات مکانیکی میلگردهای مصرفی را نشان می‌دهد. لازم به ذکر است که این مشخصات از آزمایش کشش مستقیم میلگرد توسط دستگاه کشش یونیورسال، منطبق بر بند ۲-۲۰-۲-۱-۲۰ از آییننامه ACI 318-14 و استاندارد - ASTM A370 ۱۷a به دست آمده‌اند.

شیستوشوی ماسه بازیافت شده در حوضچه‌های مصنوعی استاندارد انجام گردید. در شکل ۳، منحنی لگاریتمی دانه‌بندی شن و ماسه بازیافتی مورداستفاده در آزمایش نشان داده شده است [۳۲].

۳-۴-۳-۴- میلگرد

تمامی میلگردهای مورد استفاده جهت کاربرد در تیرهای هر دو گروه از نوع AII و با شماره ۱۰ و ۱۴

جدول ۴- مشخصات مکانیکی میلگردهای استفاده شده

(Kg/mm ²) (f _u)	حداکثر تنش (%)	کرنش شکست (%)	(Kg/mm ²) (f _y)	تنش تسليم (mm)	قطر آرماتور (mm)	نوع آرماتور
۵۶/۲۰۳۲۷	۲۳/۴۶۱۳	۳۶/۹۷۸۰۳	۱۰	۲۹/۳۹۱۹	۱۰	A II
۵۲/۰۱۵۲۸	۲۹/۳۹۱۹	۲۹/۳۲۵۷۳	۱۴			

فولادی از نوع دو سر قلاب با قطر ۰/۸ و طول ۵۰ میلی‌متر مورد استفاده قرار گرفت. مشخصات تکمیلی این الیاف‌ها در جدول ۵ آمده است.

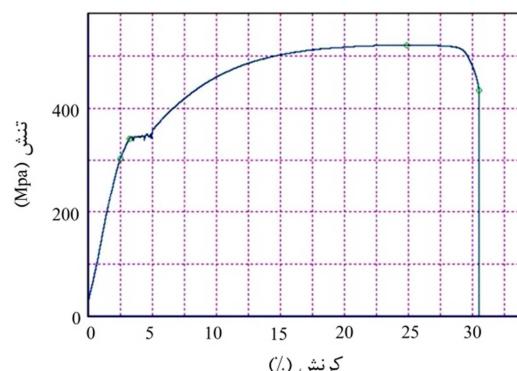


شکل ۶- دستگاه کشش مستقیم میلگرد و نحوه کرنش و گسیختگی میلگرد

۵- طرح اختلاط

طرح اختلاط در هر دو گروه نمونه‌های طبیعی و بازیافتی ثابت و برمبنای آییننامه ACI 211.1-91 (R2002) بوده و با توجه به مبدأ بودن اندازه دانه‌ها در

نتایج به دست آمده منطبق بر الزامات موجود در بندهای ۴-۲-۲-۲۰ و ۵-۲-۲-۲۰ از آییننامه ASTM A615/A615M-16 و استاندارد ۳۱۸-۱۴ می‌باشدند. به عنوان نمونه در شکل ۵، منحنی تنش-کرنش حاصل از آزمایش کشش مستقیم میلگرد شماره ۱۰ (در نمونه شماره ۳) و همچنین در شکل ۶، دستگاه کشش مستقیم میلگرد و نحوه کرنش و گسیختگی میلگرد مشاهده می‌شود.



شکل ۵- منحنی تنش- کرنش میلگرد با قطر ۱۰ میلی‌متر (نمونه شماره ۳)

۶- الیاف‌ها

دو نوع الیاف مختلف شامل الیاف‌های فولادی و کورتا در این تحقیق مورد استفاده قرار گرفت. تصویری از این الیاف‌ها در شکل ۷ نشان داده شده است. الیاف



شکل ۷- تصویری از (الف) الیاف کورتا و (ب) الیاف فولادی مورد استفاده

آینه نامه فوق، به منظور یکسان بودن طرح اختلاط برای هر دو گروه طبیعی و بازیافتی و با توجه به یکسان در نظر گرفتن مقاومت فشاری مشخصه مبنا جهت مقایسه و مشاهده تغییرات نمونه‌ها، حداکثر اندازه اسمی درشت‌دانه‌ها (شن) و ریزدانه‌ها (ماسه) برای هر دو بخش طبیعی و بازیافتی یکسان و به ترتیب حدوداً برابر ۱۰ میلی‌متر (مانده روی الک شماره "3/8") برای درشت‌دانه‌ها، و ۲ میلی‌متر (گذرنده از الک شماره "#8) برای ریزدانه‌ها در نظر گرفته شده است.

جدول ۵- مشخصات الیاف‌های مورد استفاده

نوع الیاف	طول (mm)	قطر (mm)	چگالی (ton/m ³)	مدول الاستیسیته (GPa)	مقاومت کششی (MPa)
فولادی	۵۰	۰/۸	۷/۸۵	۲۰۰	۱۱۰۰
کورتا	۵۴	-	۰/۹۴	۳/۵	۴۷۵

یک سوم الیاف مصنوعی به ترکیب اضافه شده و اختلاط به مدت ۱ دقیقه ادامه یافت. در پایان، بقیه آب و الیاف مصنوعی به ترکیب اضافه شده و به مدت ۲ دقیقه اختلاط ادامه داده شد.

لازم به ذکر است که الیاف به آرامی و طی چندین مرحله به مخلوط اضافه شدند تا از پدیده گلوله شدن^۸ الیاف جلوگیری به عمل آید. در جدول ۶، طرح اختلاط استفاده شده در نمونه‌های آزمایش طبیعی و بازیافتی بر مبنای آینه نامه (R2002) ACI 211.1-91، برای یک مترمکعب اختلاط بتی، نشان داده شده است [۳۵].

لازم به توضیح است که مقادیر اجزای اختلاط (سنگدانه، سیمان و آب) و افزودنی‌ها (الیاف) جهت کاربرد در نمونه‌ها (تیرها)، بر مبنای حجم نمونه و به صورت کسری از مقادیر مورد استفاده در یک مترمکعب محاسبه شده و به ترتیب با ترازووهای دیجیتال با دقت ۱۰٪ و ۰/۱ گرم توزین گردیده‌اند.

روش اختلاط در مورد نمونه‌های مبنا به این صورت بود که ابتدا ریزدانه‌ها و درشت‌دانه‌ها به مدت ۳۰ ثانیه با هم مخلوط شده، سپس یک سوم وزنی آب اختلاط به مخلوط اضافه شده و به مدت ۳۰ ثانیه اختلاط ادامه گردیده است. در پایان، سیمان و بقیه آب به ترکیب اضافه شده و به مدت ۲ دقیقه اختلاط ادامه داده شده است.

روش اختلاط در مورد نمونه‌های تقویت‌شده با الیاف فلزی به این صورت بوده است که ابتدا ریزدانه‌ها و درشت‌دانه‌ها به مدت ۳۰ ثانیه با هم مخلوط شده، سپس یک سوم وزنی آب اختلاط به مخلوط اضافه شده و به مدت ۳۰ ثانیه اختلاط ادامه گردیده است. در ادامه، سیمان و بقیه آب به ترکیب اضافه شده و به مدت ۱ دقیقه اختلاط ادامه یافته است. در پایان، الیاف فولادی به اختلاط بتی افزوده شده و اختلاط به مدت ۲ دقیقه ادامه یافت. روشن اختلاط در مورد نمونه‌های تقویت‌شده با الیاف مصنوعی به این صورت بود که ابتدا ریزدانه‌ها و درشت‌دانه‌ها به مدت ۳۰ ثانیه با هم مخلوط شده، سپس یک سوم وزنی آب اختلاط به مخلوط اضافه شده و به مدت ۳۰ ثانیه اختلاط ادامه گردید. در ادامه، سیمان و

^۸- Balling

جدول ۶- طرح اختلاط نمونه‌های طبیعی و بازیافتی برای یک مترمکعب برمبنای آیین‌نامه [۳۶]

الیاف با حجم ۵/۰ درصد		ماسه طبیعی یا بازیافتی (Kg)	شن طبیعی یا بازیافتی (Kg)	آب (Kg)	سیمان (Kg)	نسبت آب به سیمان (W/C)	نام نمونه
فولاد (Kg)	کورتا (Kg)						
-	-	۸۸۹/۲۵	۸۳۰	۲۰۰/۷۵	۳۶۵	۰/۵۵	RC
-	-	۸۸۹/۲۵	۸۳۰	۲۰۰/۷۵	۳۶۵	۰/۵۵	RRC
۳۹	-	۸۸۹/۲۵	۸۳۰	۲۰۰/۷۵	۳۶۵	۰/۵۵	SFRRC
-	۴/۵۵	۸۸۹/۲۵	۸۳۰	۲۰۰/۷۵	۳۶۵	۰/۵۵	KFRRC
۰/۱۲۵٪ کورتا + ۰/۳۷۵٪ فولاد		۸۸۹/۲۵	۸۳۰	۲۰۰/۷۵	۳۶۵	۰/۵۵	HFRRC
۲۷/۳	۱/۳۶۵						

و در خم کردن میلگردها مقادیر طول و قطر قلاب (خم) طبق آیین‌نامه ACI 318-14 محاسبه و در نظر گرفته شده و توسط دستگاه خم کن، خم شده‌اند. ضمن اینکه از سیم مفتول برای بستن آرماتورها به هم استفاده گردیده است. در شکل ۸، نحوه بستن شبکه آرماتور و آماده‌سازی قالب فلزی مشاهده می‌شود.

۶- ساخت نمونه‌ها

جهت بتن ریزی نمونه‌ها از قالب فلزی استفاده شده است. بدین منظور لازم است با روغن کاری قالب، از چسبندگی بتن به جداره قالب جلوگیری نموده و درزهای قالب را در صورت وجود توسط بتونه کاری مسدود کرد. برای برش میلگردها از قیچی مخصوص استفاده شده است



شکل ۸- نحوه بستن شبکه آرماتور و آماده‌سازی و روغن زدن قالب‌های فلزی

می‌گردد از بارگذاری چهار نقطه‌ای برای انجام آزمایش‌ها استفاده می‌شود. محل قرارگیری سه تغییرمکان سنج و فواصل بین آن‌ها ارائه شده است. مراحل آماده‌سازی فونداسیون کف صلب نیز به ترتیب مشاهده می‌شود.

۷- چیدمان آزمایش

برای آزمایش تیرها از چیدمان آزمایشگاهی همانند شکل ۹ استفاده شده است. همان‌طور که مشاهده

$$E_c = 4700\sqrt{f_c} \quad (1)$$

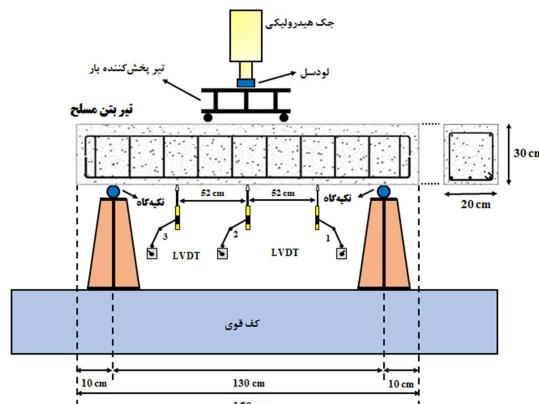
$$f_r = 0.62\lambda\sqrt{f_c} \quad (2)$$

اطلاعات استخراج شده از آزمون مقاومت فشاری روزه نمونه‌های مقاومت‌سنجی استوانه‌ای (طبق الزام بند ۲۸-۱۹-۳-۱-۲-۱-۱-۱۲-۲۶ (ب) از آیین‌نامه ۱۴-۳۱۸-ACI) و رعایت الزام بند ۱-۱-۱-۱۲-۲۶ (در مورد انطباق با استاندارد ۱۷-ASTM C1077)، در مورد گروه طبیعی و گروه بازیافتی به همراه مدول الاستیسیته و مدول گسیختگی مربوط به هر نمونه و معیار پذیرش بتن (طبق ضوابط آیین‌نامه ۱۴-۳۱۸-ACI)، در جدول ۷ ارائه گردیده است.

جک بتن‌شکن تمام اتوماتیک ۲۰۰ تنی منطبق با استانداردهای ASTM C39/C39M-17b و ASTM E4-16، جهت انجام آزمایش مقاومت فشاری بر روی نمونه‌های استوانه‌ای مشاهده می‌گردد [۳۸ و ۳۹]. نتایج مقاومت فشاری نمونه‌های بتن حاوی سنگدانه بازیافتی و الیاف مجزا و هیبریدی و همچنین نمونه مرجع در جدول ۷ ارائه شده است.

در شکل ۱۰، نمودار مقاومت فشاری نمونه‌های الیافی هیبریدی و مجزا برای نمونه‌های با سنگدانه بازیافتی نشان داده شده است. همچنین در این نمودار، مقدار افزایش یا کاهش مقاومت فشاری نمونه‌های الیافی نسبت به نمونه بازیافتی بدون الیاف و نمونه مرجع (با سنگدانه طبیعی و بدون الیاف) مقایسه شده است. همانطوری که در این شکل ملاحظه می‌گردد استفاده از الیاف مجزا و هیبریدی باعث افزایش مقاومت فشاری نمونه‌ها نسبت به نمونه بازیافتی بدون الیاف شده است. مقدار افزایش مقاومت فشاری نمونه‌های الیافی به ترتیب ۵ و ۱۷ درصد نسبت به نمونه بازیافتی بدون الیاف مربوط به نمونه الیاف هیبریدی فولادی و کورتا، الیاف فولادی و الیاف کورتا ثبت شده است. دلیل این موضوع را می‌توان به مشخصات مکانیکی الیاف مورد استفاده مرتبط دانست. همچنین همه نمونه‌های بازیافتی با و بدون الیاف

بارگذاری به صورت استاتیکی بوده که توسط جک هیدرولیک صورت گرفته است. میزان جایه‌جایی نمونه تحت بارگذاری توسط تغییر مکان سنج‌ها که در زیر نمونه قرار داده شده‌اند، کنترل و ثبت می‌شود. لازم به ذکر است که جک هیدرولیک به بارسنج متصل شده و بار جک توسط آن به دستگاه ثبات داده‌ها ارسال و خوانده می‌شود. در محل اتصال جک به بارسنج و بارسنج به تیر بارگذاری از پوشش الیافی (نویزگیر) جهت کم کردن خطأ و نویز داده‌ها در اتصال فلز به فلز استفاده گردیده است. برای بررسی کرنش میلگردها با نصب کرنش سنج‌هایی در زیر محل بارگذاری همان‌طور که پیش‌تر ارائه گردید، کرنش‌های میلگرد فشاری و میلگردهای کششی به دستگاه ثبات داده‌ها ارسال شده و زمان تسلیم شدن آن‌ها را با توجه به نتایج آزمایش کشنش مستقیم میلگردها می‌توان استخراج نمود.



شکل ۹- چیدمان آزمایش خمس چهار نقطه‌ای نمونه‌ها

۸- نتایج و بحث

۸-۱- مقاومت فشاری

برای به دست آوردن مقاومت فشاری مشخصه هر نمونه (تیر)، مطابق با بند ۱-۱-۱۲-۲۶ از آیین‌نامه ACI ۳۱۸-۱۴ از سه نمونه (آزمونه) استوانه‌ای با قطر ۱۵ و ارتفاع ۳۰ سانتی‌متر استفاده شده است. مدول الاستیسیته و مدول گسیختگی (شکست) بتن با استفاده از روابط (۱) و (۲) محاسبه می‌گردند [۲۸]:

است.

با نمونه مرجع مقایسه شده که در شکل ۱۰ ارائه شده

جدول ۷- مقاومت فشاری، مدول الاستیسیته و مدول گسیختگی بتن‌های حاوی سنگدانه بازیافته

معیار پذیرش ACI	میانگین contra-strength (MPa)	مدول گسیختگی (MPa) (f_r)	مدول الاستیسیته (MPa) (E_c)	کاهش ارتفاع (mm)	میانگین contra-strength (MPa)	بعاد نمونه (استوانه) (cm)	شماره آزمونه	نمونه
۳۶/۳۵>۳۰	۳۶/۳۵	۳/۶۸	۲۷۸۸۰/۹۵	۱/۲۶	۳۵/۱۹	۱۵×۳۰	۱	RC
		۳/۸۹	۲۸۳۲۵/۰۵	۱/۲۲	۳۶/۳۲	۱۵×۳۰	۲	
		۳/۷۹	۲۸۷۹۶/۸۵	۱/۱۳	۳۷/۵۴	۱۵×۳۰	۳	
۳۲/۸۱>۳۰	۳۲/۸۱	۳/۵۶	۲۶۹۸۷/۱۷	۱/۵۳	۳۲/۹۷	۱۵×۳۰	۱	RRC
		۳/۵۴	۲۶۸۵۵/۸۸	۴/۶۵	۳۲/۶۵	۱۵×۳۰	۲	
		۳/۵۵	۲۶۹۲۱/۶۲	۲/۷۴	۳۲/۸۱	۱۵×۳۰	۳	
۳۸/۳۸>۳۰	۳۸/۳۸	۴/۱۰	۳۱۱۰۵/۳۴	۲/۴۸	۴۳/۸	۱۵×۳۰	۱	SFRRC
		۳/۹۱	۲۹۶۳۶/۱۰	۱/۱۳	۳۹/۷۶	۱۵×۳۰	۲	
		۳/۴۸	۲۶۴۱۲/۱۶	۳/۵۴	۳۱/۵۸	۱۵×۳۰	۳	
۳۴/۵۵>۳۰	۳۴/۵۵	۳/۴۲	۲۵۹۳۵/۳۱	۲/۶۹	۳۰/۴۵	۱۵×۳۰	۱	KFRRC
		۳/۶۵	۲۷۶۶۲/۲۱	۱/۶۷	۳۴/۶۴	۱۵×۳۰	۲	
		۳/۸۵	۲۹۱۹۳/۰۲	۲/۲۲	۳۸/۵۸	۱۵×۳۰	۳	
۳۹/۹۱>۳۰	۳۹/۹۱	۴	۳۰۲۹۲/۲۲	۱/۸۸	۴۱/۵۴	۱۵×۳۰	۱	HFRRC
		۳/۸۴	۲۹۱۰۹/۶۷	۲/۲۸	۳۸/۳۶	۱۵×۳۰	۲	
		۳/۹۱	۲۹۶۸۵/۹۱	۳/۶۵	۳۹/۸۴	۱۵×۳۰	۳	

در بین جفت نمونه مشابه طبیعی و بازیافته بدون الیاف، نمونه‌های ساخته شده از سنگدانه‌های بازیافته، مقاومت فشاری کمتری را حدود ۱۰ درصد ثبت نمود.

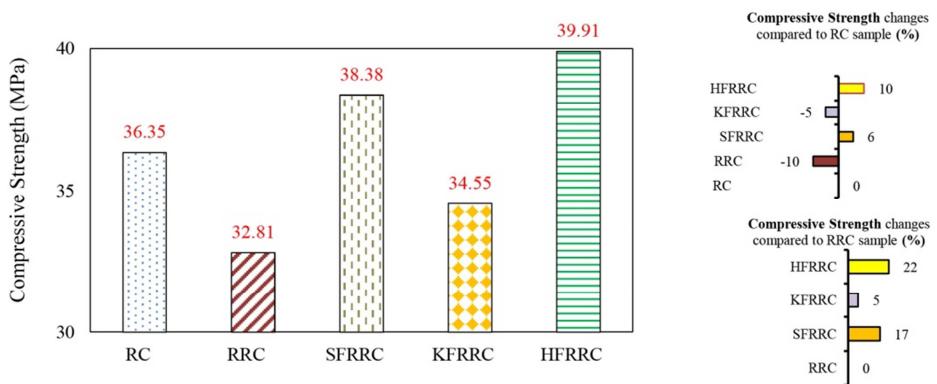
۲-۸- نمودار بار- تغییرشکل

در شکل ۱۱، همه پنج نمونه حاوی سنگدانه بازیافته و طبیعی تحت آزمایش لنگر خمشی نشان داده شده است. همچنین در شکل ۱۲، نمودار بار- جابه‌جایی در وسط دهانه تیر برای پنج نمونه با سنگدانه بازیافته و نمونه مرجع ارائه شده است. در شکل ۱۲ و در کنار منحنی بار- جابه‌جایی مقدار افزایش مقاومت و تغییرشکل تیرها نسبت به تیر مرجع نشان داد. برای تیرهای حاوی سنگدانه بازیافته، همانطوری که ملاحظه می‌گردد مقدار افزایش مقاومت و ظرفیت باربری تیر حاوی الیاف هیبریدی فولادی و کورتا بیشترین مقدار را دارا بوده و در رددهای بعدی به ترتیب، تیر حاوی الیاف مجذبی فولادی، الیاف کورتا و تیر بدون الیاف قرار دارند و مقدار افزایش

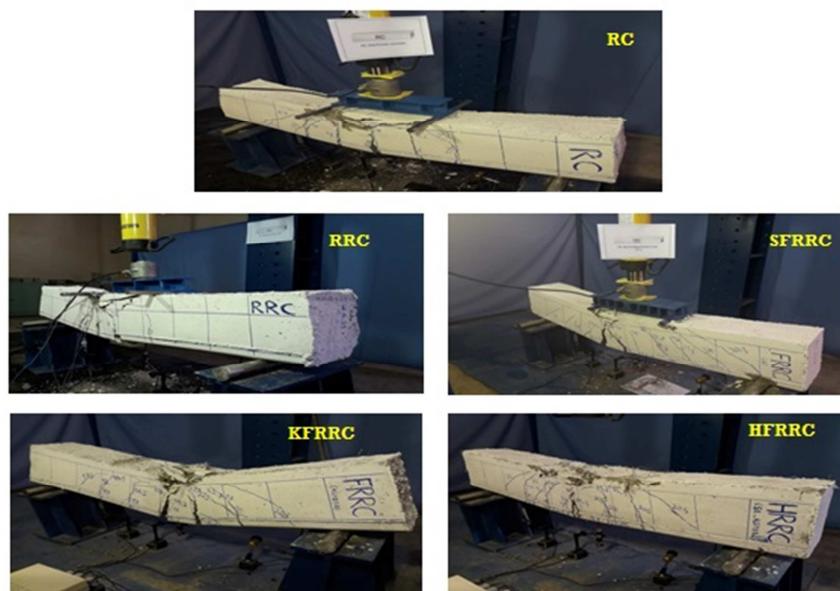
بیشترین مقدار افزایش مقاومت فشاری نسبت به نمونه مرجع، مربوط به نمونه حاوی الیاف هیبریدی فولادی و کورتا بوده و حدود ۱۰ درصد و بیشترین مقدار کاهش مربوط به نمونه بدون الیاف با سنگدانه بازیافته بوده و حدود ۱۰ درصد است. مقدار افزایش یا کاهش مقاومت فشاری نمونه‌ها نسبت به نمونه مرجع ۱۰، ۶، ۵-۵-۱۰ درصد به ترتیب مربوط به نمونه هیبریدی فولادی و کورتا، نمونه الیاف مجذبی فولادی، نمونه الیاف مجذبی کورتا و نمونه بدون الیاف ثبت شده است. به عبارتی در نمونه‌های حاوی الیاف کورتا و نمونه بازیافته بدون الیاف نسبت به نمونه مرجع، کاهش مقاومت دیده شده است. استفاده از الیاف هیبریدی بهدلیل درهم‌تندیگی و مقاومت بالای مقاومت الیاف فولادی باعث افزایش مقاومت فشاری نمونه‌ها شده است.

الیاف هیبریدی (فولادی و کورتا) نسبت به الیاف مجذبی (فولادی) باعث افزایش حداقل ۴ درصدی مقاومت فشاری در نمونه‌ها شد.

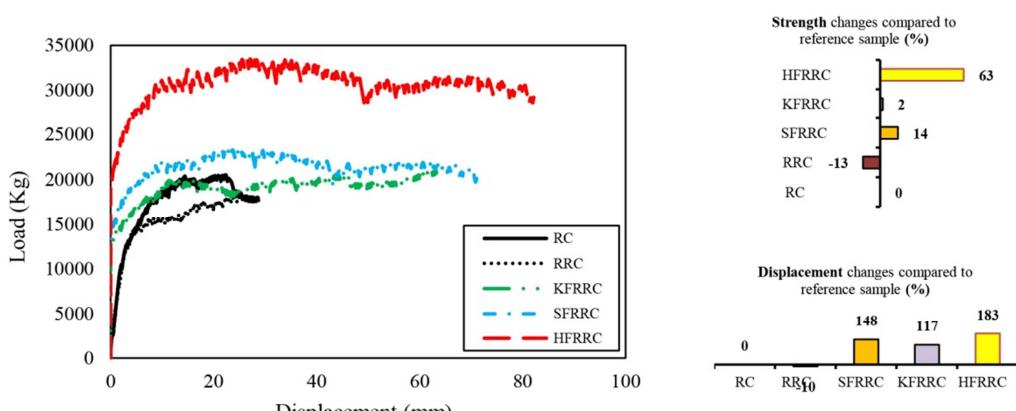
مقاومت آنها نسبت به تیر مرجع، به ترتیب ۲، ۱۴، ۶۳ و ۲۳- درصد می‌باشد.



شکل ۱۰- مقاومت فشاری نمونه‌های حاوی سنگدانه طبیعی و بازیافتی با الیاف مختلف مجزا و هیبریدی



شکل ۱۱- آزمایش مقاومت خمشی تیرهای بتن مسلح با الیاف مختلف مجزا و هیبریدی



شکل ۱۲- مقایسه نمودار بار- جابه‌جایی وسط دهانه، در تیرهای بتن مسلح با الیاف مختلف مجزا و هیبریدی

الیاف مقاومت، کمتر از تیر بدون الیاف و حاوی سنگدانه طبیعی (نمونه مرجع) بود.

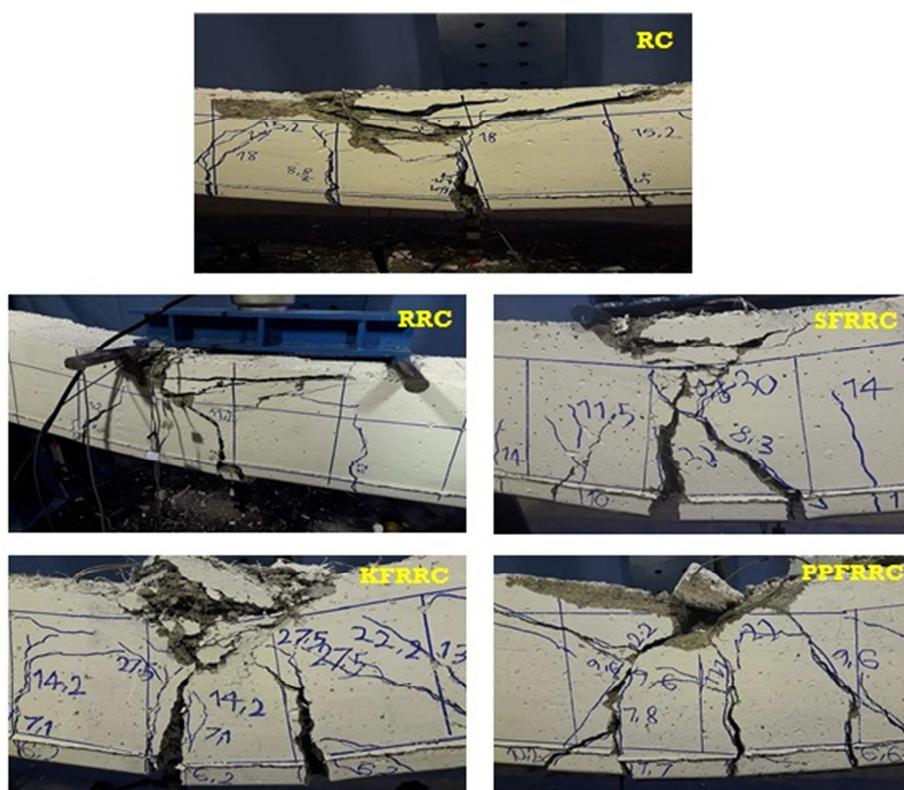
تیر بدون الیاف کمترین مقدار را از این حیث نشان داد. به عبارتی در تیر حاوی سنگدانه بازیافتی و بدون

در منحنی بار- جابه‌جایی، مشخص گردید که استفاده از الیاف در تیرهای بتن مسلح ساخته شده با سنگدانه بازیافته، باعث بهبود پارامترهای لرزه‌ای تیرها از جمله سختی، مقاومت و شکل‌پذیری شده و نقش الیاف هیبریدی در این خصوص بیشتر از الیاف مجزا می‌باشد.

۳-۸- مود شکست و الگوی ترک

در شکل ۱۳، مود شکست و همچنین توزیع ترک‌ها در نمونه‌های حاوی سنگدانه بازیافته نشان داده شده است همانطوری که در این اشکال مشخص است، شکست همه نمونه‌ها به صورت مود شکست خمشی بوده، به‌طوری که در ابتدا میلگردهای کششی وارد ناحیه تسلیم و ناحیه پلاستیک شده و در ادامه میلگردهای ناحیه فشاری نیز تسلیم شده‌اند. در نمونه‌های دارای الیاف نسبت به نمونه مرجع، تعداد ترک‌های بیشتر و با عمق کمتری رخ داد.

از نظر شکل‌پذیری، همانطوری که در شکل ۱۲ ملاحظه می‌گردد، در تیرهای ساخته شده با سنگدانه بازیافته، مقدار شکل‌پذیری تیر حاوی الیاف هیبریدی فولاد و کورتا بیشترین مقدار را دارا بوده و در رده‌های بعدی به ترتیب تیر الیاف مجزا فولادی، الیاف مجزا کورتا و تیر بدون الیاف قرار دارند و مقدار افزایش شکل‌پذیری، برای تیرهای الیاف هیبریدی حدود $1/8$ برابر و تیر حاوی الیاف فولاد حدود $1/5$ و تیر حاوی الیاف کورتا حدود $1/2$ برابر نسبت به تیر مرجع می‌باشد. تیر حاوی سنگدانه بازیافته و بدون الیاف نسبت به تیر مرجع کاهش جزیی داشته است. این افزایش در شکل‌پذیری تیرهای با الیاف هیبریدی نسبت به سایر تیرها به دلیل مقاومت کششی بالای الیاف فولادی بوده، به‌طوری که در تیرهای با الیاف فولادی مجزا هم دیده می‌شود.



شکل ۱۳- مود شکست و الگوی ترک تیرهای بتن مسلح با الیاف مختلف مجزا و هیبریدی

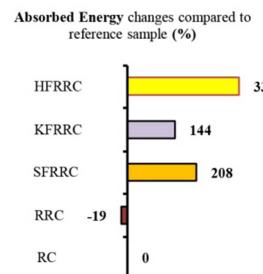
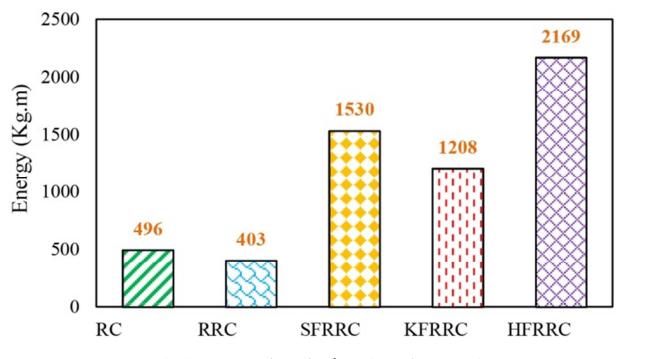
همانگونه که مشاهده می‌گردد، تیرهای حاوی الیاف هیبریدی فولادی و کورتا بیشترین و تیر بدون الیاف کمترین ظرفیت جذب انرژی را از خود نشان دادند. در

۴-۸- انرژی جذب شده

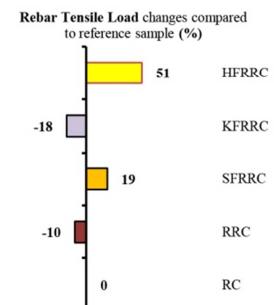
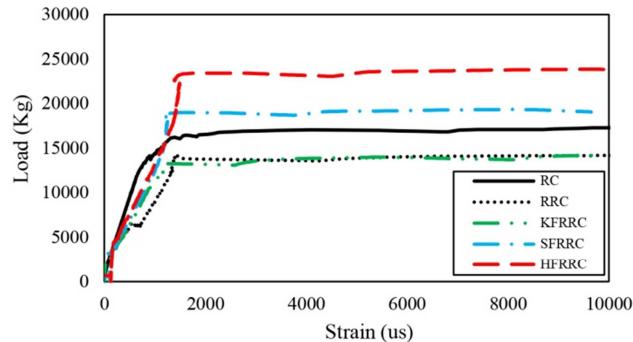
در شکل ۱۴، مقدار جذب انرژی تیرهای ساخته شده با سنگدانه‌های بازیافته نشان داده شده است.

۵-۸- نمودار بار - کرنش

در شکل ۱۵، منحنی بار - کرنش میلگردهای کششی در تیرهای ساخته شده با بازیافتدی نشان داده شده است. همانگونه که مشاهده می‌گردد، میلگردها در تیرهای الیافی در بار بیشتری نسبت به تیر مرجع تسليم شده و وارد ناحیه پلاستیک شده‌اند. مقدار افزایش این بار در تیرهای الیاف هیبریدی فولادی و کورتا، الیاف مجذب فولادی، تیر بدون الیاف و تیر با الیاف مجذب کورتا به ترتیب $19/51$ درصد (افزایش)، 10 و 18 درصد (کاهش) نسبت به تیر مرجع بیشتر بوده است. همانطور که ملاحظه می‌شود تیر بدون الیاف و تیر حاوی الیاف کورتا در بار کمتری نسبت به تیر مرجع، آرماتورهای کششی آن تسليم شده و وارد ناحیه پلاستیک می‌گردند. همچنان در جفت نمونه مشابه بدون الیاف، تیر حاوی سنگدانه طبیعی نسبت به تیر حاوی سنگدانه بازیافتدی در بار بیشتری میلگردهای کششی آن تسليم می‌گردد.



شکل ۱۴- مقایسه انرژی جذب شده در تیرهای مختلف با سنگدانه طبیعی و بازیافتدی



شکل ۱۵- مقایسه نمودار بار - کرنش میلگردهای کششی در تیرهای بتن مسلح با الیاف مختلف مجذب و هیبریدی

در این تحقیق برای بررسی رفتار تیرهای بتونی ساخته شده از سنگدانه‌های بازیافتدی با اضافه کردن الیاف

۹- نتیجه‌گیری

تیرهای الیاف هیبریدی حدود $1/8$ برابر، تیر حاوی الیاف فولاد حدود $1/5$ و تیر حاوی الیاف کورتا حدود $1/2$ برابر نسبت به تیر مرجع می‌باشد. تیر بدون الیاف و حاوی سنگدانه بازیافته، شکل‌پذیری کمتری نسبت به تیر مرجع نشان داد.

۴- مود شکست در نمونه‌های حاوی سنگدانه بازیافته بهصورت مود شکست خمشی بوده، بهطوری که در ابتدا میلگردهای کششی وارد ناحیه تسليم و ناحیه پلاستیک شده و در ادامه میلگردهای ناحیه فشاری نیز تسليم شده‌اند. در نمونه‌های دارای الیاف نسبت به نمونه مرجع تعداد ترک‌های بیشتر و با عمق کمتری رخ داد.

۵- مقدار جذب انرژی تیرهای ساخته شده با سنگدانه‌های بازیافته، تیرهای حاوی الیاف هیبریدی فولادی و کورتا بیشترین و تیر حاوی بدون الیاف کمترین ظرفیت جذب انرژی را از خود نشان دادند. در رده‌های بعدی به ترتیب تیر حاوی الیاف مجذای فولادی و الیاف مجذای کورتا قرار دارند. مقدار افزایش جذب انرژی تیرهای حاوی الیاف بهتر از تیر مرجع بوده و البته تیر بدون الیاف بازیافته نسبت به تیر مرجع ظرفیت جذب انرژی کمتری را از خود نشان دادند.

۶- از نقطه‌نظر جاری شدن میلگردهای کششی، مشخص شد که تیرهای با ظرفیت باربری بالاتر دیرتر جاری می‌گردند، بهطوری که میلگردها در تیرهای الیافی در بار بیشتری نسبت به تیرهای مرجع تسليم شده و وارد ناحیه پلاستیک شده‌اند. در تیرهای ساخته شده با سنگدانه بازیافته، مقدار افزایش این بار در تیرهای الیاف هیبریدی فولاد و کورتا، الیاف مجذای فولادی، تیر بدون الیاف بازیافته و الیاف مجذای کورتا به ترتیب $19/51$ ، $19/10$ و $18/10$ - درصد نسبت به تیر مرجع

مختلف، تعداد پنج نمونه تیر در ابعاد واقعی ساخته شده و مورد آزمایش قرار گرفت. الیاف مورد استفاده در این تحقیق الیاف فولادی و کورتا بوده که بهصورت مجزا و ترکیبی در تیرها مورد استفاده قرار گرفتند. آزمایش مقاومت فشاری نمونه‌های بتنی و آزمایش خمش چهار نقطه‌ای بر روی تیرها انجام شد و رفتار خمشی این تیرها مورد ارزیابی قرار گرفت. همچنین نمودار بار- جابه‌جایی، انرژی جذب شده، شکل‌پذیری، تسليم آرماتورهای طولی و مودهای شکست این تیرها استخراج گردید. نتایجی که از این تحقیق حاصل شد بهصورت زیر ارائه می‌گردد:

۱- افزودن الیاف موجب افزایش مقاومت فشاری در نمونه‌ها گردید. بیشترین مقدار افزایش (حدود 22 درصد در نمونه حاوی الیاف هیبریدی) و بیشترین مقدار کاهش (حدود 5 درصد در نمونه حاوی الیاف مجذای کورتا) بود. همچنین در نمونه بدون الیاف نسبت به نمونه مرجع حدود 10 درصد کاهش مقاومت فشاری ثبت گردید.

۲- از نقطه‌نظر بار ترک خمشی اولیه و ظرفیت باربری نهایی نمونه، مقدار افزایش مقاومت و ظرفیت باربری تیر حاوی الیاف هیبریدی فولادی و کورتا بیشترین مقدار را دارا بوده و در رده‌های بعدی به ترتیب تیر الیاف مجذای کورتا و تیر بدون الیاف بازیافته قرار دارند و مقدار افزایش مقاومت آنها نسبت به تیر مرجع، به ترتیب $14/63$ ، $2/1$ و $23/2$ - درصد می‌باشد. تیر بدون الیاف و حاوی سنگدانه بازیافته حدود 23 درصد مقاومتی کمتر از تیر مرجع (تیر بدون الیاف و حاوی سنگدانه طبیعی) را نشان داد.

۳- از نظر شکل‌پذیری، در تیرهای حاوی سنگدانه بازیافته، مقدار شکل‌پذیری تیر حاوی الیاف هیبریدی فولاد و کورتا بیشترین مقدار را دارا بوده و در رده‌های بعدی به ترتیب تیر الیاف مجذای فولادی، الیاف مجذای کورتا و تیر بدون الیاف قرار دارند و مقدار افزایش شکل‌پذیری،

رفتار خمشی تیرهای بتن مسلح ساخته شده با سنگدانه‌های بازیافتی را برطرف نمود.

۹- در نهایت با توجه به نتایج بدست آمده، بیشترین تأثیر در بهبود رفتار خمشی تیر بتن مسلح ساخته شده با سنگدانه بازیافتی، مربوط به حالتی است که نمونه با الیاف هیبریدی فولادی و کورتا تقویت شده است؛ همچنین ذکر این نکته ضروری است که در این حالت خیز نهایی نمونه افزایش چشمگیری داشته و موجب افزایش جذب انرژی و شکل‌پذیری نمونه شده و افزایش ظرفیت باربری نمونه در این حالت را موجب می‌شود که میلگردها دیرتر به حد جاری شدن خود برسند. به عبارت دیگر، به طور کلی افزودن الیاف هیبریدی موجب افزایش ظرفیت باربری و خیز نهایی (شکل‌پذیری بیشتر) نمونه و دیرتر جاری شدن میلگردهای کششی در نمونه می‌گردد.

بوده است. میلگرد تیرهای بازیافتی بدون الیاف و حاوی الیاف کورتا نسبت به تیر مرجع زودتر تسلیم شده است.

۷- در بین جفت نمونه مشابه طبیعی و بازیافتی بدون الیاف، نمونه ساخته شده از سنگدانه‌های طبیعی ظرفیت باربری، خیز نهایی و جذب انرژی بیشتری را ثبت نمودند و همچنین از نظر جاری شدن میلگردهای کششی، نمونه‌های طبیعی در باز بیشتری تسلیم شده و وارد ناحیه پلاستیک شدند.

۸- نمونه حاوی الیاف هیبریدی نسبت به نمونه‌های حاوی الیاف مجزا تأثیر بیشتری بر رفتار خمشی تیرهای ساخته شده با سنگدانه‌های بازیافتی نشان داد و با استفاده از الیاف مجازی فولادی و الیاف هیبریدی فولادی و کورتا می‌توان ضعف

مراجع

- [1] Marara, K., Erenb, Ö., & Yitmena, İ. (2011). "Compression specific toughness of normal strength steel fiber reinforced concrete (NSSFRC) and high strength steel fiber reinforced concrete (HSSFRC)", *Materials Research*, 14, 239-247.
- [2] Tanoli, W. A., Naseer, A. M. J. A. D., & Wahab, F. A. Z. L. I. (2014). "Effect of steel fibers on compressive and tensile strength of concrete", *International Journal of Advanced Structures and Geotechnical Engineering*, 3(4), 393-397.
- [3] Noamana, A. T., Bakar, B. A., & Akil, H. M. (2016). *Effect of curmb rubber aggregate on toughness and impact energy of steel fiber concrete*, PhD of engineering, Civil Eengineering, University Sains Malaysia.
- [4] Yoo, D. Y., Banthia, N., Yang, J. M., & Yoon, Y. S. (2016). "Size effect in normal-and high-strength amorphous metallic and steel fiber reinforced concrete beams", *Construction and Building Materials*, 121, 676-685.
- [5] Altun, F., & Aktaş, B. (2013). "Investigation of reinforced concrete beams behavior of steel fiber added lightweight concrete", *Construction and Building Materials*, 38, 575-581.
- [6] Yap, S. P., Alengaram, U. J., Mo, K. H., & Jumaat, M. Z. (2019). "Ductility behaviours of oil palm shell steel fibre-reinforced concrete beams under flexural loading", *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 23(7), 866-878.
- [7] Arivalagan, S. (2012). "Earthquake-Resistant Performance of Polypropylene Fiber Reinforced Concrete Beams", *Journal of Engineering and Technology*, 2(01), 63-67.
- [8] Nahhas, T. M. (2013). "Flexural behavior and ductility of reinforced lightweight concrete beams with polypropylene fiber", *Journal of construction engineering and management*, 1(1), 4-10.
- [9] Afrougabsabet, V., Biolzi, L., & Ozbakkaloglu, T. (2016). "High-performance fiber-reinforced concrete: a review", *Journal of materials science*, 51(14), 6517-6551.
- [10] Alberti, M. G., Enfedaque, A., & Gálvez, J. C. (2016). "Fracture mechanics of polyolefin fibre reinforced concrete: Study of the influence of the concrete properties, casting procedures, the fibre length and specimen size", *Engineering Fracture Mechanics*, 154, 225-244.
- [11] Mohammed, A. A. (2017). "Flexural behavior and analysis of reinforced concrete beams made of recycled PET waste concrete", *Construction and Building Materials*, 155, 593-604.

- [12] Gao, D., & Zhang, L. (2018). "Flexural performance and evaluation method of steel fiber reinforced recycled coarse aggregate concrete", *Construction and Building Materials*, 159, 126-136.
- [13] Arora, S., & Singh, S. P. (2016). "Analysis of flexural fatigue failure of concrete made with 100% coarse recycled concrete aggregates", *Construction and Building Materials*, 102, 782-791.
- [14] Choi, W. C., & Yun, H. D. (2013). "Long-term deflection and flexural behavior of reinforced concrete beams with recycled aggregate", *Materials & Design*, 51, 742-750.
- [15] Azad, A. M. (2017). "Flexural behavior and analysis of reinforced concrete beams made of recycled PET waste concrete", *Construction and Building Materials*, 155, 593-604.
- [16] Guo, Y., Zhang, J., Chen, G., & Xie, Z. (2014). "Compressive behaviour of concrete structures incorporating recycled concrete aggregates, rubber crumb and reinforced with steel fibre, subjected to elevated temperatures", *Journal of cleaner production*, 72, 193-203.
- [17] Carneiro, J. A., Lima, P. R. L., Leite, M. B., & Filho, R. D. (2014). "Compressive stress-strain behavior of steel fiber reinforced-recycled aggregate concrete", *Cement and concrete composites*, 46, 65-72.
- [18] Meda, A., Minelli, F., & Plizzari, G. A. (2012). "Flexural behavior of RC beams in fiber reinforced concrete", *Composites Part B: Engineering*, 43, 2930-2937.
- [19] Soutsos, M. N., Le, T. T. & Lampropoulos, A. P. (2012). "Flexural performance of fibre reinforced concrete made with steel and synthetic fibres", *Construction and Building Materials*, 36, 704-710.
- [20] Seara-Paz, S., González-Fonteboa, B., Martínez-Abella, F., & Eiras-López, J. (2018). "Flexural performance of reinforced concrete beams made with recycled concrete coarse aggregate", *Engineering Structures*, 156, 32-45.
- [21] Tošić, N., Marinković, S., & Ignjatović, I. (2016). "A database on flexural and shear strength of reinforced recycled aggregate concrete beams and comparison to Eurocode 2 predictions", *Construction and Building Materials*, 127, 932-944.
- [22] Tarek, T. M., Das, H. K., Mahmood, A. H., Rahman, M. N., & Awal, M. A. (2017). "Flexural performance of RC beams made with recycled brick aggregate", *Construction and Building Materials*, 134, 67-74.
- [23] Zaetang, Y., Sata, V., Wongsa, A., & Chindaprasirt, P. (2016). "Properties of pervious concrete containing recycled concrete block aggregate and recycled concrete aggregate", *Construction and Building Materials*, 111, 15-21.
- [24] Weiss, W. J., & Shah, S. P. (1997). "Recent trends to reduce shrinkage cracking in concrete pavements", In *Proceedings of the 1997 Airfield Pavement Conference*, 217-228.
- [25] Banthia, N., Gupta, R., & Mindess, S. (2004). "Developing crack resistant SFRC overlay materials for repair applications", *NSF Conference*, Bergamo, Italy.
- [26] Banthia, N., & Sheng, J. (1996). "Fracture toughness of micro-fiber reinforced cement composites", *Cement and Concrete Composites*, 18(4), 251-269.
- [27] Bindiganavile, V., & Banthia, N. (2001). "Polymer and steel fiber-reinforced cementitious composites under impact loading—Part 1: Bond-slip response", *Materials Journal*, 98(1), 10-16.
- [28] ACI 318, (2014). *Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-14) and Commentary (ACI 318R-14)*, ACI Committee 318, American Concrete Institute, Farmington Hills, MI.
- [29] ASTM C150/C150M-17. (2017). *Standard Specification for Portland cement*, ASTM International, West Conshohocken, PA.
- [30] ASTM C1602/C1602M-12. (2012). *Standard Specification for Mixing Water Used in the Production of Hydraulic Cement Concrete*, ASTM International, West Conshohocken, PA.
- [31] ASTM, A. (2016). C33/C33M-16e1: *Standard Specification for Concrete Aggregates*, ASTM International, and West Conshohocken, Pennsylvania, United States.
- [32] ASTM, A. (2014). C136/C136M-14, *Standard Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates*, ASTM International, West Conshohocken, PA.
- [33] ASTM, A. (2016). C125-16, *Standard Terminology Relating to Concrete and Concrete Aggregates*, ASTM International, West Conshohocken, PA.
- [34] ASTM, A. (2017). D5821-13, *Standard Test Method for Determining the Percentage of Fractured Particles in Coarse Aggregate*, ASTM International, West Conshohocken, PA.
- [35] ACI Committee, (2002). *Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 211.1-91)*, American Concrete Institute, Farmington Hills, MI.
- [36] ASTM, A. (2014). D2419-14, *Standard Test Method for Sand Equivalent Value of Soils and Fine Aggregate*, ASTM International, West Conshohocken, PA.
- [37] ASTM, A. (2016). D8038-16, *Standard Practice for Reclamation of Recycled Aggregate Base (RAB) Material*, ASTM International, West Conshohocken, PA.
- [38] ASTM, A. (2017). C1077-17, *Standard Practice for Agencies Testing Concrete and Concrete Aggregates for Use in Construction and Criteria for Testing Agency Evaluation*, ASTM International, West Conshohocken, PA.

[39] ASTM, A. (2017)., C39/C39M-17b, *Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens*, ASTM International, West Conshohocken, PA.