



بررسی آزمایشگاهی رفتار تیرهای ساخته شده از بتن الیافی حاوی سنگدانه‌های طبیعی و بازیافتی

فریدون امیدنسب^{*}، عباس اسکندری

دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه لرستان، خرم‌آباد، ایران.

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۴۰۰/۰۴/۱۸
بازنگری: ۱۴۰۰/۰۶/۱۶
پذیرش: ۱۴۰۰/۰۷/۰۲
ارائه آنلاین: ۱۴۰۰/۰۸/۱۵

کلمات کلیدی:

الیاف مجزا
الیاف هیبریدی
رفتار خمشی
تیر بتن مسلح
سنگدانه بازیافتی

خلاصه: با توجه به اینکه بتن یکی از پرکاربردترین مصالح ساخت و ساز بوده و بتن در کنار مقاومت فشاری مناسب، شکل‌پذیری، مقاومت کششی و خمشی کمی دارد. به این منظور در چند سال اخیر با اضافه کردن الیاف به بتن و ساخت بتن‌های الیاف مسلح، تا حدود زیادی ضعف‌های مذکور بهبود یافته است. هدف این تحقیق بررسی تاثیر الیاف مختلف بر رفتار خمشی تیرهای بتن مسلح ساخته شده با سنگدانه‌های طبیعی و بازیافتی است. در این پژوهش ۱۲ نمونه تیر بتن مسلح در دو گروه (شش نمونه تیر ساخته شده با سنگدانه طبیعی و شش نمونه تیر ساخته شده با سنگدانه بازیافتی) در مقیاس واقعی و با ابعاد $0/2 \times 0/3 \times 1/5$ متر مکعب ساخته شد که جزئیات آرماتورگذاری همه تیرها یکسان بوده و سه نوع الیاف فولادی، پلی‌پروپیلن و کورتا به صورت مجزا و هیبریدی در ساخت آن‌ها استفاده شد. آزمایش مقاومت خمشی چهار نقطه‌ای بر روی نمونه‌ها انجام شد. حالت شکست، رفتار شکست و همچنین پارامترهای جذب انرژی، شکل‌پذیری و ظرفیت بار نهایی تیرهای ساخته شده با سنگدانه‌های طبیعی و بازیافتی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که افزودن الیاف هیبریدی نسبت به الیاف مجزا تاثیر بیشتری در بهبود پارامترهای فوق داشته و همچنین رفتار خمشی نمونه‌های بازیافتی با الیاف هیبریدی توانستند به نمونه‌های طبیعی با الیاف مجزا نزدیک گردند.

۱- مقدمه

این تحقیقات نشان می‌دهد که 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 [۱-۸]. استفاده از الیاف فولادی در تیرهای بتن مسلح و بررسی رفتار خمشی آن‌ها در تحقیقات زیادی انجام شده است که نشان می‌دهد استفاده از الیاف فولادی بهبود در مقاومت نهایی خمش، رفتار شکست، رفتار ترک‌خوردگی و کرنش خمشی را به دنبال دارد [۹-۲۲]. همچنین استفاده از الیاف پلیمری نظیر پلی‌پروپیلن در تیرهای بتن مسلح نیز باعث بهبود پارامترها و رفتار خمشی تیرهای بتن مسلح می‌گردد [۲۳-۳۰]. 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 [۳۱-۴۱]. 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 خمشی آن‌ها مورد بررسی قرار گرفته است. در این مطالعات و تحقیقات مشخص شده که الیاف فولادی

بتن‌های حاوی سیمان، آب، سنگدانه، الیاف پراکنده یا یکنواخت، بتن مسلح 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 به دلیل توانایی آن‌ها در تقویت خواص مکانیکی بتن آغاز شد. امروزه تحقیقات گسترده‌ای 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، ایجاد و گسترش ترک به دلیل کوچک شدن سنین پایین می‌تواند با استفاده از الیاف به طور قابل توجهی کاهش یابد.

برخی تحقیقات در خصوص استفاده از الیاف در بتن انجام شده و نتایج

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



تأثیر بیشتری به نسبت سایر الیاف مصنوعی بر رفتار خمشی تیرهای بتن مسلح داشته و باعث بهبود رفتار خمشی آن‌ها می‌گردد [۴۷-۴۲].

استفاده از ضایعات می‌تواند به محافظت از محیط زیست کمک کند. از مواد بازیافتی می‌توان برای ساخت اعضای بتنی استفاده کرد. 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 بازیافتی به جای مصالح طبیعی انجام شده است. در سال ۲۰۱۵، آرورا و سینگ [۴۳] رفتار خمشی یک تیر بتنی تولید شده با ۱۰۰٪ مصالح درشت بازیافت شده را در اثر خرابی خستگی خمشی مورد مطالعه قرار دادند. در این مطالعه نمونه‌های ۵۰۰×۱۰۰×۱۰۰ میلی‌متر مکعب ساخته و آزمایش شدند. بارگذاری خمشی چهار نقطه‌ای استفاده شد. نتایج با تیرهای بتنی ساخته شده از مصالح طبیعی مقایسه شد. نشان داده شد که استفاده از ۱۰۰٪ سنگدانه قابل بازیافت در بتن به جای سنگدانه طبیعی باعث عدم کارایی خستگی می‌شود. چوی و یون [۴۴] در مورد تغییر شکل طولانی مدت و رفتار خمشی تیرهای بتنی مسلح با مصالح بازیافتی تحقیق کردند. در این مطالعه، نمونه‌ها تحت بارگذاری طولانی مدت به مدت ۳۶۰ روز مورد آزمایش قرار گرفتند. نمونه‌ها با استفاده از ۱۰۰٪ سنگدانه طبیعی، ۱۰۰٪ مصالح بازیافتی و ۵۰٪ مصالح طبیعی به همراه ۵۰٪ مصالح بازیافتی تولید شدند. علاوه بر این، نتایج تجربی با نتایج تحلیلی ACI 318 مقایسه شد و یک فرمول برای محاسبه تغییر شکل خمشی بلند مدت به دست آمده و اصلاح شد. الگوهای ترک مشابه بدون توجه به نوع مصالح مشاهده شد، حتی اگر چندین ترک در تیرهای ساخته شده با مصالح بازیافتی رخ داده است.

آزاد [۴۵] رفتار خمشی تیرهای بتن مسلح را که با مواد زاید بازیافت شده ساخته شده، مورد مطالعه قرار داد. در این مطالعه از ضایعات PET به عنوان ماده بازیافتی استفاده شد. مقاومت فشاری، حداکثر ظرفیت بار، رفتار تغییر شکل - بار، حالت سختی و خرابی نمونه‌ها مشخص شد. نتایج نشان داد که پسماندهای PET تا ۱۵ درصد می‌توانند به بتن اضافه شوند. گائو و ژانگ [۴۶] عملکرد خمشی بتن بازیافت شده درشت با الیاف را ارزیابی کردند. در این مطالعه، الیاف فولادی با ۰، ۰، ۵، ۱، ۱/۵ و ۲ درصد (از نظر حجم) اضافه شدند. علاوه بر این، درشت دانه بازیافتی با سنگدانه‌های طبیعی را ۰، ۳۰، ۵۰ و ۱۰۰ درصد (در هر حجم) جایگزین کرد. مقاومت خمشی، چقرمگی و تغییر شکل چشمگیر با افزایش مقدار الیاف فولادی افزایش یافت. بر اساس تحقیقات قبلی، مشخص است که اضافه کردن الیاف فولادی به تیرهای بتنی بازیافت شده یک روش مؤثر در بهبود رفتار آن‌هاست [۴۸] و

[۴۷].

همچنین، مطالعات قبلی تأثیر الیاف فولادی را در بتن [۵۰ و ۴۹] تأیید کرده است و نشان داده که باعث کاهش انتشار ترک می‌شود. علاوه بر این، الیاف فولادی با افزایش مقاومت کششی و چقرمگی، از جلوگیری از شکست ترد کمک می‌کنند. در مطالعه دیگری، سیرا پاز و همکاران [۵۱]، اثر شن بازیافتی بر رفتار خمشی تیرهای بتن مسلح را مورد مطالعه قرار داد. هشت نمونه بتنی با استفاده از چهار نسبت جایگزینی از مصالح بازیافتی (۰، ۲۰، ۵۰ و ۱۰۰ درصد) و دو نسبت آب به سیمان ۰/۵ و ۰/۶۵ ساخته شد. نمونه‌ها در ۲۸ روز تحت بارگذاری چهار نقطه‌ای قرار گرفتند. لنگر خمشی، منحنی بار - جابجایی، کرنش‌ها و انحناها مشخص شد. رفتار ترک‌خوردگی 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 خمشی تیرهای بتن با سنگدانه بازیافت شده را بهبود بخشد. توشیک و همکاران [۵۲] رفتار خمشی بتن مسلح بازیافت شده را با معادلات آیین‌نامه یوروکد، بر اساس ۲۱۷ نمونه آزمایشی، مقایسه کردند. آن‌ها نشان دادند که یوروکد می‌تواند مقاومت خمشی و برشی تیرهای بتنی ساخته شده از سنگدانه‌های بازیافتی را بدون آرماتور عرضی برآورد کند. در مطالعه دیگری، طارک و همکاران [۵۳] از آجر به عنوان سنگدانه برای تولید نمونه استفاده کردند. ۲۴ نمونه با ابعاد ۲۱۰×۲۰×۲۵۰ میلی‌متر مکعب ساخته شد. علاوه بر این، نتایج با فرمول پیشنهادی ACI 318-14 برای محاسبه رفتار خمشی تیرهای بتنی مقایسه شد. در مقایسه با مصالح آجر، استفاده از مصالح آجری بازیافتی نه لنگر ترک خوردگی و نه ظرفیت خمشی نهایی نمونه‌ها را نمی‌تواند کاهش دهد. در یک تحقیق دیگر، زانتنگ و همکاران [۵۴] از سنگدانه بازیافتی بتن با ۰، ۲۰، ۴۰، ۶۰، ۸۰ و ۱۰۰ درصد استفاده کردند. مقاومت فشاری، چگالی، نفوذپذیری آب، هدایت حرارتی و مقاومت در برابر سایش سطحی بتن بازیافتی حاوی این سنگدانه‌ها تعیین شد. اگرچه مصالح بازیافتی ضعیف‌تر از سنگدانه‌های طبیعی بودند، اما در تقویت پیوند و مقاومت در برابر سایش به دلیل پیوند بهتر بین مصالح بازیافتی و خمیر سیمان به دلیل افزایش تخلخل سطح و زبری سنگدانه‌های مصنوعی بازیافت شده مؤثرتر بودند.

تحقیقات قبلی در زمینه رفتار خمشی اعضای بتنی با سنگدانه بازیافتی، نشان داد که استفاده از سنگدانه بازیافتی باعث کاهش ظرفیت لنگر خمشی و افزایش انتشار ترک می‌شود. الیاف فولادی نه تنها تشکیل ترک را کاهش می‌دهند بلکه کنترل و رشد آن‌ها را نیز کنترل می‌کنند [۵۵]. علاوه بر قابلیت پل زدن پس از ترک، الیاف در هنگام مقید بودن بتن، عرض و مساحت ترک

لذا در این تحقیق بتن‌های ساخته شده از سنگدانه‌های طبیعی و بازیافتی و اضافه کردن الیاف مختلف از جمله الیاف فولادی، پلی‌پروپیلن 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 مورد بررسی قرار گرفته است. آزمایش مقاومت خمشی چهار نقطه‌ای بر روی ۱۲ نمونه تیر در دو گروه سنگدانه طبیعی (۶ نمونه تیر) و سنگدانه بازیافتی (۶ نمونه تیر) انجام شد که در هر گروه یک نمونه تیر به عنوان نمونه شاهد و بدون الیاف و ۵ نمونه تیر حاوی الیاف بوده و در نمونه‌های دو گروه از الیاف فولادی، پلی‌پروپیلن و کورتا به صورت مجزا و ترکیبی استفاده شد. رفتار شکست و همچنین پارامترهای انرژی جذب شده، حالت شکست، شکل‌پذیری و ظرفیت بار نهایی تیرهای ساخته شده با سنگدانه‌های طبیعی و بازیافتی مورد بررسی و مقایسه قرار گرفت.

۲- معرفی نمونه‌ها

تمامی نمونه‌ها در مقیاس واقعی و سازه‌ای و با ابعاد $۰/۲ \times ۰/۳ \times ۱/۵$ متر مکعب 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 تقویت شده الیافی و سنگدانه طبیعی و بازیافتی می‌باشند. در جداول ۱ و ۲، نام‌گذاری نمونه‌های مورد بررسی نشان داده شده است. در شکل ۱ طرح و نحوه آرماتورگذاری تیرها نشان داده شده‌اند.

در نام‌گذاری انجام شده در جدول بالا منظور از RC بتن مسلح با سنگدانه طبیعی و RRC بتن مسلح با سنگدانه بازیافتی، SF الیاف فولادی، PPF الیاف پلی‌پروپیلن، KF الیاف کورتا است. به عنوان نمونه، نماد PPFRRRC به معنی تیر بتن مسلح با سنگدانه بازیافتی و حاوی الیاف پلی‌پروپیلن است.

آرماتورگذاری تیرها برای همه نمونه‌ها یکسان بوده و به صورت شکل ۱ می‌باشد. به عبارتی همه دوازده تیر ساخته شده با سنگدانه‌های طبیعی و مصنوعی دارای آرماتورگذاری یکسانی در جهت طولی و عرضی هستند.

۳- مصالح

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

را نیز کاهش می‌دهند [۵۶]. در حالت سخت شده، هنگامی که الیاف به درستی به بتن چسبیده باشند، در سطح میکرو ترک با ماتریس تعامل برقرار می‌کنند و به طور موقت این ترک‌ها را می‌بندند و رشد ناپایدار آن‌ها را به تاخیر می‌اندازند. اگر درصد حجمی الیاف به اندازه کافی زیاد باشد، این ممکن است منجر به افزایش مقاومت کششی ماتریس شود [۵۷]. پس از رسیدن به ظرفیت کششی بتن و ایجاد انسجام و تبدیل میکرو ترک‌ها به ماکرو ترک‌ها، الیاف با توجه به طول و ویژگی‌های پیوندی خود، بازدارنده ترک و رشد ترک را با استفاده از پل زدن به طور موثر ادامه می‌دهند. این پل ماکرو ترک، پس از اوج مکانیسم تقویت اولیه در اکثر کامپوزیت‌های بتنی تقویت شده با الیاف است. در بتن‌هایی با درصدی از الیاف با حجم کم تا متوسط، مقاومت کششی و خمشی کامپوزیت را افزایش نداد و فواید تقویت الیاف فقط در جذب انرژی یا افزایش چقرمگی فقط در رژیم پس از ترک خوردگی محدود شد. در مورد بتن‌هایی که الیاف بالایی دارد، مزایای آن در افزایش مقاومت کششی، پاسخ سخت شونده‌گی کرنشی قبل تمرکز از افزایش مقاومت در خارج از محل تمرکز ترک ذکر شد [۵۸]. هنگامی که عضو دارای الیاف فولادی در معرض خمش قرار گیرد، حضور آن‌ها باعث بهبود عملکرد خمشی می‌شود. استفاده از الیاف در محل ترک خوردگی باعث تاخیر در افزایش سطح ترک نیز شد. با جمع‌بندی مرور مطالعات، مشخص گردید که تحقیقات انجام شده در خصوص بتن‌های با سنگدانه‌های طبیعی و بازیافتی و بتن‌های الیافی به صورت زیر می‌باشد:

خصوصیات مکانیکی بتن‌های غیرمسلح با الیاف فولادی و الیاف مصنوعی،

رفتار خمشی تیرهای بتن مسلح با الیاف فولادی،

رفتار خمشی تیرهای بتن مسلح با الیاف مصنوعی،

رفتار خمشی تیرهای بتن مسلح با الیاف فولادی و الیاف پلی‌پروپیلن،

رفتار خمشی تیرهای بتن مسلح با سنگدانه‌های طبیعی و بازیافتی،

مطالعات خیلی کمی در خصوص بررسی و مقایسه اثرات الیاف فولادی و

الیاف مصنوعی در رفتار خمشی تیرهای بتن مسلح انجام شده است. همچنین

با توجه به بررسی‌های انجام شده در تحقیقات مشخص شد که مطالعات

زیادی بر روی جنبه‌های مختلف بتن‌های الیافی و همچنین بتن‌های ساخته

شده با سنگدانه‌های بازیافتی انجام شده و مطالعه خاصی در خصوص

بتن‌های ساخته شده با سنگدانه بازیافتی همراه با الیاف انجام نشده و یافت

نشده. در بیشتر مطالعات انجام شده تمرکز اصلی بر ظرفیت خمشی، ترک

خوردگی و نحوه شکست این تیرها بوده است.

جدول ۱. نام‌گذاری نمونه‌های تیر بتنی معمولی ساخته شده با سنگدانه های طبیعی

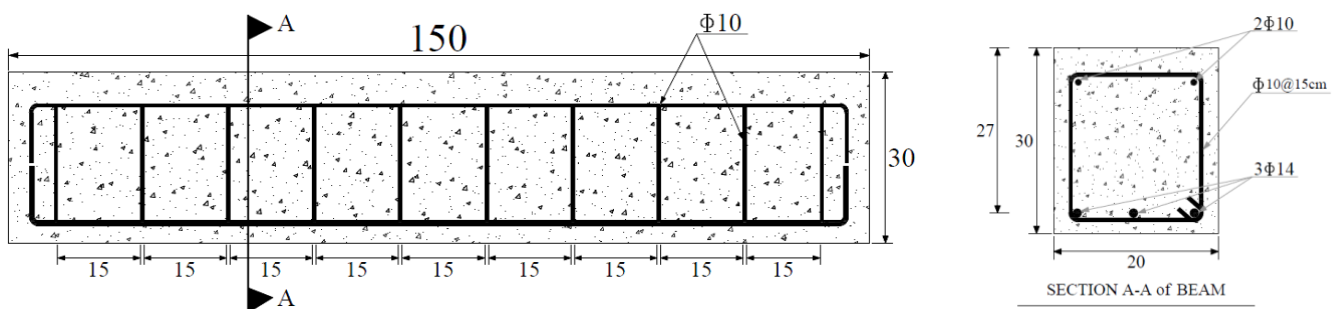
Table 1. Naming of typical concrete beam specimens made with natural aggregates

ردیف	توضیحات	الیاف	نماد
۱	تیر بتن مسلح معمولی (نمونه مرجع)	- - -	RC
۲	تیر تقویت شده با الیاف فولادی	فولادی (Steel)	SFRC
۳	تیر تقویت شده با الیاف پلیمری پلی پروپیلن	پلیمری پلی پروپیلن (PP)	PPFRC
۴	تیر تقویت شده با الیاف پلیمری میکس کورتا پلند	پلیمری کورتا پلند (Kortta Blend)	KFRC
۵	تیر تقویت شده با الیاف ترکیبی فولاد و کورتا پلند	ترکیبی، ۰/۳۵٪ فولاد + ۰/۱۵٪ میکس کورتا پلند	HFRC (1)
۶	تیر تقویت شده با الیاف ترکیبی فولاد و پلی پروپیلن	ترکیبی، ۰/۳۷۵٪ فولاد + ۰/۱۲۵٪ پلی پروپیلن	HFRC (2)

جدول ۲. نام‌گذاری نمونه‌های تیر بتنی ساخته شده با سنگدانه‌های بازیافتی

Table 2. Naming of concrete beam specimens made with recycled aggregates

ردیف	توضیحات	الیاف	نماد
۱	تیر بتن مسلح بازیافتی (نمونه مرجع)	- - -	RRC
۲	تیر تقویت شده با الیاف فولادی	فولادی (Steel)	SFRRC
۳	تیر تقویت شده با الیاف پلیمری پلی پروپیلن	پلیمری پلی پروپیلن (PP)	PPFRRC
۴	تیر تقویت شده با الیاف پلیمری میکس کورتا پلند	پلیمری کورتا پلند (Kortta Blend)	KFRRC
۵	تیر تقویت شده با الیاف ترکیبی فولاد و کورتا پلند	ترکیبی، ۰/۳۵٪ فولاد + ۰/۱۵٪ میکس کورتا پلند	HFRRRC (1)
۶	تیر تقویت شده با الیاف ترکیبی فولاد و پلی پروپیلن	ترکیبی، ۰/۳۷۵٪ فولاد + ۰/۱۲۵٪ پلی پروپیلن	HFRRRC (2)



شکل ۱. طرح و نحوه آرماتورگذاری تیرهای بتن مسلح با سنگدانه‌های طبیعی و بازیافتی

Fig. 1. Design and method of reinforcing reinforced concrete beams with natural and recycled aggregates

جدول ۳. آنالیز شیمیایی سیمان

Table 3. Chemical analysis of cement

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 ۴. مشخصات فیزیکی سیمان

Table 4. Physical properties of cement

نماد	الیاف
RC	---
SFRC	فولادی (Steel)

با استاندارد ASTM C136/C136M-14 استفاده شد. وزن‌های نمونه‌برداری جهت آزمایش دانه‌بندی برحسب الزامات ذکر شده در آیین‌نامه مذکور صورت گرفت [۶۳].

۳-۳-۱- سنگدانه‌های طبیعی

شن طبیعی مورد استفاده در این تحقیق، شن شکسته کوهی عاری از ذرات غیرمجاز رس، لای و مواد زیان‌آور بوده که برای تولید با درجه شکستگی ۱۰ میلی‌متر به معدن شن مورد نظر (واقع در اطراف شهر خرم‌آباد) سفارش داده شد و پس از غربال‌گری، با حداکثر اندازه اسمی دانه‌های ۱۰ میلی‌متر و با درصد شکستگی ۶۷ درصد، طبق استانداردهای ASTM C125-16 و ASTM D5821-13(2017) از محل مذکور تامین گردید [۶۴ و ۶۵]. 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 به وجود می‌آید، مقدار کمینه موجود در آیین‌نامه مربوط به طرح اختلاط (ACI 211.1-91 (R2002)) در نظر گرفته شد [۶۶].

ماسه طبیعی مورد استفاده در این تحقیق، ماسه کوهی شکسته شسته شده با مدول نرمی ۲/۳۹ (طبق استاندارد ASTM C136 / C136M - 14) و ارزش ماسه‌ای ۸۵ درصد طبق استاندارد ASTM D2419 - 14، بود [۶۷ و ۶۳]. که به کارخانجات ماسه‌شویی اطراف شهر خرم‌آباد سفارش و پس از غربال، از محل مذکور تامین گردید.

۳-۳-۱- سیمان

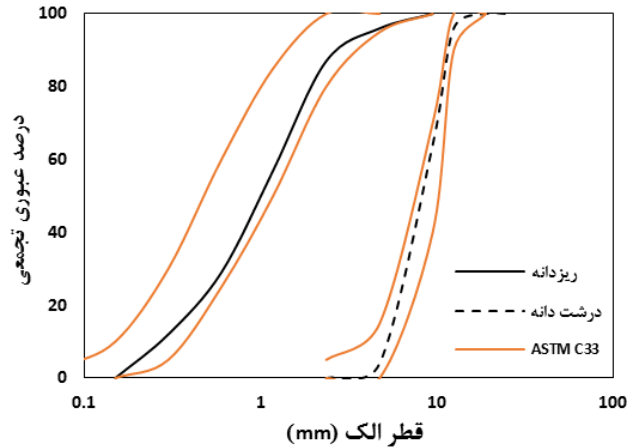
سیمان استفاده شده در تحقیق، سیمان پرتلند نوع II با چگالی نسبی (gr/cm³) ۳/۱۵، منطبق بر آیین‌نامه ACI3 18-14 و بر اساس استاندارد ASTM C150/C150M-17 می‌باشد [۶۰ و ۵۹]. در جداول ۳ و ۴ به ترتیب، آنالیز شیمیایی و مشخصات فیزیکی سیمان مورد استفاده در تحقیق نشان داده شده است.

۳-۳-۲- آب

آب استفاده شده در تحقیق، آب شرب معمولی شهر خرم‌آباد (عاری از آلودگی‌های مضر) می‌باشد. که بنا بر توصیه آیین‌نامه ACI 318-14، الزامات مربوط به استاندارد ASTM C1602/C1602M-12 را برآورده می‌سازد [۶۱ و ۵۹].

۳-۳-۳- سنگدانه

سنگدانه‌های مورد استفاده برای ساخت نمونه‌های تحقیق شامل دو گروه سنگدانه‌های طبیعی و سنگدانه‌های بازیافتی می‌باشند که به ترتیب در ساخت تیرهای مورد استفاده قرار گرفتند. در ادامه مشخصات هر یک از دو گروه سنگدانه‌های طبیعی و بازیافتی مورد بررسی قرار خواهد گرفت. دانه‌بندی سنگدانه‌های درشت و ریز بر اساس ضوابط مندرج در آیین‌نامه ASTM C33/C33M-16e1 صورت گرفت [۶۲]. برای مشخص نمودن منحنی دانه‌بندی سنگدانه‌های مورد استفاده، از آزمایش الک مطابق



شکل ۲. منحنی لگاریتمی دانه‌بندی شن و ماسه طبیعی و بازیافتی

Fig. 2. Logarithmic curve of natural and recycled gravel and sand grading

شن بازیافتی^۱ مورد استفاده در این تحقیق، درشت‌دانه شکسته شده با حداکثر اندازه اسمی ۹ میلی‌متر طبق آیین‌نامه ASTM C125-16، از مصالح بتنی قدیمی مرجع توسط دستگاه سنگ‌شکن بود [۶۴]، که 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 شد و پس از تولید با درصد شکستگی ۸۷ درصد طبق استاندارد (ASTM D5821-13(2017)، به محل آزمایشگاه سازه دانشگاه منتقل و غربال گردید. حداکثر اندازه اسمی درشت‌دانه‌ها به منظور یکسان بودن طرح اختلاط در گروه نمونه‌های طبیعی و بازیافتی با توجه به آیین‌نامه (ACI 211.1-91 (R2002)، با تقریب مناسب مشابه با درشت‌دانه‌های طبیعی در نظر گرفته شد و سفارش داده شد [۶۶].

ماسه بازیافتی مورد استفاده در این تحقیق، ریزدانه حاصل از شکستن و خرد کردن مصالح بتنی قدیمی مرجع، توسط دستگاه سنگ‌شکن بوده که با حداکثر اندازه اسمی دانه‌های ۲ میلی‌متر (گذرنده از الک شماره ۸، طبق آیین‌نامه ASTM C125-16) به کارخانه سنگ‌شکن (واقع در اطراف شهر خرم‌آباد) سفارش و پس از تولید به محل آزمایشگاه سازه دانشگاه منتقل و غربال گردید [۶۴]. سپس به منظور حذف ذرات رس و ناخالصی‌ها در حوضچه‌های مصنوعی استاندارد با دقت بالا مورد شست‌وشو قرار گرفته و جهت خشک شدن دپو گردید. مدول نرمی این ماسه (طبق آیین‌نامه ASTM C136/C136M-14) ۲/۰۷ و ارزش ماسه‌ای آن ۸۷ درصد بود (طبق استاندارد ASTM D2419-14) [۶۷].

در شکل ۲ منحنی لگاریتمی دانه‌بندی شن و ماسه طبیعی مورد استفاده در آزمایش نشان داده شده است [۶۳]. مطابق آیین‌نامه ASTM C136/14-136M-14، مدول نرمی سنگدانه‌های ماسه‌ای برابر است با ۲/۳۹ محاسبه و به دست آمد.

۳-۳-۲ سنگدانه‌های بازیافتی

بازیافت بتن در حالت کلی شامل یک فرآیند پنج مرحله‌ای می‌باشد. 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 می‌باشند. 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 [۶۸].

جهت تولید مصالح بازیافت شده، تعداد ۴۰۰ نمونه مکعبی شکل مقاومت‌سنجی بتن با ابعاد ۱۵×۱۵×۱۵ سانتی‌متر مکعب و با مقاومت فشاری مشخصه «متوسط» و با وزن تقریبی ۲ تن، از محل آزمایشگاه مکانیک خاک مستقر در سایت پروژه انبوه‌سازی شهید نقدی خرم‌آباد جمع‌آوری و دپو گردید و سپس جهت خردایش و انجام فرآیند بازیافت (مطابق با استانداردهای ASTM D8038-16 و ACI 555R-01) به کارخانه سنگ‌شکن واقع در اطراف شهر خرم‌آباد منتقل گردید [۷۰ و ۶۹]. در شکل ۳ نمونه‌های دپو شده مکعبی شکل بتن قدیمی و نحوه انتقال نمونه‌ها و نمونه‌های در حال انتقال به کارخانه سنگ‌شکن جهت انجام فرآیند بازیافت نشان داده شده‌اند.



شکل ۳. نمونه‌های دیو شده مکعبی شکل بتن قدیمی و انتقال به کارخانه سنگ‌شکن

Fig. 3. Cube-shaped samples of old concrete and transported to a crushing plant

جدول ۵. مشخصات مکانیکی میلگردهای استفاده شده

Table 5. Mechanical specifications of used rebars

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

کشش مستقیم میلگرد شماره ۱۰ (در نمونه شماره ۳) و همچنین در شکل ۵، دستگاه کشش مستقیم میلگرد و نحوه کرنش و گسیختگی میلگرد مشاهده می‌شوند.

۳-۵- الیاف‌ها

سه نوع الیاف مختلف شامل الیاف‌های فولادی، پلی‌پروپیلن و کورتا در این تحقیق مورد استفاده قرار گرفت. تصویری از این الیاف‌ها در شکل ۶ نشان داده شده است. الیاف فولادی از نوع دو سر قلاب با قطر ۰/۸ و طول ۵۰ میلی‌متر، الیاف پلی‌پروپیلن با طول ۱۲ میلی‌متر و الیاف کورتا با طول ۵۴ میلی‌متر مورد استفاده قرار گرفت. مشخصات تکمیلی این الیاف‌ها در جدول ۶ آمده است.

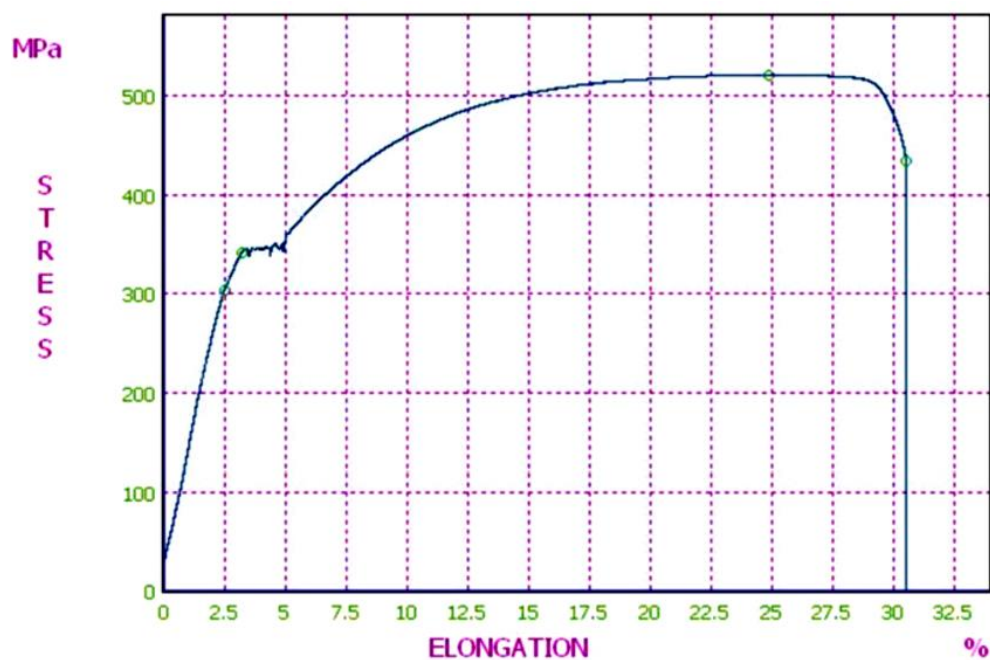
۴- طرح اختلاط

طرح اختلاط در هر دو گروه نمونه‌های طبیعی و بازیافتی ثابت و بر مرجعی آیین‌نامه (ACI 211.1-91 (R2002)) بوده و با توجه به مرجع

شست‌وشوی ماسه بازیافت شده در حوضچه‌های مصنوعی استاندارد انجام گردید. در شکل ۲ منحنی لگاریتمی دانه‌بندی شن و ماسه بازیافتی مورد استفاده در آزمایش نشان داده شده است [۶۳].

۳-۴- میلگرد

تمامی میلگردهای مورد استفاده جهت کاربرد در تیرهای هر دو گروه از نوع AII و با شماره ۱۰ و ۱۴ بوده و مشخصات مکانیکی میلگردهای مصرفی در جدول ۵ نشان داده شده است. لازم به ذکر است که این مشخصات از آزمایش کشش مستقیم میلگرد توسط دستگاه کشش یونیورسال، منطبق بر بند ۲۰-۲-۱-۲ از آیین‌نامه ACI 318-14 و استاندارد ASTM A370 - 17a به دست آمد [۷۲ و ۷۱]. نتایج به دست آمده منطبق بر الزامات موجود در بندهای ۲۰-۲-۲-۲۰ و ۲۰-۲-۲-۲۰ از آیین‌نامه ACI 318-14 و استاندارد ASTM A615 / A615M - 16 بود [۷۳] و [۷۱]. به عنوان نمونه در شکل ۴، منحنی تنش - کرنش حاصل از آزمایش



شکل ۴. منحنی تنش - کرنش میلگرد با قطر ۱۰ میلی‌متر (نمونه شماره ۳)

Fig. 4. Stress-strain curve of rebar with a diameter of 10 mm (Sample No. 3)



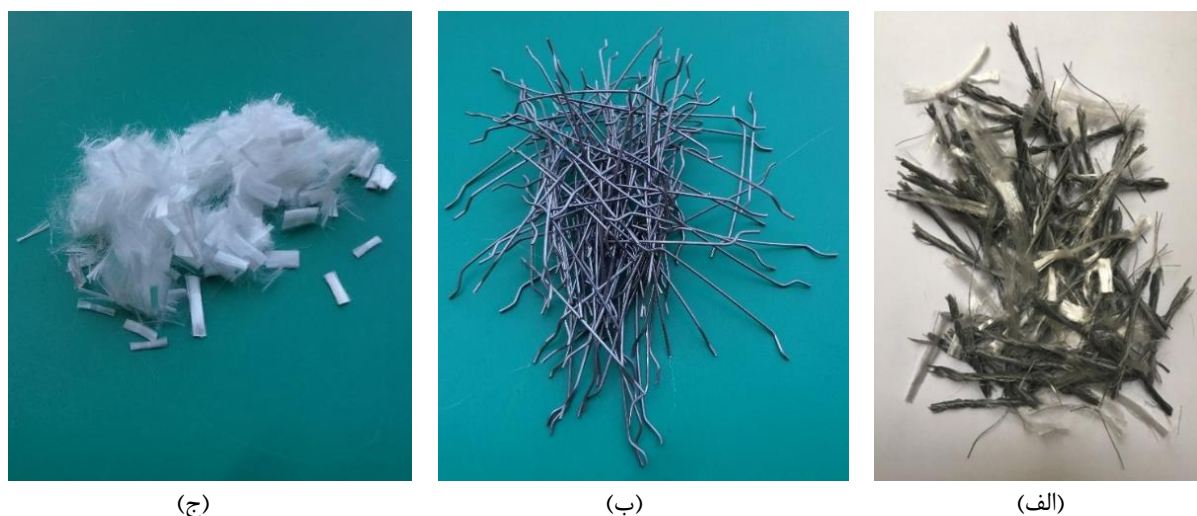
شکل ۵. دستگاه کشش مستقیم میلگرد و نحوه کرنش و گسیختگی میلگرد

Fig. 5. Direct rebar traction device and how the rebar is strained and broken

جدول ۶. مشخصات الیاف‌های مورد استفاده.

Table 6. Specifications of the fibers used

نوع الیاف	طول (mm)	قطر (mm)	چگالی (ton/m^3)	مدول الاستیسیته (GPa)	مقاومت کششی (MPa)
فولادی	۵۰	۰/۸	۷/۸۵	۲۰۰	۱۱۰۰
پلی پروپیلن	۱۲	-	۰/۹۱	۲/۷	۴۰۰
کورتا	۵۴	-	۰/۹۴	۳/۵	۴۷۵



شکل ۶. تصویری از (الف) الیاف‌های کورتا، (ب) فولادی و (ج) پلی پروپیلن مورد استفاده.

Fig. 6. Picture of (a) Korta fibers, (b) steel and (c) polypropylene used

اختلاط ادامه داده شد.

روش اختلاط در مورد نمونه‌های تقویت شده با الیاف فلزی به این صورت بود که ابتدا ریز دانه‌ها و درشت دانه‌ها 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 بقیه آب به ترکیب اضافه شده و به مدت ۱ دقیقه اختلاط ادامه یافت. در پایان الیاف فولادی به اختلاط بتنی افزوده شد و اختلاط به مدت ۲ دقیقه ادامه یافت. روش اختلاط در مورد نمونه‌های تقویت شده با الیاف مصنوعی به این صورت بود که ابتدا ریز دانه‌ها و درشت دانه‌ها به مدت ۳۰ ثانیه با هم مخلوط شد، سپس یک سوم وزنی آب اختلاط به مخلوط اضافه شده و به مدت ۳۰ ثانیه اختلاط ادامه گردید. در ادامه سیمان و 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

بودن اندازه دانه‌ها در آیین‌نامه 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 مرجع، جهت مقایسه و مشاهده تغییرات نمونه‌ها (با رعایت الزامات بند ۱۹-۲-۱-۱ از آیین‌نامه ACI 318-14 - ۳۰ مگاپاسکال [۷۱])، حداکثر اندازه اسمی درشت دانه‌ها (شن) و ریزدانه‌ها (ماسه) برای هر دو بخش طبیعی و بازیافتی یکسان و به ترتیب برابر ۱۰ میلی‌متر (مانند روی الک شماره ۳/۸) برای درشت دانه‌ها، و ۲ میلی‌متر (گذرنده از الک شماره ۸#) برای ریز دانه‌ها در نظر گرفته شد.

روش اختلاط در مورد نمونه‌های مرجع به این صورت بود که ابتدا ریز دانه‌ها و درشت دانه‌ها 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 پایان سیمان و بقیه آب به ترکیب اضافه شده و به مدت ۲ دقیقه

جدول ۷. طرح اختلاط نمونه‌های طبیعی و بازیافتی برای یک متر مکعب بر مبنای آیین‌نامه [۶۶].

Table 7. Mixing plan of natural and recycled samples for one cubic meter according to the regulations [66].

الیاف با حجم ۰/۵ درصد			ماسه	شن	نسبت آب به			نام نمونه
PP (kg)	فولاد (kg)	کورتا (kg)	طبیعی یا بازیافتی (kg)	طبیعی یا بازیافتی (kg)	آب (kg)	سیمان (kg)	سیمان (W/C)	
-	-	-	۸۸۹/۲۵	۸۳۰	۲۰۰/۷۵	۳۶۵	۰/۵۵	RC , RRC
-	۳۹	-	۸۸۹/۲۵	۸۳۰	۲۰۰/۷۵	۳۶۵	۰/۵۵	SFRC,SFRRRC
۴/۵۵	-	-	۸۸۹/۲۵	۸۳۰	۲۰۰/۷۵	۳۶۵	۰/۵۵	PPFRC,PPFRRRC
-	-	۴/۵۵	۸۸۹/۲۵	۸۳۰	۲۰۰/۷۵	۳۶۵	۰/۵۵	KFRC,KFRRRC
٪۰/۱۲۵ کورتا + ٪۰/۳۷۵ فولاد								
-	۲۷/۳	۱/۳۶۵	۸۸۹/۲۵	۸۳۰	۲۰۰/۷۵	۳۶۵	۰/۵۵	HFRC(1),HFRRRC(1)
٪۰/۱۵ PP + ٪۰/۳۵ فولاد								
۱/۱۳۷	۲۹/۲۵	-	۸۸۹/۲۵	۸۳۰	۲۰۰/۷۵	۳۶۵	۰/۵۵	HFRC(2),HFRRRC(2)



شکل ۷. بافت بتن‌های طبیعی و بازیافتی تقویت شده با الیاف: الف- بتن طبیعی با الیاف فولادی، ب- بتن طبیعی با الیاف PP و ج- بتن بازیافتی با الیاف کورتا

Fig. 7. Texture of natural and recycled fibers reinforced with fibers: a- Natural concrete with steel fibers, b- Natural concrete with PP fibers and c- Recycled concrete with Kortta fibers

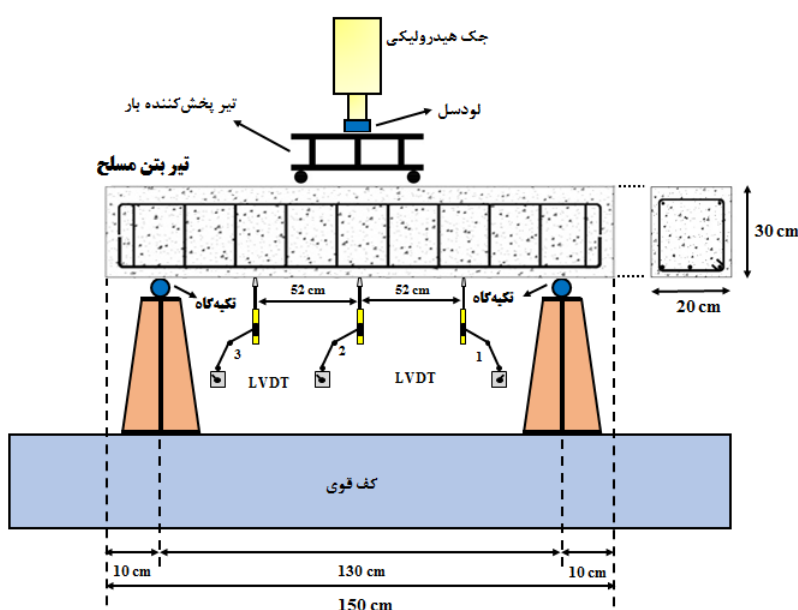
مکعب اختلاط بتنی، نشان داده شده است [۶۶]. لازم به توضیح است که مقادیر اجزای اختلاط (سنگدانه، سیمان و آب) و افزودنی‌ها (الیاف) جهت کاربرد در نمونه‌ها (تیرها)، بر مبنای حجم نمونه و به صورت کسری از مقادیر مورد استفاده در یک متر مکعب محاسبه شده و به ترتیب با ترازوهای دیجیتال با دقت ۱۰ گرم و ۰/۰۱ گرم توزین گردیدند. بافت بتن‌های طبیعی و بازیافتی تقویت شده تولیدی در شکل ۷ نشان داده شده است.

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 الیاف جلوگیری به عمل آید. در جدول ۷ طرح اختلاط استفاده شده در نمونه‌های آزمایش در دو گروه طبیعی و بازیافتی بر مبنای آیین‌نامه (ACI 211.1-91 (R2002)، برای یک متر



شکل ۸. نحوه بستن شبکه آرماتور و آماده‌سازی و روغن‌زنی قالب‌های فلزی

Fig. 8. How to close the reinforcement grid and prepare and lubricate metal molds



شکل ۹. چیدمان آزمایش خمش چهار نقطه‌ای نمونه‌ها

Fig. 9. Arrangement of four-point bending test of samples

۵- ساخت نمونه‌ها

جهت بتن‌ریزی نمونه‌ها از قالب فلزی استفاده شد. 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 شد و در خم کردن میلگردها مقادیر طول و قطر قالب (خم) طبق آیین‌نامه ACI 318-14 محاسبه و در نظر گرفته شد [۷۱] و توسط دستگاه خم‌کن، خم شدند. ضمن اینکه از سیم مفتول برای بستن آرماتورها به هم استفاده گردید. در شکل ۸، نحوه بستن شبکه آرماتور و آماده‌سازی قالب فلزی مشاهده می‌شود.

۶- چیدمان آزمایش

برای آزمایش تیرها از چیدمان آزمایشگاهی همانند شکل ۹ استفاده شد. همانطور که مشاهده می‌گردد از بارگذاری چهار نقطه‌ای برای انجام آزمایش‌ها استفاده شد. محل قرارگیری سه تغییر مکان‌سنج (LVDT) و فواصل بین آن‌ها در شکل ۹ نشان داده شده است.

بارگذاری به صورت استاتیکی بوده که توسط جک هیدرولیک صورت گرفت. میزان جابجایی نمونه تحت بارگذاری توسط تغییر مکان‌سنج‌ها که در زیر نمونه قرار داده شده‌اند، کنترل و ثبت گردید. لازم به ذکر است که جک هیدرولیک به بارسنج متصل شده و بار جک توسط آن به دستگاه ثبات

جدول ۸. مقاومت فشاری، مدول الاستیسیته و مدول گسیختگی بتن‌های حاوی سنگدانه طبیعی.

Table 8. Compressive strength, modulus of elasticity and modulus of rupture of concretes containing natural aggregates

نمونه	شماره آزمونه	ابعاد نمونه (استوانه) (cm)	مقاومت فشاری (MPa)	کاهش ارتفاع (mm)	مدول الاستیسیته (E_c) (GPa)	مدول گسیختگی (f_r) (MPa)	میانگین مقاومت فشاری (MPa)	معیار پذیرش ACI
RRC	۱	۱۵×۳۰	۳۵/۱۹	۱/۲۶	۲۷/۸۸	۳/۶۸		
	۲	۱۵×۳۰	۳۶/۳۲	۱/۲۲	۲۸/۳۲	۳/۸۹	۳۶/۳۵	۳۰<۳۶/۳۵
	۳	۱۵×۳۰	۳۷/۵۴	۱/۱۳	۲۸/۸۰	۳/۷۹		
SFRC	۱	۱۵×۳۰	۴۳/۹۰	۲/۲۵	۳۱/۱۴	۴/۱۱		
	۲	۱۵×۳۰	۴۸/۴۸	۱/۷۰	۳۲/۷۲	۴/۳۲	۴۶/۶	۳۰<۴۶/۶
	۳	۱۵×۳۰	۴۷/۴۲	۱/۳۳	۳۲/۳۶	۴/۲۷		
PPFRC	۱	۱۵×۳۰	۳۵/۹۰	۲/۱۱	۲۸/۱۶	۳/۷۱		
	۲	۱۵×۳۰	۳۷/۰۷	۱/۷۵	۲۸/۶۲	۳/۷۷	۳۶/۸۳	۳۰<۳۶/۸۳
	۳	۱۵×۳۰	۳۷/۵۳	۱/۵۳	۲۸/۷۹	۳/۸۰		
KFRC	۱	۱۵×۳۰	۳۲/۶۵	۲/۹۲	۲۶/۸۶	۳/۵۴		
	۲	۱۵×۳۰	۳۴/۶۵	۱/۹۶	۲۷/۶۷	۳/۶۵	۳۷/۸۳	۳۰<۳۷/۸۳
	۳	۱۵×۳۰	۴۶/۲۱	۱/۲۷	۳۱/۹۵	۴/۲۲		
HFRC (1)	۱	۱۵×۳۰	۴۶/۰۳	۱/۳۹	۳۱/۸۹	۴/۲۰		
	۲	۱۵×۳۰	۴۸/۷۲	۱/۲۱	۳۱/۸۱	۴/۳۳	۴۷/۴۷	۳۰<۴۷/۴۷
	۳	۱۵×۳۰	۴۷/۶۸	۱/۳۲	۳۲/۴۵	۴/۲۸		
HFRC (2)	۱	۱۵×۳۰	۴۲/۱۷	۱/۶۷	۳۰/۵۲	۴/۰۲		
	۲	۱۵×۳۰	۴۳/۱۱	۱/۴۸	۳۰/۸۶	۴/۰۷	۴۳/۱۷	۳۰<۴۳/۱۷
	۳	۱۵×۳۰	۴۴/۲۳	۲/۳۳	۳۱/۲۶	۴/۱۲		

$$E_c = 4700 \sqrt{f'_c} \quad (1)$$

$$f_r = 0.62 \lambda \sqrt{f'_c} \quad (2)$$

داده‌ها ارسال شده و خوانده شد. در محل اتصال جک به بارسنگ و بارسنگ به تیر بارگذاری از پوشش الیافی (نویزگیر) جهت کم کردن خطا و نویز داده‌ها در اتصال فلز به فلز استفاده گردید، برای بررسی کرنش میلگردها با نصب کرنش‌سنج‌هایی در زیر محل بارگذاری، کرنش‌های میلگرد فشاری و میلگردهای کششی به دستگاه ثبات داده‌ها ارسال شده و زمان تسلیم شدن آن‌ها را با توجه به نتایج آزمایش کشش مستقیم میلگردها استخراج گردید.

۷- نتایج و بحث

۷-۱- مقاومت فشاری

برای به دست آوردن مقاومت فشاری مشخصه هر نمونه (تیر)، مطابق با بند ۲۶-۱۲-۱-۱، از آیین‌نامه ACI 318-14 از سه نمونه (آزمونه) استوانه‌ای با قطر ۱۵ سانتی‌متر و ارتفاع ۳۰ سانتی‌متر استفاده شده است. [۵۹].

مدول الاستیسیته و مدول گسیختگی بتن با استفاده از روابط (۱) و (۲)

محاسبه می‌گردند [۵۹]:

اطلاعات استخراج شده از آزمون مقاومت فشاری ۲۸ روزه نمونه‌های مقاومت‌سنجی استوانه‌ای (طبق الزام بند ۱۹-۲-۱-۳ از آیین‌نامه ACI 318-14، [۷۱]) و رعایت الزام بند ۲۶-۱۲-۱-۱-۱ (b) از آیین‌نامه ACI 318-14 (در مورد انطباق با استاندارد ASTM C1077-17)، 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 ACI 318-14)، در جداول ۸ و ۹ ارائه گردید [۷۴ و ۷۱].

جک بتن‌شکن تمام اتوماتیک ۲۰۰ تنی منطبق با استانداردهای

جدول ۹. مقاومت فشاری، مدول الاستیسیته و مدول گسیختگی بتن‌های حاوی سنگدانه بازیافتی.

Table 9. Compressive strength, modulus of elasticity and modulus of rupture of concretes containing recycled aggregates

معیار پذیرش ACI	میانگین مقاومت فشاری (MPa)	مدول گسیختگی (f_T) (MPa)	مدول الاستیسیته (GPa) (E_c)	کاهش ارتفاع (mm)	مقاومت فشاری (MPa)	ابعاد نمونه (استوانه) (cm)	شماره آزمون	نمونه
۳۰ < ۳۲/۸۱	۳۲/۸۱	۳/۵۶	۲۶/۹۹	۱/۵۳	۳۲/۹۷	۱۵×۳۰	۱	RC
		۳/۵۴	۲۶/۸۶	۴/۶۵	۳۲/۶۵	۱۵×۳۰	۲	
		۳/۵۵	۲۶/۹۲	۲/۷۴	۳۲/۸۱	۱۵×۳۰	۳	
۳۰ < ۳۸/۳۸	۳۸/۳۸	۴/۱۰	۳۱/۱۱	۲/۴۸	۴۳/۸	۱۵×۳۰	۱	SFRC
		۳/۹۱	۲۹/۶۴	۱/۱۳	۳۹/۷۶	۱۵×۳۰	۲	
		۳/۴۸	۲۶/۴۱	۳/۵۴	۳۱/۵۸	۱۵×۳۰	۳	
۳۰ < ۳۳/۰۷	۳۳/۰۷	۳/۵۵	۲۶/۹۳	۱/۵۳	۳۲/۸۲	۱۵×۳۰	۱	PPFRC
		۳/۵۶	۲۷/۰۲	۱/۹۱	۳۳/۰۴	۱۵×۳۰	۲	
		۳/۵۸	۲۷/۱۴	۱/۳۷	۳۳/۳۵	۱۵×۳۰	۳	
۳۰ < ۳۴/۵۵	۳۴/۵۵	۳/۴۲	۲۵/۹۴	۲/۶۹	۳۰/۴۵	۱۵×۳۰	۱	KFRC
		۳/۶۵	۲۷/۶۶	۱/۶۷	۳۴/۶۴	۱۵×۳۰	۲	
		۳/۸۵	۲۹/۱۹	۲/۲۲	۳۸/۵۸	۱۵×۳۰	۳	
۳۰ < ۳۹/۹۱	۳۹/۹۱	۴	۳۰/۲۹	۱/۸۸	۴۱/۵۴	۱۵×۳۰	۱	HFRC (1)
		۳/۸۴	۲۹/۱۱	۲/۲۸	۳۸/۳۶	۱۵×۳۰	۲	
		۳/۹۱	۲۹/۶۷	۳/۶۵	۳۹/۸۴	۱۵×۳۰	۳	
۳۰ < ۳۵/۳۳	۳۵/۳۳	۳/۷۵	۲۸/۴۵	۳/۵۷	۳۶/۶۴	۱۵×۳۰	۱	HFRC (2)
		۳/۷۴	۲۸/۳۶	۱/۱۶	۳۶/۴۱	۱۵×۳۰	۲	
		۳/۵۵	۲۶/۹۷	۱/۶۵	۳۲/۹۴	۱۵×۳۰	۳	

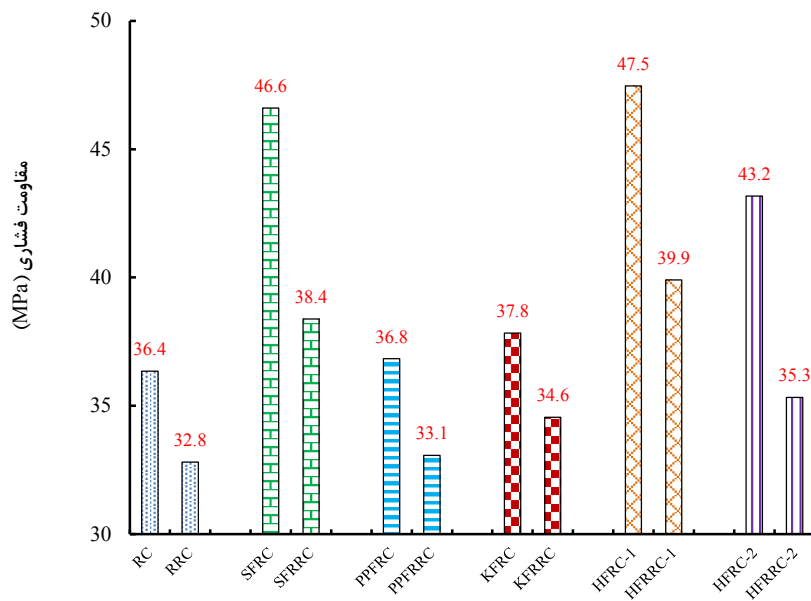
نسبت به نمونه مرجع ۳۱، ۲۸، ۱۹، ۴ و ۱ درصد برای نمونه‌های با سنگدانه طبیعی و ۲۲، ۱۷، ۸، ۵ و ۱ درصد برای نمونه‌های با سنگدانه بازیافتی به ترتیب مربوط به نمونه هیبریدی فولادی و کورتا، نمونه الیاف مجزای فولادی، نمونه الیاف هیبریدی فولادی و پلی‌پروپیلن، الیاف مجزای کورتا و الیاف مجزای پلی پروپیلن ثبت شد.

الیاف هیبریدی (فولادی و کورتا) نسبت به الیاف مجزا (فولادی) باعث افزایش حداکثر ۳ درصدی مقاومت فشاری در نمونه‌های طبیعی و حداکثر ۵ درصدی در نمونه‌های بازیافتی شد.

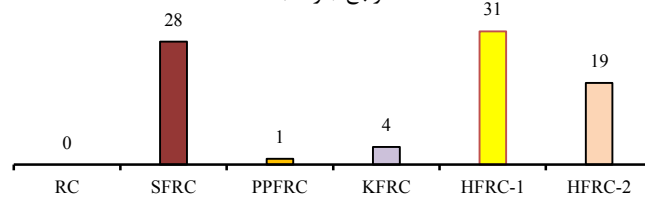
در بین جفت نمونه‌های مشابه طبیعی و بازیافتی از هر دو گروه، نمونه‌های ساخته شده از سنگدانه‌های بازیافتی مقاومت فشاری کمتری را ثبت نمودند و بیشترین مقدار کاهش مربوط به نمونه هیبریدی الیاف فولادی و پلی‌پروپیلن و حدود ۱۸ درصد مشاهده شد و کمترین مقدار کاهش مربوط

به جهت انجام آزمایش مقاومت فشاری بر روی نمونه‌های استوانه‌ای استفاده گردید [۷۵ و ۷۴].

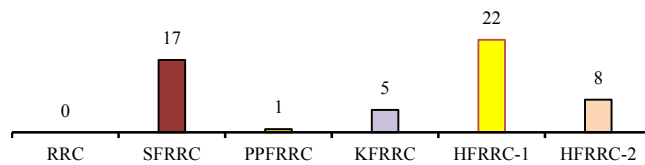
در شکل ۱۰ نمودار مقاومت فشاری نمونه‌های الیافی هیبریدی و مجزا برای نمونه‌های با سنگدانه طبیعی و بازیافتی نشان داده شده است. همچنین در این نمودار مقدار افزایش مقاومت فشاری نمونه‌های الیافی نسبت به نمونه مرجع بدون الیاف مقایسه شده است. همانطوری که در این شکل ملاحظه می‌گردد استفاده از الیاف باعث افزایش مقاومت فشاری نمونه‌ها شد، هم در نمونه‌های طبیعی و هم در نمونه‌های بازیافتی، بیشترین مقدار افزایش مقاومت فشاری نسبت به نمونه مرجع، مربوط به نمونه حاوی الیاف هیبریدی فولادی و کورتا بوده و کمترین مقدار افزایش مربوط به نمونه حاوی الیاف مجزای پلی‌پروپیلن مشاهده گردید. مقدار افزایش مقاومت فشاری نمونه‌ها



تغییرات مقاومت فشاری نمونه های طبیعی نسبت به نمونه مرجع (درصد)

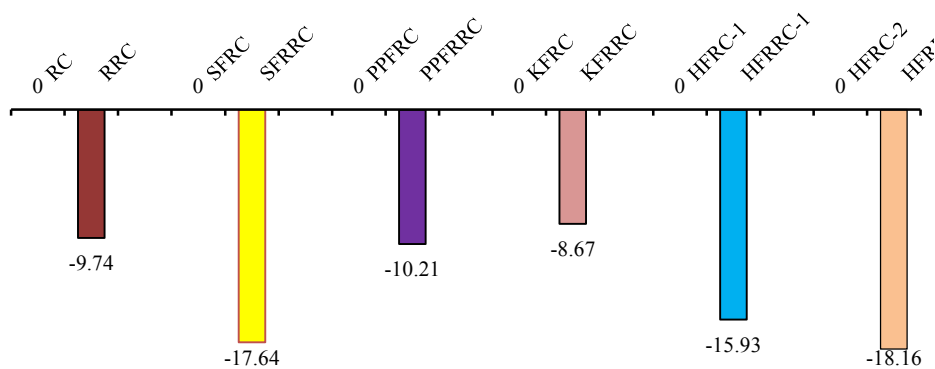


تغییرات مقاومت فشاری نمونه های بازیافتی نسبت به نمونه مرجع (درصد)



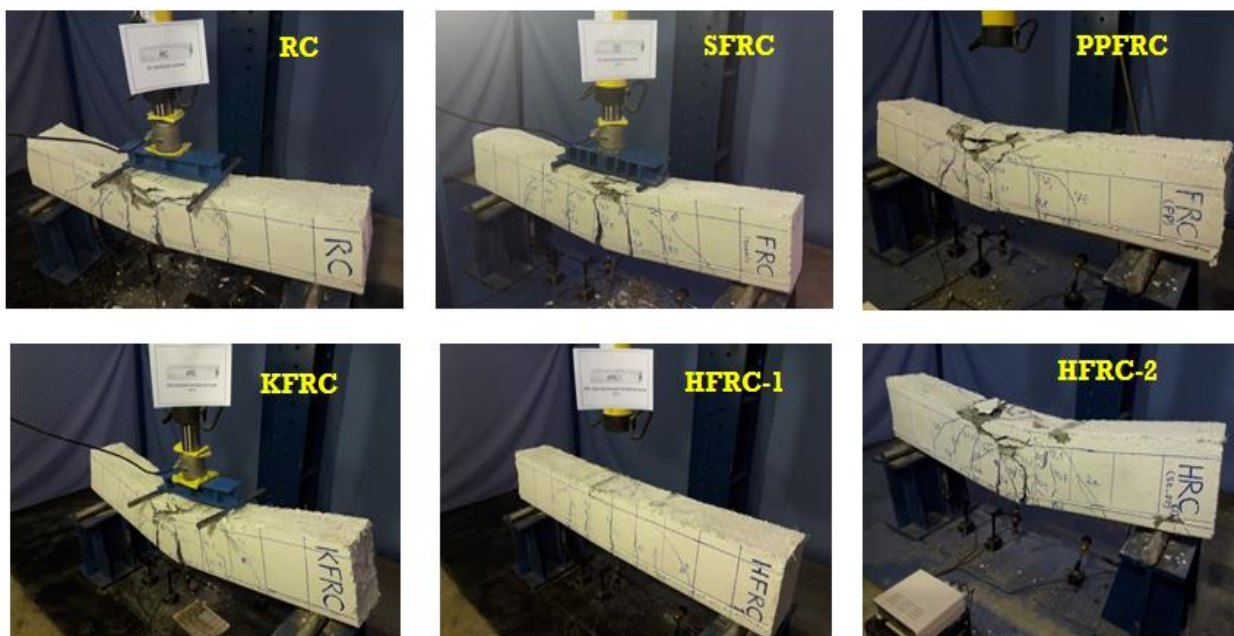
شکل ۱۰. مقاومت فشاری نمونه های بتنی حاوی سنگدانه طبیعی و بازیافتی با الیاف مجزا و هیبریدی

Fig. 10. Compressive strength of concrete specimens containing natural and recycled aggregates with separate and hybrid fibers



شکل ۱۱. مقدار کاهش مقاومت فشاری نمونه‌های بازیافتی نسبت به نمونه‌های طبیعی با الیاف مجزا و هیبریدی

Fig. 11. The amount of reduction in compressive strength of recycled samples compared to natural samples with separate and hybrid fibers



شکل ۱۲. آزمایش مقاومت خمشی تیرهای بتن مسلح با سنگدانه طبیعی با الیاف مجزا و هیبریدی

Fig. 12. Flexural strength test of reinforced concrete beams with natural aggregate with separate and hybrid fibers

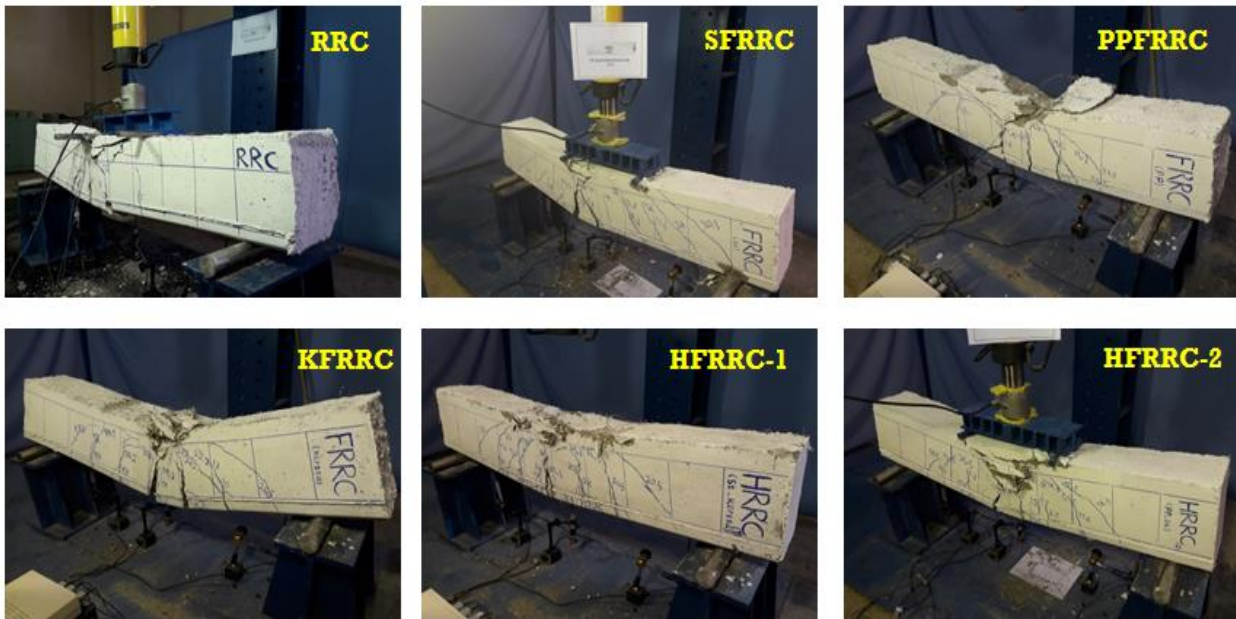
مجزای کورتا به ترتیب مقادیر کاهش برابر با ۱۸/۱۶، ۱۷/۶۴، ۱۵/۹۳، ۱۰/۲۱، ۹/۷۴ و ۸/۶۷ درصد را نشان دادند.

۷-۲- نمودار بار - تغییر شکل

در شکل ۱۲ همه شش نمونه حاوی سنگدانه طبیعی تحت آزمایش لنگر خمشی نشان داده شده است. همچنین در شکل ۱۳ شش نمونه حاوی سنگدانه بازیافتی تحت آزمایش لنگر خمشی نیز نشان داده شده است.

به نمونه بتنی حاوی الیاف مجزای کورتا و حدود ۹ درصد به دست آمد. این مقایسه در شکل ۱۱ نشان داده شده است.

در شکل ۱۱ مقدار کاهش مقاومت فشاری نمونه‌های بازیافتی در جفت نمونه‌های مشابه طبیعی و بازیافتی ارائه شده است. مقدار کاهش در مقدار مقاومت فشاری نمونه‌های بازیافتی نشان می‌دهد که نمونه‌های حاوی الیاف هیبریدی فولادی و پلی‌پروپیلن، الیاف مجزای فولادی، الیاف هیبریدی فولادی و کورتا، الیاف مجزای پلی‌پروپیلن، نمونه مرجع و نمونه الیاف



شکل ۱۳. آزمایش مقاومت خمشی تیرهای بتن مسلح با سنگدانه بازیافتی با الیاف مجزا و هیبریدی

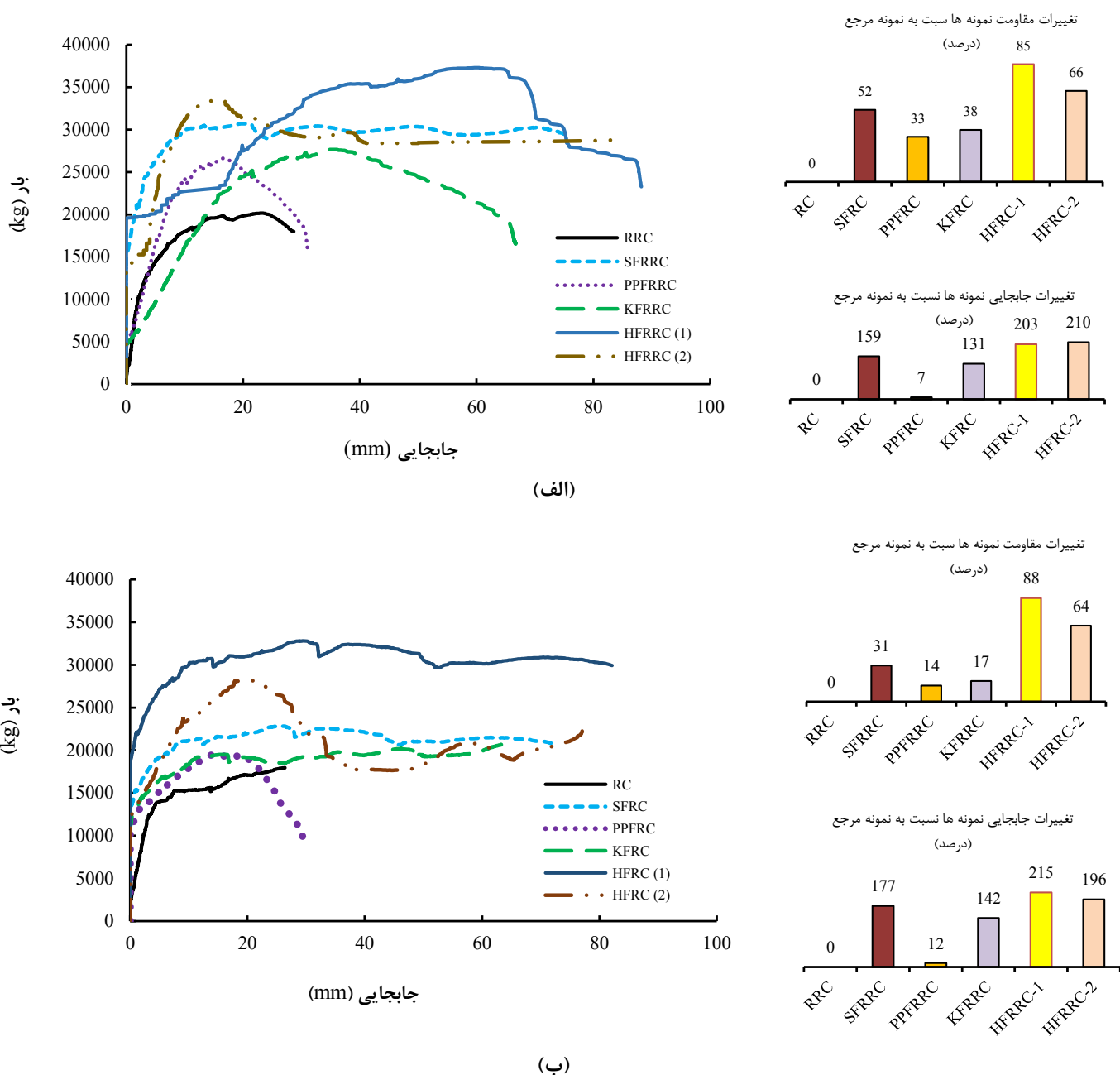
Fig. 13. Flexural strength test of reinforced concrete beams with recycled aggregates with separate and hybrid fibers

در شکل ۱۴ نمودار بار-جابجایی در وسط دهانه تیر برای شش نمونه با سنگدانه طبیعی (شکل ۱۴-الف) و شش نمونه با سنگدانه بازیافتی (شکل ۱۴-ب) ارائه شده است. در شکل ۱۴ و در کنار منحنی بار-جابجایی، مقدار افزایش مقاومت و تغییر شکل تیرها نسبت به تیر مرجع نشان داده شده است. در شکل (۱۵-الف) و (۱۵-ب) ملاحظه می‌گردد هم در تیرهای ساخته شده با سنگدانه طبیعی و هم سنگدانه بازیافتی، مقدار افزایش مقاومت و ظرفیت باربری تیرهای HFRC-1 و HFRR-1 بیشترین مقدار را دارا بوده و در رده‌های بعدی به ترتیب تیر HFRR-2، SFRRC، KFRC، SFRRC، KFRC و PPFRC قرار دارند و مقدار افزایش شکل‌پذیری برای گروه بازیافتی، تیرهای الیاف هیبریدی حدود ۲ برابر و تیر حاوی الیاف فولاد حدود ۱/۸ و تیر حاوی الیاف کورتا حدود ۱/۴ برابر نسبت به تیر RRC به دست آمد. در هر دو گروه تیرهای با سنگدانه طبیعی و بازیافتی، تیر الیافی پلی‌پروپیلن نسبت به تیر مرجع افزایش جزیی داشت.

همانطور که در شکل ۱۵ مشاهده می‌گردد، در تمامی نمودارهای مقایسه‌ای مقدار مقاومت و جابجایی بین جفت تیرهای مشابه ساخته شده از سنگدانه‌های طبیعی و سنگدانه‌های بازیافتی از هر دو گروه، تیرهای ساخته شده از سنگدانه‌های طبیعی ظرفیت باربری و مقاومت و همچنین جابجایی بیشتری را نسبت به تیرهای مشابه ساخته شده از سنگدانه‌های بازیافتی، از خود نشان دادند. در شکل (۱۵-الف) ملاحظه می‌گردد، مقدار کاهش

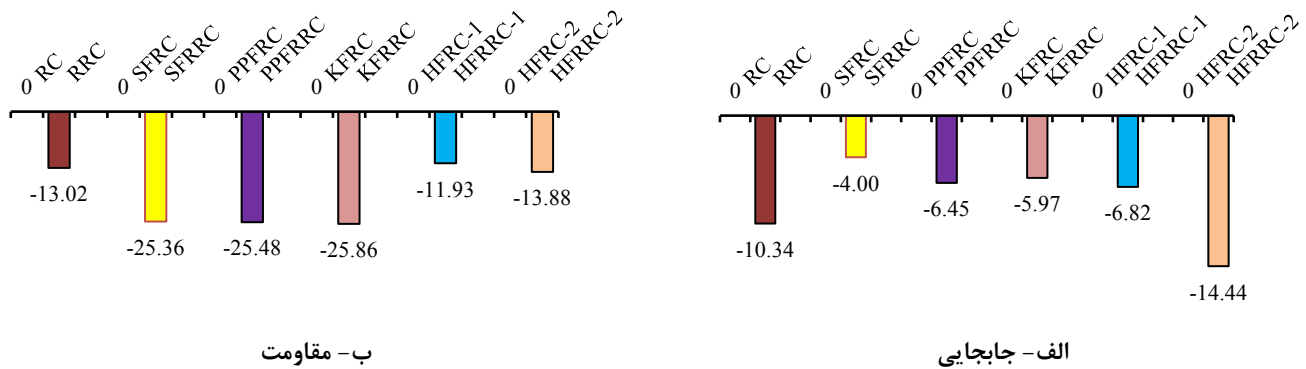
در شکل ۱۴ نمودار بار-جابجایی در وسط دهانه تیر برای شش نمونه با سنگدانه طبیعی (شکل ۱۴-الف) و شش نمونه با سنگدانه بازیافتی (شکل ۱۴-ب) ارائه شده است. در شکل ۱۴ و در کنار منحنی بار-جابجایی، مقدار افزایش مقاومت و تغییر شکل تیرها نسبت به تیر مرجع نشان داده شده است. در شکل (۱۵-الف) و (۱۵-ب) ملاحظه می‌گردد هم در تیرهای ساخته شده با سنگدانه طبیعی و هم سنگدانه بازیافتی، مقدار افزایش مقاومت و ظرفیت باربری تیرهای HFRC-1 و HFRR-1 بیشترین مقدار را دارا بوده و در رده‌های بعدی به ترتیب تیرهای HFRR-2، SFRRC، KFRC، SFRRC، KFRC و PPFRC قرار دارند و مقدار افزایش مقاومت آن‌ها نسبت به تیر RC در تیرهای با سنگدانه طبیعی، به ترتیب ۸۵، ۶۶، ۵۲، ۳۸ و ۳۳ درصد و در تیرهای با سنگدانه بازیافتی نسبت به تیر RRC به ترتیب ۸۸، ۶۴، ۳۱، ۱۷ و ۱۴ درصد می‌باشد. در هر دو گروه طبیعی و بازیافتی تیر حاوی الیاف پلی‌پروپیلن کمترین مقدار را از این حیث نشان داد.

از نظر شکل‌پذیری، همان طوری که در شکل (۱۵-الف) و (۱۵-ب) ملاحظه می‌گردد در تیرهای ساخته شده با سنگدانه طبیعی، تیر HFRC-2 بیشترین مقدار و در رده‌های بعدی به ترتیب تیر HFRC-1، SFRC،



شکل ۱۴. مقایسه نمودار بار - جابجایی وسط دهانه، در تیرهای بتن مسلح با الیاف مجزا و هیبریدی:
الف- سنگدانه طبیعی و ب- سنگدانه بازیافتی

Fig. 14. Comparison of load diagram - displacement in the middle of the span, in reinforced concrete beams with separate and hybrid fibers: a- Natural aggregate and b- Recycled aggregate



شکل ۱۵. مقدار کاهش مقاومت و جابجایی تیرهای بازیافتی در جفت تیرهای مشابه طبیعی با الیاف مجزا و هیبریدی

Fig. 15. The amount of resistance reduction and displacement of recycled beams in the same pair of beams compared to natural beams with separate and hybrid fibers

۷-۴- انرژی جذب شده

برای بررسی عملکرد مطلوب خمشی تیر در مقابل بار بعد از ترک خوردگی، پارامترهای مختلفی از جمله چقرمگی، شکل پذیری و جذب انرژی مورد بررسی قرار می‌گیرد. برای چقرمگی در آیین‌های مختلف، روابط و قوانین مختلفی وجود دارد و در محاسبه شکل پذیری هم که تقریباً در همه آیین‌نامه‌ها روابط یکسانی ارائه شده است. در خصوص جذب انرژی هم معمولاً سطح زیر منحنی بار - جابجایی به عنوان جذب انرژی معرفی می‌گردد. دلیل استفاده از این پارامترها از جمله جذب انرژی به این دلیل است که رفتار پلاستیک آن‌ها را مورد بررسی قرار دهند و هر چقدر منحنی بار - جابجایی با شیب ملایم‌تری از نقطه حداکثر مقاومت به سمت نقطه شکست حرکت کند طبیعتاً رفتار مطلوب‌تری خواهد داشت و جذب انرژی بیشتری را نتیجه خواهد داد. به عبارتی دلیل استفاده از این پارامتر بررسی رفتار خمشی تیر در ناحیه پلاستیک و در محدوده حداکثر مقاومت تا نقطه شکست تیر می‌باشد. نحوه محاسبه این پارامتر هم همان طوری که بیان شد عبارت است از سطح کل زیر منحنی بار - جابجایی.

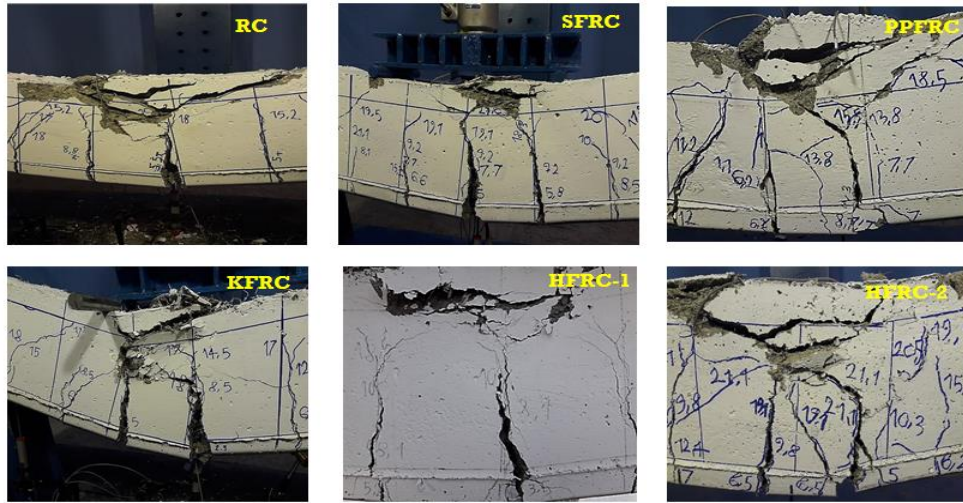
در شکل ۱۸ مقدار جذب انرژی تیرهای ساخته شده با سنگدانه‌های طبیعی و بازیافتی نشان داده شده است. همان‌گونه که در شکل ۱۸ مشاهده می‌گردد، هم در گروه تیرهای با سنگدانه طبیعی و هم در گروه تیرهای با سنگدانه بازیافتی، HFRC-1 و HFRRRC-1 بیشترین و تیرهای PPFRC و PPFRRC کمترین ظرفیت جذب انرژی را از خود نشان

مقاومت تیرهای بازیافتی در جفت تیرهای مشابه طبیعی و بازیافتی ارائه شده است. مقدار کاهش در مقدار مقاومت تیرهای بازیافتی نشان می‌دهد که نمونه‌های HFRRRC-2، SFRRC، PPFRRC، KFRRRC، HFRC-2، RRC و HFRC-1 به ترتیب مقادیر کاهش برابر با ۲۵/۴۸، ۲۵/۸۶، ۲۵/۹۴، ۱۳/۸۸، ۱۳/۰۲ و ۱۱/۹۳ را نشان دادند.

در شکل ۱۵- ب ملاحظه می‌گردد مقدار کاهش جابجایی تیرهای بازیافتی در جفت تیرهای مشابه طبیعی و بازیافتی ارائه شده است. مقدار کاهش در مقدار مقاومت تیرهای بازیافتی نشان می‌دهد که تیرهای HFRC-2، RRC، RC-2، SFRRC، PPFRRC، HFRRRC-1، KFRRRC و SFRRC به ترتیب مقادیر کاهش برابر با ۱۴/۱۴، ۱۰/۳۴، ۶/۸۲، ۶/۴۵، ۵/۹۷ و ۴/۰۰ درصد را نشان دادند.

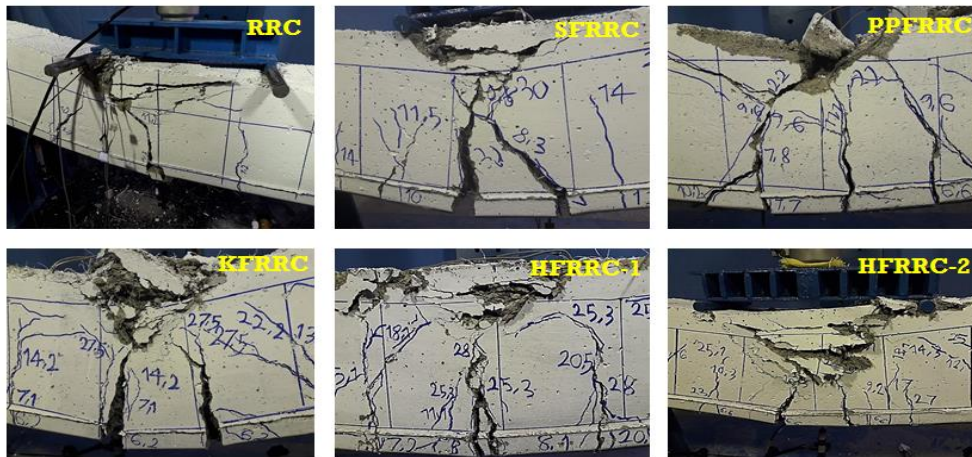
۷-۳- حالت شکست و الگوی ترک

در شکل‌های ۱۶ و ۱۷ حالت شکست و همچنین توزیع ترک‌ها در نمونه‌های حاوی سنگدانه طبیعی و بازیافتی نشان داده شده است همان طوری که در این اشکال مشخص است، شکست همه تیرها به صورت حالت شکست خمشی بوده، به طوری که در ابتدا میلگردهای کششی وارد ناحیه تسلیم و ناحیه پلاستیک شده و در ادامه میلگردهای ناحیه فشاری نیز تسلیم شدند. در تیرهای دارای الیاف نسبت به نمونه مرجع تعداد ترک‌های بیشتر و با عمق کمتری رخ داد.



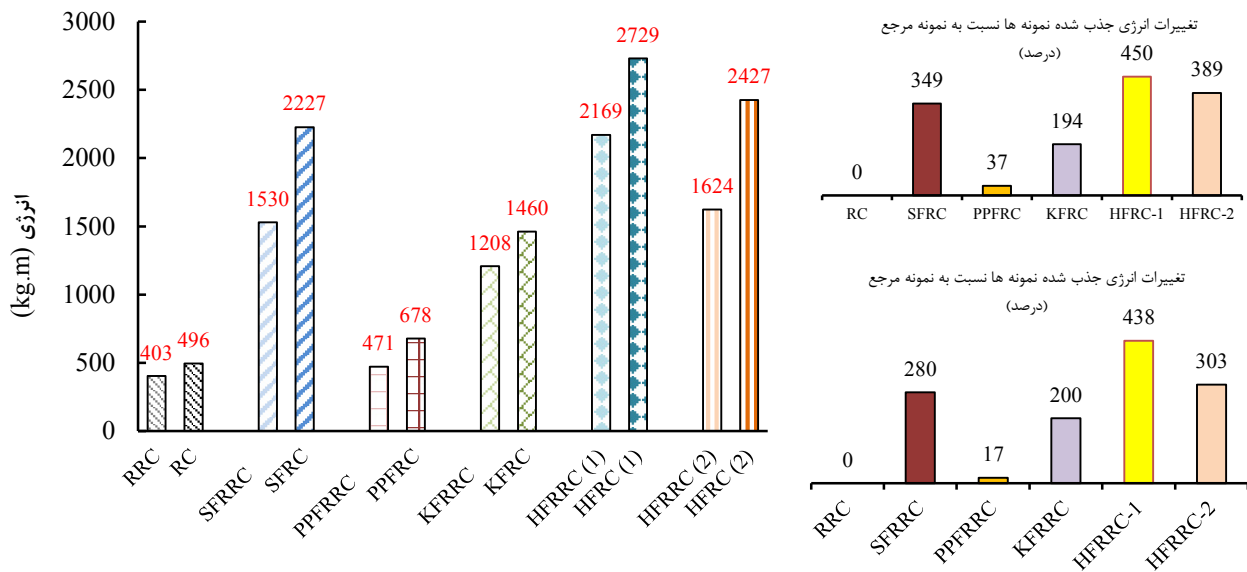
شکل ۱۶. حالت شکست و الگوی ترک تیرهای بتن مسلح حاوی سنگدانه طبیعی با الیاف مجزا و هیبریدی

Fig. 16. Fracture mode and crack pattern of reinforced concrete beams containing natural aggregate with separate and hybrid fibers



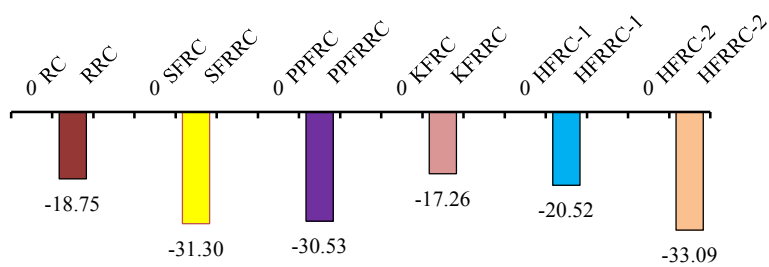
شکل ۱۷. حالت شکست و الگوی ترک تیرهای بتن مسلح حاوی سنگدانه بازیافتی با الیاف مجزا و هیبریدی

Fig. 17. Fracture mode and crack pattern of reinforced concrete beams containing recycled aggregate with separate and hybrid fibers



شکل ۱۸. مقایسه انرژی جذب شده در تیرهای مختلف با سنگدانه طبیعی و بازیافتی

Fig. 18. Comparison of absorbed energy in different beams with natural and recycled aggregates

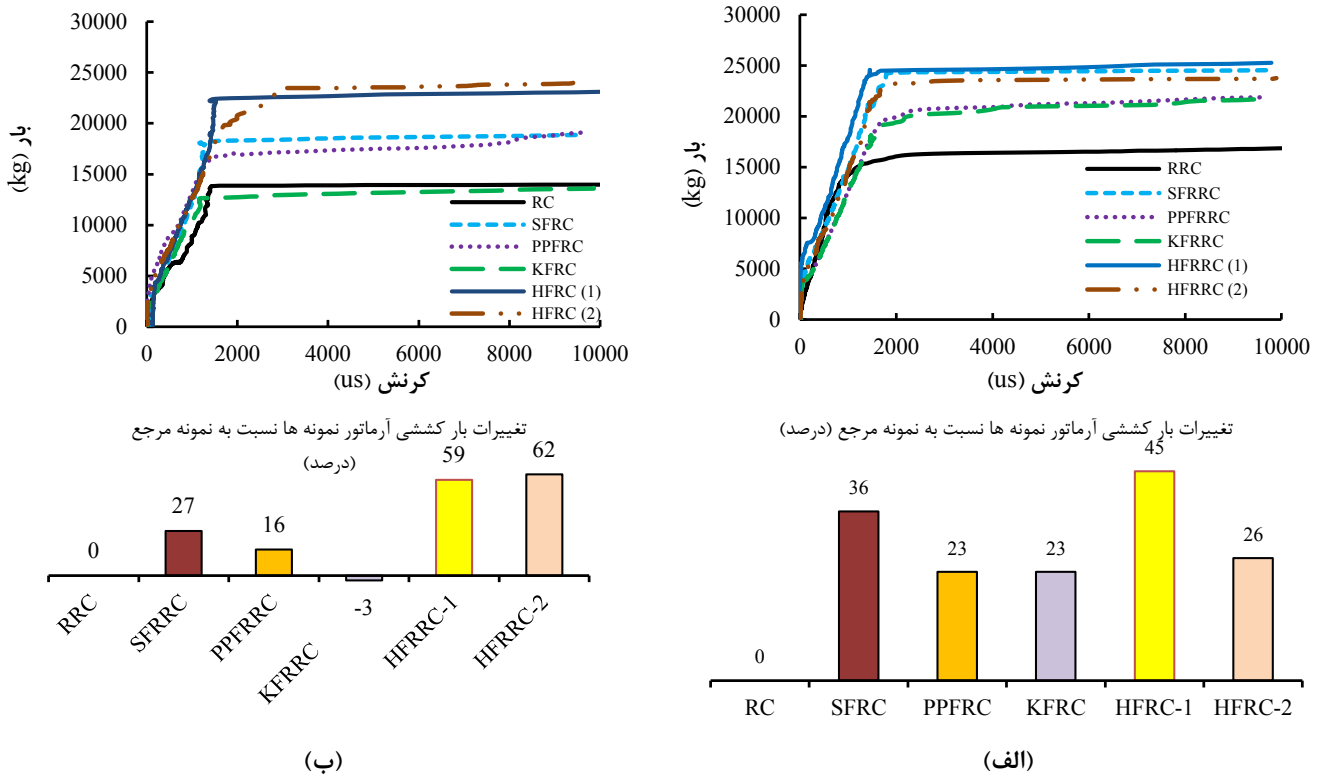


شکل ۱۹. مقدار کاهش مقدار جذب انرژی تیر بازیافتی در جفت تیرهای مشابه نسبت به تیر طبیعی با الیاف مجزا و هیبریدی

Fig. 19. The amount of energy absorption of recycled beams in the same pair of beams compared to natural beams with separate and hybrid fibers

ظرفیت جذب انرژی کمتری را از خود نشان دادند. در شکل ۱۹ مشاهده می‌گردد، در تمامی نمودارهای مقایسه‌ای انرژی جذب شده بین جفت تیرهای مشابه ساخته شده از سنگدانه‌های طبیعی و سنگدانه‌های بازیافتی از هر دو گروه، تیرهای ساخته شده از سنگدانه‌های طبیعی ظرفیت جذب انرژی و شکل‌پذیری بیشتری را نسبت به تیرهای مشابه ساخته شده از سنگدانه‌های بازیافتی، از خود نشان داده‌اند. تیرهای RRC، HFRRRC-1، PPFRRC، SFRRRC، HFRRRC-2

دادند. در رده‌های بعدی به ترتیب تیرهای HFRC-2 و HFRRRC-2، SFRRRC و SFRC، KFRRRC و KFRC، PPFRRC و PPFCRC قرار دارند. در تیرهای با سنگدانه طبیعی، مقدار افزایش جذب انرژی تیرهای حاوی الیاف به ترتیب ۴/۵، ۳/۹، ۳/۵، ۱/۹ و ۰/۳۷ برابر بیشتر از تیر RC و در تیرهای با سنگدانه بازیافتی، مقدار افزایش جذب انرژی تیرهای حاوی الیاف به ترتیب ۴/۴، ۳/۰، ۲/۸، ۲/۰ و ۰/۱۷ برابر بیشتر از تیر RRC به دست آمد. البته تیرهای مرجع بدون الیاف نسبت به همه تیرهای الیافی،



شکل ۲۰. مقایسه نمودار بار - کرنش میلگردهای کششی در تیرهای بتن مسلح با الیاف مجزا و هیبریدی: الف- سنگدانه طبیعی و ب- سنگدانه بازیافتی

Fig. 20. Comparison of load-strain diagrams of tensile rebars in reinforced concrete beams with separate and hybrid fibers: a- Natural aggregate and b- Recycled aggregate

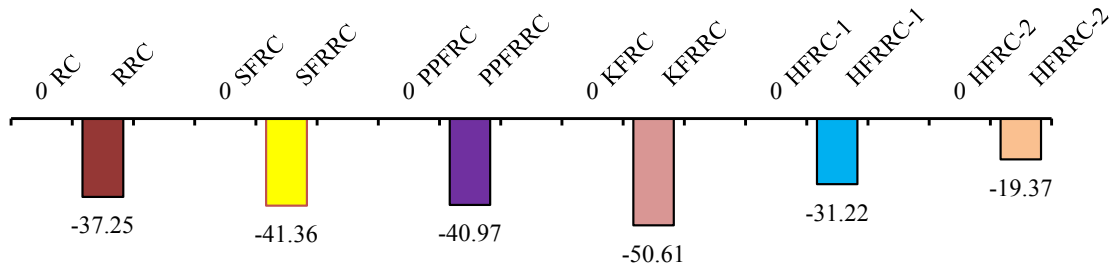
را مهیا کرده، سپس کرنش سنجها بر روی سطح صاف و صیقلی مهیا شده، چسبانده شدند و سپس سیم مخصوص لحیم شده به کرنش سنج را به اهم متر متصل و صحت درستی کار کرنش سنج (حس گر مقاومتی) را بررسی نمودیم. تعداد چهار کرنش سنج در چهار میلگرد طولی و در وسط تیر مورد استفاده قرار گرفت.

در شکل ۲۰ منحنی بار-کرنش میلگردهای کششی در تیرهای ساخته شده با سنگدانه های طبیعی و بازیافتی نشان داده شده است. همان گونه که در شکل ۲۰ مشاهده می گردد، هم تیرهای با سنگدانه طبیعی و هم تیرهای با سنگدانه بازیافتی، میلگردها در تیرهای الیافی در تنش کششی بیشتری نسبت به تیرهای مرجع تسلیم شده و وارد ناحیه پلاستیک شدند. در تیرهای ساخته شده با سنگدانه طبیعی، مقدار افزایش این بار در تیرهای PPFRC و KFRC، HFRC-2، SFRC، HFRC-1

و KFRC به ترتیب مقادیر کاهش برابر با ۳۳/۰۹، ۳۱/۳۰، ۳۰/۵۳، ۲۰/۵۲، ۱۸/۷۵ و ۱۷/۲۶ درصد را نسبت به تیر مشابه با سنگدانه طبیعی را نشان دادند. یعنی تیرهای بازیافتی نسبت به تیرهای طبیعی مشابه، جذب انرژی کمتری داشته و مقدار کاهش جذب انرژی مطابق با درصد های فوق بوده که در شکل ۱۹ ارائه شده است.

۷-۵ مقایسه نمودار بار - کرنش میلگردهای کششی

جهت اندازه گیری تغییر مکان (خیز) دهانه تیرها از تغییر مکان سنج به ظرفیت ۱۰ سانتی متر، استفاده گردید. کرنش سنج های مورد استفاده از نوع YEFLA-5 و به طول ۵ میلی متر بوده که صرفاً برای اندازه گیری کرنش میلگرد کاربرد دارند که ساخت شرکت TML ژاپن هستند. به منظور نصب کرنش سنجها ابتدا با دستگاه فرز انگشتی سطح مورد نیاز برای نصب آنها



شکل ۲۱. مقدار کاهش بار تسلیم کششی میلگردها در تیرهای بازیافتی نسبت به نمونه مشابه طبیعی با الیاف مجزا و هیبریدی

Fig. 21. Reduction of tensile yield load of rebars in recycled beams compared to similar natural sample with separate and hybrid fibers

۸- نتیجه گیری

در این تحقیق برای بررسی رفتار تیرهای بتنی ساخته شده از سنگدانه‌های طبیعی و بازیافتی و با اضافه کردن الیاف مختلف، تعداد ۱۲ نمونه تیر در ابعاد واقعی ساخته شد و مورد آزمایش قرار گرفت. الیاف مورد استفاده در این تحقیق الیاف فولادی، پلی پروپیلن و کورتا بوده که به صورت مجزا و ترکیبی در تیرهای مورد آزمایش، 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. نمودارهای بار - جابجایی، انرژی جذب شده، شکل پذیری، تسلیم آرماتورهای طولی و حالت‌های شکست این تیرها استخراج گردید در ادامه نتایجی که از این تحقیق حاصل شد به صورت زیر ارائه می‌گردد:

۱- افزودن الیاف موجب افزایش مقاومت فشاری در همه نمونه‌ها گردید. در همه نمونه‌های الیافی نسبت به نمونه مرجع در اثر افزودن الیاف، مقاومت فشاری افزایش داشته و بیشترین مقدار افزایش (حداکثر ۳۱ درصد در بتن‌های با سنگدانه طبیعی و حداکثر ۲۲ درصد در بتن‌های با سنگدانه بازیافتی) مربوط به نمونه هیبریدی فولادی و کورتا بوده و کمترین مربوط به نمونه الیاف پلی پروپیلن می‌باشد.

۲- از نقطه نظر بار ترک خمشی اولیه و ظرفیت باربری نهایی نمونه، هم در تیرهای ساخته شده با سنگدانه طبیعی و هم سنگدانه بازیافتی، مقدار افزایش مقاومت و ظرفیت باربری تیر حاوی الیاف هیبریدی فولادی و کورتا

۴۵، ۳۶، ۲۶، ۲۳ و ۲۳ درصد نسبت به تیر مرجع (RC) و در تیرهای ساخته شده با سنگدانه بازیافتی، مقدار افزایش این بار در تیرهای HFRRRC-2، HFRRRC-1، SFRRRC، PPFRRC و KFRRRC به ترتیب ۶۲، ۵۹، ۲۷، ۱۶ و ۳- درصد نسبت به تیر RRC بیشتر بوده است. در گروه بازیافتی میلگردهای تیر حاوی الیاف پلی پروپیلن نسبت به تیر مرجع زودتر تسلیم شده است.

در شکل ۲۱ بین جفت تیرهای مشابه ساخته شده از سنگدانه‌های طبیعی و سنگدانه‌های بازیافتی، نیروی کششی میلگرد آن‌ها با هم مقایسه گردید. تیرهای ساخته شده از سنگدانه‌های طبیعی، در تنش کششی میلگرد بیشتری نسبت به تیرهای مشابه ساخته شده از سنگدانه‌های بازیافتی تسلیم شده و وارد ناحیه پلاستیک شدند. همان طوری که در شکل ۲۱ ملاحظه می‌گردد مقدار کاهش نیروی کششی میلگرد در تیرهای بازیافتی نسبت به تیرهای طبیعی مشابه ارائه شده است. مقدار کاهش نیروی کششی میلگرد در تسلیم در نمونه‌های بازیافتی نشان می‌دهد که تیرهای SFRRRC، KFRRRC، HFRRRC-1، RRC، PPFRRC و HFRRRC-2 به ترتیب مقادیر کاهش برابر با ۵۰/۶۱، ۴۱/۳۶، ۴۰/۹۷، ۳۷/۲۵، ۳۱/۲۲ و ۱۹/۳۷ درصد را نشان دادند. به عبارتی تیرهای بازیافتی در بار کمتری نسبت به تیرهای طبیعی، میلگردهای کششی آن‌ها تسلیم شده و وارد ناحیه پلاستیک شدند. مقدار کاهش این مقدار در تیرهای بازیافتی نسبت به تیر طبیعی مشابه به صورت درصدی فوق به دست آمد.

کورتا به ترتیب ۶۲، ۵۹، ۲۷، ۱۶ و ۳- درصد نسبت به تیر مرجع بیشتر بوده است. در گروه بازیافتی میلگردهای تیر حاوی الیاف پلی‌پروپیلن نسبت به تیر مرجع زودتر تسلیم شد.

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

۸- نمونه‌های حاوی الیاف هیبریدی نسبت به الیاف مجزا تاثیر بیشتری در بهبود رفتار خمشی تیرهای ساخته شده با سنگدانه‌های طبیعی و بازیافتی نشان داد و البته الیاف فولادی مجزا با فاصله کمی نسبت به الیاف هیبریدی نیز در این مورد موثر نشان داده و سایر الیاف مجزا تاثیر کمتری در بهبود رفتار خمشی داشتند.

منابع

- [1] Altun F., Haktanir T., Ari K., Effects of steel fiber addition on mechanical properties of concrete and RC beams, *Construction Building and Materials* 21 (1) (2007) 654–661.
- [2] Gao J., Sun W. and Morino K., Mechanical Properties of Steel Fiber-Reinforced, High Strength, Lightweight Concrete, *Cement and Concrete Composite*, 19 (1997) 307–313.
- [3] Marar K., Eren Ö. and Yitmen I., Compression Specific Toughness of Normal Strength Steel Fiber Reinforced Concrete (NSSFRC) and High Strength Steel Fiber Reinforced Concrete (HSSFRC), *Materials Research*, 14 (2011) 239-247.
- [4] Song S., Wu C. and Hwang S., Mechanical Properties of High Strength Steel Fiber Reinforced Concrete, *Construction and Building Materials*, 18 (2004) 669-673.
- [5] Eren Ö. and Çelik T., Effect of Silica Fume and Steel Fibers on Some Properties of High-Strength Concrete, *Construction and Building Materials*, 11 (1997) 373-382.
- [6] Yazici S., Inan G. and Tabak V., Effect of Aspect Ratio and Volume Fraction of Steel Fiber on the Mechanical Properties of SFRC, *Construction and Building Materials*, 21 (2007) 1250-1253.

بیشترین مقدار را دارا بوده و در رده‌های بعدی به ترتیب تیر الیاف هیبریدی فولادی و پلی‌پروپیلن، الیاف مجزای فولادی، الیافی مجزای کورتا و الیاف مجزای پلی‌پروپیلن قرار دارند و مقدار افزایش مقاومت آن‌ها نسبت به تیر مرجع در تیرهای با سنگدانه طبیعی، به ترتیب ۸۵، ۶۶، ۵۲، ۳۸ و ۳۳ درصد و در تیرهای با سنگدانه بازیافتی نسبت به تیر مرجع به ترتیب ۸۸، ۶۴، ۳۱، ۱۷ و ۱۴ درصد می‌باشد. در هر دو گروه طبیعی و بازیافتی تیر حاوی الیاف مجزای پلی‌پروپیلن کمترین مقدار را نشان داد.

۳- از نظر شکل‌پذیری، در تیرهای ساخته شده با سنگدانه طبیعی، تیر حاوی الیاف هیبریدی فولاد و پلی‌پروپیلن بیشترین مقدار و در رده‌های بعدی به ترتیب تیر الیاف هیبریدی فولاد و کورتا، الیاف مجزای فولادی، الیاف مجزای کورتا و در نهایت الیاف مجزای پلی‌پروپیلن قرار دارند. در نمونه‌های حاوی سنگدانه بازیافتی، مقدار شکل‌پذیری تیر حاوی الیاف هیبریدی فولاد و کورتا بیشترین مقدار را دارا بوده و در رده‌های بعدی به ترتیب تیر الیاف فولاد و پلی‌پروپیلن، الیاف مجزای فولادی، الیاف مجزای کورتا و الیاف مجزای پلی‌پروپیلن قرار دارند.

۴- حالت شکست در نمونه‌های حاوی سنگدانه طبیعی و بازیافتی به صورت حالت شکست خمشی بوده به طوری که در ابتدا میلگردهای کششی وارد ناحیه تسلیم و ناحیه پلاستیک شده و در ادامه میلگردهای ناحیه فشاری نیز تسلیم شدند. در نمونه‌های دارای الیاف نسبت به نمونه مرجع تعداد ترک‌های بیشتر و با عمق کمتری رخ داد.

۵- مقدار جذب انرژی تیرها هم در گروه تیرهای با سنگدانه طبیعی و هم در گروه تیرهای با سنگدانه بازیافتی، بیشترین مقدار مربوط به تیرهای حاوی الیاف هیبریدی فولادی و کورتا بوده و کمترین مقدار مربوط به تیر حاوی الیاف مجزای پلی‌پروپیلن به دست آمد.

۶- از نقطه نظر جاری شدن میلگردهای کششی، مشخص شد که تیرهای با ظرفیت باربری بالاتر دیرتر جاری می‌گردند به طوری که هم تیرهای با سنگدانه طبیعی و هم در تیرهای با سنگدانه بازیافتی، میلگردها در تیرهای الیافی در بار بیشتری نسبت به تیرهای مرجع تسلیم شده و وارد ناحیه پلاستیک شدند. در تیرهای ساخته شده با سنگدانه طبیعی، مقدار افزایش این بار در تیرهای الیاف هیبریدی فولاد و کورتا، الیاف مجزای فولادی، الیاف هیبریدی فولاد و پلی‌پروپیلن، الیاف مجزای کورتا و پلی‌پروپیلن به ترتیب ۴۵، ۳۶، ۲۶، ۲۳ و ۲۳ درصد و در تیرهای ساخته شده با سنگدانه بازیافتی، مقدار افزایش این بار در تیرهای الیاف هیبریدی فولاد و پلی‌پروپیلن، الیاف هیبریدی فولاد و کورتا، الیاف مجزای فولادی، الیاف مجزای پلی‌پروپیلن و

- Mohd Zamin Jumaat, Ductility behaviours of oil palm shell steel fibre-reinforced concrete beams under flexural loading, *European Journal Environment Civil Engineering*, <http://dx.doi.org/10.1080/19648189.2017.1320234>, (2017), (In Press).
- [18] Narayanan R., Darwish I.Y.S., Use of steel fibers as shear reinforcement, *ACI Struct. J.*, 84(3) (1987) 1125–1132.
- [19] Qian C., Parnaikuni I., Properties of high-strength steel fiber-reinforced concrete beams in bending, *Cement Concrete Composite*, 21(1) (1999) 73–81.
- [20] Jodeiri A. and Quitlig R., Effect of Steel Fibre on Flexural Capacity of Reinforced Concrete Beam, *Journal of Civil Engineering Research*, 2 (2012) 100-107.
- [21] Fatih A., Tefaruk H. and Kamura A., Effects of Steel Fiber Addition on Mechanical Properties of Concrete and RC Beams, *Construction and Building Materials*, 21 (2005) 654–661.
- [22] Marar K., Eren Ö. and Celik T., Relationship between Impact Energy and Compression Toughness Energy of High-Strength Fiber-Reinforced Concrete, *Materials Letters*, 47 (2001) 297-304.
- [23] Arivalagan S., Earthquake-Resistant Performance of Polypropylene Fiber Reinforced Concrete Beams, *Journal of Engineering and Technology*, 2 (01) (2012) 63-67.
- [24] Nahhas M.T., Flexural behavior and ductility of reinforced lightweight concrete beams with polypropylene fiber, *J. Constr. Eng. Manag.*, 1(1) (2013) 4–10.
- [25] Jeffery R. Roesler, Salah A. Altoubat, David A. Lange, Klaus-Alexander Rieder, R. Gregory, Effect of synthetic fibers on structural behavior of concrete slabs-on ground, *Mater. J.*, 103(1) (2006) 3–10.
- [26] Zhihong Z.D.F., Feldman Dorel, Synthetic fiber-reinforced concrete, *Progr. Polym. Sci.*, 20 (1995) 185–210.
- [27] Won J.P., Lim D.H., Park C.G., Bond behaviour and flexural performance of structural synthetic fibre-reinforced concrete, *Mag. Concr. Res.*, 58(6) (2006) 401–410.
- [7] Tanoli W., Naseer A. and Wahab F., Effect of Steel Fibers on Compressive and Tensile Strength of Concrete, *International Journal of Advanced Structures and Geotechnical Engineering*, 3 (2014).
- [8] Ahmed Tareq Noamana, Abu Bakar B.H. and Hazizan Md. Akil., Effect of curmb rubber aggregate on toughness and impact energy of steel fiber concrete, PhD of engineering, *Civil Engineering*, Universiti Sains Malaysia, (2016).
- [9] Swamy R.N., Al-Taan S.A., Deformation and ultimate strength in flexure of reinforced concrete beams made with steel fiber concrete, *ACI J. Proc.* 78 (5) (1981) 395–405.
- [10] Yoo, D.Y.; Banthia, N.; Yang, J.M.; Yoon, Y.S., Size effect in normal- and high-strength amorphous metallic and steel fiber reinforced concrete beams. *Construction Building and Materials*, 121 (2016) 676–685.
- [11] Caggiano, A. Cremona, M. Faella, C. Lima, C. Martinelli, E., Fracture behavior of concrete beams reinforced with mixed long/short steel fibers. *Construction and Building Materials*, 37 (2012) 832–840.
- [12] Hosseini, A. Mostofinejad, D. Hajjalilue-bonab, M., Displacement and strain field measurement in steel and RC beams using particle image velocimetry, *Engineering Mechanics*, 4 (2012) 1–10.
- [13] ACI Committee 544, Report on Fiber Reinforced Concrete (ACI 544.1R-96- Reapproved 2009), American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, (1996) 66.
- [14] Abdui-Ahad R.B., Aziz O. Q., Flexural strength of reinforced concrete T-beams with steel fibers, *Cement Concrete Composite*, 21(1) (1999) 263–268.
- [15] Altun F., Haktanir T., Ari K., Effects of steel fiber addition on mechanical properties of concrete and RC beams, *Construction and Building Materials*, 21 (1) (2007) 654–661.
- [16] Fatih Altun, Bekir Aktaş, Investigation of reinforced concrete beams behavior of steel fiber added lightweight concrete, *Construction and Building Materials*, 38(1) (2013) 575–581.
- [17] Soon Poh Yap, Johnson Alengaram U., Kim Hung Mo,

- [39] EN 12390-3, Testing Hardened Concrete—Part3: Compressive Strength of Test Specimens, (2009).
- [40] Meda A., Minelli F., Plizzari G.A., Flexural behavior of RC beams in fiber reinforced concrete, *Composite B Engineering*, 43 (2012) 2930–2937.
- [41] Soutsos M.N., Le T.T., Lampropoulos A.P., Flexural performance of fiber reinforced concrete made with steel and synthetic fibers, *Construction and Building Materials*, 36 (2012) 704–710.
- [42] Jun-Mo Yang, Kyung-Hwan Min, Hyun-Oh Shin, Young-Soo Yoon, Effect of steel and synthetic fibers on flexural behavior of high-strength concrete beams reinforced with FRP bars, *Composite: Part B*, 43 (2012) 1077–1086.
- [43] S. Arora, S.P. Singh, Analysis of flexural fatigue failure of concrete made with 100% coarse recycled concrete aggregates, *Constr. Build. Mater.*, 102 (2016) 782–791.
- [44] W.C. Choi, H.D. Yun, Long-term deflection and flexural behavior of reinforced concrete beams with recycled aggregate, *Mater. Des.*, 51 (2013) 742–750.
- [45] A.M. Azad, Flexural behavior and analysis of reinforced concrete beams made of recycled PET waste concrete, *Constr. Build. Mater.*, 155 (2017) 593–604.
- [46] D. Gao, L. Zhang, Flexural performance and evaluation method of steel fiber reinforced recycled coarse aggregate concrete, *Constr. Build. Mater.*, 159 (2018) 126–136.
- [47] Y. Guo, J. Zhang, G. Chen, Z. Xie, Compressive behaviour of concrete structures incorporating recycled concrete aggregates, rubber crumb and reinforced with steel fibre, subjected to elevated temperatures, *J. Clean. Prod.*, 72 (2014) 193–203.
- [48] J.A. Carneiro, P.R.L. Lima, M.B. Leite, R.D. Filho, Compressive stress-strain behavior of steel fiber reinforced-recycled aggregate concrete, *Cem. Concr. Compos.*, 46 (2014) 65–72.
- [49] A. Meda, F. Minelli, G.A. Plizzari, Flexural behavior of RC beams in fiber reinforced concrete, *Compos. B Eng.*, 43 (2012) 2930–2937.
- [50] M.N. Soutsos, T.T. Le, A.P. Lampropoulos, Flexural
- [28] Trottier J.F., Mahoney M., Forgeron D., Can synthetic fibers replace welded-wire fabric in slabs on ground, *Concr. Int.*, (2002) 59–68.
- [29] Mahoney M., Structural synthetic fibres for precast and slab-on-grade construction, *Construction Canada*, 3 (2005).
- [30] Jiabiao J., Steven Loh, Toh Gasho, Synthetic structure fibers for toughness and crack control of concrete, Singapore, 29th Conference on Our World in Concrete & Structures, 8 (2004) 25–26.
- [31] di Prisco, Plizzari M., Vandewalle G., L., Fiber reinforced concrete: new design perspectives, *Materials and Structures*, 42(9) (2009) 1261–81.
- [32] Afroughsabet, V., High-performance fiber-reinforced concrete: a review, *materials science*, 51 (2016) 6517–6551.
- [33] Byung, H. Ji, C. Young, C., Fracture behavior of concrete members reinforced with structural synthetic fibers, *Engineering Fracture Mechanics*, 74 (2007) 243–257.
- [34] Bencardino, F. Rizzuti, L. Spadea, G. Swamy, R., Experimental evaluation of fiber reinforced concrete fracture properties. *Composites Part B: Engineering*, 41 (2010) 17–24.
- [35] Caggiano, A. Cremona, M. Faella, C. Lima, C. Martinelli, E., Fracture behavior of concrete beams reinforced with mixed long/short steel fibers. *Construction and Building Materials*, 37 (2012) 832–840.
- [36] Alberti, M. Enfedaque, A. Gálvez, J., Fracture mechanics of polyolefin fibre reinforced concrete: Study of the influence of the concrete properties, casting procedures, the fiber length and specimen size, *Engineering Fracture Mechanics*, 154 (2016) 225–244.
- [37] Hosseini, A. Mostofinejad, D. Hajjalilue-bonab, M., Displacement and strain field measurement in steel and RC beams using particle image velocimetry, *Engineering Mechanics*, 4 (2012) 1–10.
- [38] UNI 11039-2, Steel Fiber Reinforced Concrete - Part2: Test Method for Determination of First Crack Strength and Ductility Indexes, (2003).

- [60] Narayanan R., Darwish I.Y.S., (1987), Use of steel fibers as shear reinforcement, *ACI Struct. J.*, 84 (3), 1125–1132.
- [61] Qian C., Parnaikuni I., Properties of high-strength steel fiber-reinforced concrete beams in bending, *Cement Concrete Composite*, 21 (1) (1999) 73–81.
- [62] ASTM C33/C33M-16e1, Standard Specification for Concrete Aggregates, ASTM International, West Conshohocken, PA., (2016).
- [63] ASTM C136/C136M-14, Standard Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates, ASTM International, West Conshohocken, PA., (2014).
- [64] ASTM C125-16, Standard Terminology Relating to Concrete and Concrete Aggregates, ASTM International, West Conshohocken, PA., (2016).
- [65] ASTM D5821-13, Standard Test Method for Determining the Percentage of Fractured Particles in Coarse Aggregate, ASTM International, West Conshohocken, PA., (2017).
- [66] ACI 211, Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 211.1-91), Reapproved 2002, ACI Committee 555, American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, (2002).
- [67] ASTM D2419-14, Standard Test Method for Sand Equivalent Value of Soils and Fine Aggregate, ASTM International, West Conshohocken, PA., (2014).
- [68] Hosseini, P., Khaloo, AR, Khodavirdi Zanjani, M.M., Investigation of self-compacting concrete construction using recycled aggregates, *Quarterly Journal of Concrete Research*, University of Guilan, 3(1) (2010) 9-20, (In Persian).
- [69] ASTM D8038-16, Standard Practice for Reclamation of Recycled Aggregate Base (RAB) Material, ASTM International, West Conshohocken, PA., (2016).
- [70] ACI 555, Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary (ACI 555R-01), ACI Committee 555, American Concrete Institute, Farmington Hills, MI., (2001).
- [71] ACI 318, Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-14) and Commentary (ACI 318R- performance of fiber reinforced concrete made with steel and synthetic fibers, *Constr. Build. Mater.*, 36 (2012) 704–710.
- [51] S. Seara-Paz, B. González-Fonteboa, F. Martínez-Abella, J. Eiras-López, Flexural performance of reinforced concrete beams made with recycled concrete coarse aggregate, *Eng. Struct.*, 156 (2018) 32–45.
- [52] N. Tošić0 , S. Marinkovic, I. Ignjatovic, A database on flexural and shear strength of reinforced recycled aggregate concrete beams and comparison to Eurocode 2 predictions, *Constr. Build. Mater.*, 127 (2016) 932–944.
- [53] T.M. Tarek, H.K. Das, A.H. Mahmood, M.N. Rahman, M.A. Awal, Flexural performance of RC beams made with recycled brick aggregate, *Constr. Build. Mater.*, 134 (2017) 67–74.
- [54] Y. Zaetanga, V. Sata, A. Wongsu, P. Chindaprasit, Properties of pervious concrete containing recycled concrete block aggregate and recycled concrete aggregate, *Constr. Build. Mater.*, 111 (2016) 15–21.
- [55] W.J. Weiss, S.P. Shah, Recent trends to reduce shrinkage cracking in concrete pavements, in: *Proceedings of the Airfield Pavement Conference, Aircraft/Pavement Technology: In the Midst of Change*, (1997) 217–228.
- [56] N. Banthia, R. Gupta, S. Mindess, Developing crack resistant SFRC overlay materials for repair applications, *NSF Conference*, Bergamo, Italy, (2004).
- [57] N. Banthia, J. Sheng, Fracture toughness of micro-fiber reinforced cement composites, *Cem. Concr. Compos.*, 18 (1996) 251–269.
- [58] V. Bindiganavile, N. Banthia, Polymer and steel fiber reinforced cementitious composites under impact loading, Part 1: bond-Slip Response, *Am. Concr. Inst. Mater. J.*, 98 (1) (2001) 10–16.
- [59] Soon Poh Yap, Johnson Alengaram U., Kim Hung Mo, Mohd Zamin Jumaat, Ductility behaviours of oil palm shell steel fibre-reinforced concrete beams under flexural loading, *European Journal Environment Civil Engineering*, <http://dx.doi.org/10.1080/19648189.2017.1320234>, (2017), (In Press).

