

Investigating the effect of different types of fibers in improving the flexural performance of recycled concrete beams in the elastic and plastic zones

A. Eskandari¹, F. Omidinasab^{2*}, A. Sahraei Moghadam³, A. Dalvand²

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

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

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

4- Assistant Professor, Faculty of Engineering, Lorestan University, Khorramabad, Iran.

ABSTRACT

This paper presents the results of an experimental investigation on the flexural performance of concrete beams containing recycled aggregates concrete (RCA) and reinforced with a variety of fibers. In this research, 5 concrete beams with a length of 150, width 20 and height 30 cm were made. One beam containing natural aggregate (NA) and fiber-free as control specimen, one beam containing RCA and fiber-free and the other three beams containing RCA and reinforced with 0.5% of each of the steel, polypropylene and korrrta fibers. The performance of the beams were investigated under four-point bending test in two elastic and plastic zones. The parameters of limit of proportionality, modulus of resilience, flexural modulus of elasticity and yield moment in the elastic zone and the parameters of the ultimate moment, ductility, energy absorption and flexural toughness in the plastic zone were investigated. Beams containing NA and RCA had a slight difference (less than 10%) in all the mentioned parameters. On the other hand, the fibers used improved the flexural performance of the recycled beams in both elastic and plastic zones, which the effect of steel fiber was more significant than polypropylene and korrrta fibers. Finally, the experimental results obtained in this study were compared with the results of Iranian Concrete Code (ABA), ACI 318, EuroCode 2 and CSA. The results of this comparison indicated that the lowest difference with the experimental results is related to ACI 318 and the highest difference is related to EuroCode 2.

ARTICLE INFO

Receive Date: 10 April 2021

Revise Date: 03 July 2021

Accept Date: 03 August 2021

Keywords:

Recycled concrete
RCA
Flexural performance
Steel fiber
Polypropylene fiber
Korrrta fiber

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: <https://dx.doi.org/10.22065/jsce.2021.280477.2411>

*Corresponding author: Fereydoon Omidinasab
Email address: omidinasab.f@lu.ac.ir

بررسی تاثیر انواع الیاف در بهبود رفتار خمشی تیرهای بتنی بازیافتی در نواحی

الاستیک و پلاستیک

عباس اسکندری^۱، فریدون امیدی نسب^{۲*}، امیرحسین صحرائی مقدم^۳، احمد دالوند^۴

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

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

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

۴- استادیار گروه مهندسی عمران، دانشگاه لرستان، خرم آباد، ایران

چکیده

این مقاله به ارائه نتایج یک تحقیق آزمایشگاهی در مورد رفتار خمشی تیرهای بتنی حاوی سنگدانه‌های بازیافتی و مسلح شده به انواع الیاف‌ها می‌پردازد. در این تحقیق ۵ عدد تیر بتنی با طول ۱۵۰، عرض ۲۰ و ارتفاع ۳۰ سانتی متر ساخته شد. یک تیر حاوی سنگدانه‌های طبیعی و فاقد الیاف بعنوان نمونه شاهد، یک تیر حاوی سنگدانه‌های بازیافتی و فاقد الیاف و سه تیر دیگر حاوی سنگدانه‌های بازیافتی و مسلح شده به ۰/۵ درصد از هر کدام از الیاف‌های فولادی، پلی پروپیلن و کورتا بودند. رفتار تیرها تحت آزمایش خمش ۴ نقطه‌ای در دو ناحیه الاستیک و پلاستیک بررسی شد. پارامترهای حد تناسب، مدول برجهنگی، مدول الاستیسیته خمشی و لنگر تسلیم در ناحیه الاستیک و پارامترهای لنگر نهایی، شکل پذیری، جذب انرژی و ضریب طاقت خمشی در ناحیه پلاستیک بررسی شدند. تیرهای معمولی و بازیافتی در تمام پارامترهای مذکور دارای اختلاف اندک (کمتر از ۱۰ درصد) بودند. از طرفی، الیاف‌های مورد استفاده موجب تقویت رفتار خمشی تیرها در هر دو ناحیه الاستیک و پلاستیک شدند که تاثیر الیاف فولادی نسبت به الیاف‌های پلی پروپیلن و کورتا قابل توجه‌تر بود. در نهایت، نتایج تجربی بدست آمده در این تحقیق با آیین نامه‌های بتن ایران، *EuroCode 2* و *ACI 318* مقایسه شد. نتایج این مقایسه نشان داد که بیشترین تطابق با نتایج تجربی مربوط به آیین نامه *ACI 318* و بیشترین اختلاف مربوط به آیین نامه *EuroCode 2* می‌باشد.

کلمات کلیدی: بتن بازیافتی، *RCA*، رفتار خمشی، الیاف فولادی، الیاف پلی پروپیلن، الیاف کورتا.

شناسه دیجیتال:		سابقه مقاله:				
doi:	https://dx.doi.org/10.22065/jsce.2021.280477.2411	چاپ	انتشار آنلاین	پذیرش	بازنگری	دریافت
	10.22065/jsce.2021.280477.2411	۱۴۰۰/۱۲/۲۹	۱۴۰۰/۰۵/۱۲	۱۴۰۰/۰۵/۱۲	۱۴۰۰/۰۴/۱۲	۱۴۰۰/۰۱/۲۱
				*نویسنده مسئول:		
				فریدون امیدی نسب		
				omidinasab.f@lu.ac.ir		پست الکترونیکی:

۱- مقدمه

استفاده از نخاله‌های بتنی به حفظ منابع طبیعی کمک می‌کند. نخاله‌های بتنی می‌توانند بعنوان جایگزین سنگدانه‌ها در تولید بتن استفاده شوند [۱]. تا به حال محققین متعددی رفتار بتن‌های ساخته شده با سنگدانه‌های بازیافتی را بررسی کرده‌اند [۴-۲]. با این حال، استفاده از بتن‌های ساخته شده با سنگدانه‌های بازیافتی در پروژه‌های مهندسی عمران نیازمند بررسی‌های سازه‌ای بیشتر است. بررسی رفتار خمشی بعنوان یکی از جنبه‌های مهم در رفتار سازه‌ای تیرهای بازیافتی مطرح است [۵]. تحقیقاتی در مورد رفتار خمشی تیرهای بازیافتی انجام شده است [۶ و ۷]. با این حال، تحقیقات در این زمینه به اندازه کافی صورت نگرفته است و همچنین تناقض‌هایی در نتایج مشاهده می‌شود که خود دلیلی بر نیاز تحقیقات بیشتر در این زمینه است. برخی محققین خیز بیشتر و لنگر نهایی کمتری از تیرهای بازیافتی را در مقایسه با تیرهای معمولی گزارش کرده‌اند [۸]. این در صورتی است که برخی محققین دیگر تفاوت قابل ملاحظه‌ای در رفتار خمشی تیرهای بتنی بازیافتی و معمولی مشاهده نکردند [۳]. از این رو، یکی از جنبه‌های مهم تحقیق حاضر مقایسه رفتار خمشی تیرهای بتنی ساخته شده با سنگدانه‌های طبیعی و بازیافتی است.

Aroora و همکاران [۹] در تحقیقی عملکرد تیرهای حاوی ۱۰۰ درصد درشت دانه بازیافتی را تحت آزمایش خمش چهار نقطه‌ای بررسی کردند. نتایج این تحقیق نشان داد که استفاده از سنگدانه‌های بازیافتی منجر به تضعیف عملکرد خمشی تیرها در مقایسه با تیرهای معمولی می‌شود. Choi and Yun [۱۰] به مقایسه الگوی ترک و خیز بلند مدت تیرهای بتنی بازیافتی و معمولی پرداختند. در تحقیق مذکور تیرهای بتنی با ۰، ۵۰ و ۱۰۰ درصد سنگدانه بازیافتی ساخته و تحت بارگذاری بلند مدت ۳۶۰ روزه قرار گرفتند. نتایج این تحقیق نشان دهنده‌ی خیز و الگوی ترک مشابه در تیرهای بتنی معمولی و بازیافتی بود. Kishore [۱۱] نیز با انجام آزمایش بر روی تیرهای حاوی درشت دانه و ریز دانه بازیافتی، کاهش ۷ درصدی مقاومت نهایی تیرهای بازیافتی را در مقایسه با تیرهای معمولی گزارش کرد.

از طرفی، یکی از نقاط ضعف بتن عملکرد ترد آن تحت بارهای خمشی می‌باشد [۱۲ و ۱۳]. محققین در ده‌های اخیر برای رفع این مشکل به کاربرد انواع الیاف‌ها در بتن روی آورده‌اند [۱۴ و ۱۵]. تحقیقات متعددی تاثیر مثبت الیاف‌ها در بهبود رفتار بتن را گزارش کرده‌اند [۱۶ و ۱۷]. یکی از موثرترین الیاف‌ها در بهبود رفتار بتن الیاف فولادی می‌باشد [۱۸]. با این حال، نقش مثبت الیاف‌های پلیمری نیز در بسیاری از تحقیقات گزارش شده است [۱۹ و ۲۰]. برخی محققین استفاده از الیاف‌ها را بعنوان یکی از راه‌های جبران افت مقاومت ناشی از سنگدانه‌های بازیافتی گزارش کرده‌اند [۱]. از این رو، بررسی تاثیر انواع الیاف‌ها در بهبود رفتار خمشی تیرهای بازیافتی یکی از اهداف مهم تحقیق حاضر در نظر گرفته شده است.

Sahraei Moghadam و همکاران [۱] با بررسی خصوصیات مکانیکی بتن‌های بازیافتی مسلح شده به الیاف فولادی، نقش قابل توجه این الیاف‌ها را در جبران افت مقاومت بتن‌های بازیافتی گزارش کردند. Gao and Zhang [۲۱] تاثیر استفاده از ۰، ۰/۵، ۱، ۱/۵ و ۲ درصد الیاف فولادی را بر رفتار خمشی تیرهای حاوی ۰، ۳۰، ۵۰ و ۱۰۰ درصد سنگدانه بازیافتی بررسی کردند. نتایج این تحقیق نشان داد که با افزایش درصد الیاف مورد استفاده در تیرهای بازیافتی، مقاومت و طاقت خمشی این تیرها بطور قابل ملاحظه‌ای افزایش می‌یابد. Chaboki و همکاران [۲۲] نیز به بررسی رفتار خمشی تیرهای حاوی ۰، ۵۰ و ۱۰۰ درصد سنگدانه بازیافتی و مسلح شده به ۰، ۱ و ۲ درصد الیاف فولادی پرداختند. نتایج این تحقیق بیانگر آن بود که تیرهای بازیافتی لنگر ترک خوردگی و لنگر نهایی کمتری را در مقایسه با تیرهای معمولی تحمل می‌کنند که این کاهش مقاومت می‌تواند با کاربرد الیاف فولادی جبران شود.

یکی از دغدغه‌های موجود در مورد بتن‌های بازیافتی بررسی امکان کاربرد روابط آیین نامه‌ای در تخمین مقاومت این نوع بتن‌ها می‌باشد. Tošić و همکاران [۲۳] با بررسی ۲۱۷ نمونه آزمایشگاهی به مقایسه مقاومت خمشی بدست آمده از آزمایش‌های تجربی با روابط آیین نامه EuroCode 2 پرداختند. نتیجه این تحقیق نشان داد که آیین نامه EuroCode 2 می‌تواند تخمین مناسبی از مقاومت خمشی تیرهای بازیافتی ارائه دهد. Chaboki و همکاران [۲۲] نیز مقاومت خمشی بدست آمده از آزمایش‌های تجربی را با روابط پیشنهادی آیین نامه‌های مختلف مقایسه نمودند. نتایج این مقایسه نشان داد که آیین نامه ACI 318 دارای کمترین اختلاف با نتایج تجربی می‌باشد. از این رو، در این تحقیق نیز نتایج آزمایش‌های خمشی با آیین نامه‌های معتبر متعددی مقایسه شده است.

هدف محققین در این تحقیق بررسی تاثیر الیاف‌های فولادی، پلی‌پروپیلن و کورتا بر رفتار خمشی تیرهای حاوی سنگدانه‌های بازیافتی در دو ناحیه الاستیک و پلاستیک می‌باشد. برای دستیابی به این هدف ۵ عدد تیر بتنی بزرگ مقیاس با طول ۱۵۰، عرض ۲۰ و ارتفاع ۳۰ سانتی متر ساخته و آزمایش شد. ۵ تیر ساخته شده در این تحقیق شامل یک عدد تیر بتنی معمولی، یک عدد تیر بتنی بازیافتی و ۳ عدد تیر بتنی بازیافتی مسلح شده به ۰/۵ درصد از الیاف‌های فولادی، پلی‌پروپیلن و کورتا بودند.

۲- برنامه آزمایشگاهی

۲-۱- مشخصات مصالح

۲-۱-۱- سیمان

در ساخت نمونه‌های این تحقیق از سیمان پرتلند نوع ۲ بر اساس ASTM C150 [۲۴] استفاده شد. وزن مخصوص و سطح مخصوص این سیمان به ترتیب $3/1 \text{ g/cm}^3$ و $3000 \text{ cm}^2/\text{g}$ می‌باشد.

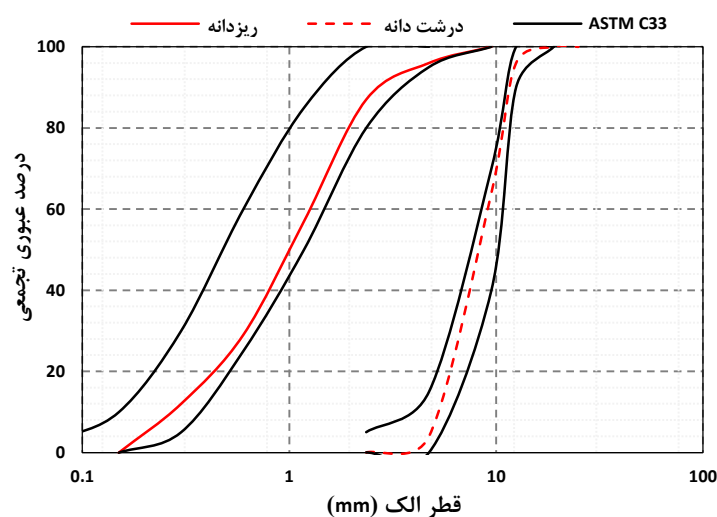
۲-۱-۲- سنگدانه‌ها

ریزدانه‌های مورد استفاده در ساخت نمونه‌های این تحقیق از نوع شکسته کوهی با مدول نرمی $2/39$ و وزن مخصوص kg/m^3 ۲۵۹۷ بودند. علاوه بر این، از دو نوع درشت دانه شامل درشت دانه‌های طبیعی (NA) و درشت دانه‌های بازیافتی (RCA) در ساخت تیرها استفاده شد. RCA از بازیافت نخاله‌های بتنی بدست آمد. تصویری از NA و RCA مورد استفاده در این تحقیق در شکل (۱) نشان داده شده است. از آنجایی که سنگدانه‌ها از اصلی‌ترین قسمت‌های تشکیل دهنده بتن می‌باشند، خصوصیات آن‌ها بصورت کامل مورد بررسی قرار گرفت. وزن مخصوص از اصلی‌ترین خصوصیات سنگدانه‌ها می‌باشد. وزن مخصوص NA و RCA به ترتیب kg/m^3 ۲۴۶۱ و kg/m^3 ۲۴۴۳ بدست آمد. با توجه به این نتایج، اختلاف وزن مخصوص NA و RCA کمتر از ۱ درصد و قابل چشم پوشی می‌باشد. آیین نامه مشخصی جهت تعیین مقدار ملات چسبیده به سطح RCA وجود ندارد. چندین پیشنهاد برای بدست آوردن مقدار ملات چسبیده به سطح RCA وجود دارد که در این تحقیق از روش پیشنهادی Gutierrez و Sanchez [۲۵] استفاده شده است. بر اساس این پیشنهاد نمونه‌ای از RCA به مدت ۲ ساعت در آب غوطه‌ور شد. سپس به مدت ۲ ساعت در کوره با دمای 50°C خشک و سپس سریعاً در آب سرد قرار داده شد. نمونه‌ها بعد از سرد شدن با استفاده از چکش لاستیکی به آرامی مالش داده شدند تا ملات چسبیده به سطح آن‌ها جدا شود. بعد از انجام مراحل فوق، با گذراندن نمونه از الک شماره ۴، درصد وزنی ملات چسبیده به سطح RCA، ۱۲ درصد بدست آمد. علاوه بر این، جذب آب NA و RCA بر اساس ASTM C125 [۲۶] محاسبه شد. میزان جذب آب برای NA و RCA به ترتیب $4/3$ و $7/5$ درصد بدست آمد. افزایش جذب آب RCA نسبت به NA با توجه به ملات چسبیده به سطح این سنگدانه‌ها منطقی است. در این تحقیق همچنین مقاومت سایشی NA و RCA با استفاده از دستگاه لس آنجلس و بر اساس ASTM C131 [۲۷] تعیین و باهم مقایسه شد. میزان سایش برای NA، $22/7$ درصد و برای RCA، $28/5$ درصد بدست آمد. این نتیجه بیانگر آن است که RCA در مقابل سایش مقاومت کمتری را نسبت به NA از خود نشان داده است که با توجه به ساختار متخلخل RCA منطقی است. بعد از انجام آزمایش‌های مربوط به سنگدانه‌ها، NA و RCA مطابق با آیین نامه [۲۸] ASTM C33 با دانه‌بندی یکسانی مطابق با شکل (۲) آماده شدند.



(الف) (ب)

شکل ۱: (الف) NA و (ب) RCA مورد استفاده.



شکل ۲: نمودار دانه بندی سنگدانه‌ها.

۲-۱-۳- الیافها

سه نوع الیاف مختلف شامل الیافهای فولادی، پلی پروپیلن و کورتا در این تحقیق مورد استفاده قرار گرفت. تصویری از این الیافها در شکل (۳) نشان داده شده است. الیاف فولادی از نوع دو سر قلاب با قطر ۰/۸ و طول ۵۰ میلی متر، الیاف پلی پروپیلن با طول ۱۲ میلی متر و الیاف کورتا با طول ۵۴ میلی متر مورد استفاده قرار گرفت. مشخصات تکمیلی این الیافها در جدول (۱) آمده است.

جدول ۱: 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
پلی پروپیلن	۱۲	-	۰/۹۱	۲/۷	۴۰۰
کورتا	۵۴	-	۰/۹۴	۳/۵	۴۷۵



شکل ۳: تصویری از (الف) الیاف‌های کورتا، (ب) فولادی و (ج) پلی‌پروپیلن مورد استفاده.

۲-۱-۴- میلگردهای فولادی

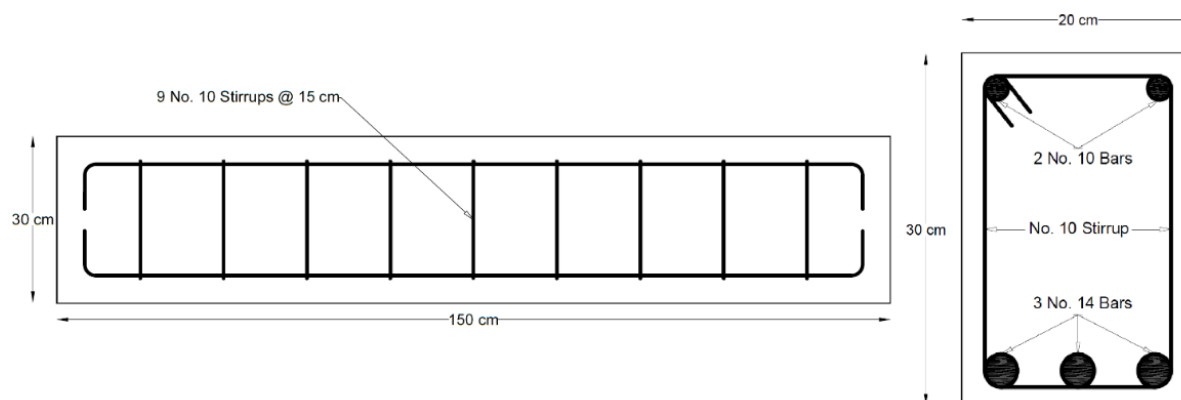
تمامی میلگردهای فولادی مورد استفاده در این تحقیق از نوع AII و با قطرهای ۱۴ و ۱۰ میلی‌متر می‌باشند. جهت تعیین مشخصات مکانیکی میلگردهای مورد استفاده، سه نمونه از هرکدام از میلگردهای با قطر ۱۴ و ۱۰ میلی‌متر مطابق با استاندارد ASTM A615 [۲۹] تحت آزمایش کشش مستقیم قرار گرفت. مشخصات میلگردهای فولادی مورد استفاده در جدول (۲) نشان داده شده است.

جدول ۲: مشخصات میلگردهای فولادی مورد استفاده.

قطر میلگرد (mm)	مقاومت تسلیم (f_y) (MPa)	کرنش تسلیم (%)	مقاومت نهایی (f_{tu}) (MPa)	کرنش نهایی (%)	مدول الاستیسیته (GPa)
۱۰	۳۷۰	۱۲/۹	۵۶۲	۲۳/۵	۲۰۷
۱۴	۳۲۹	۱۵/۳	۵۲۰	۲۹/۴	۲۱۱

۲-۲- مشخصات نمونه‌ها

در این تحقیق ۵ عدد تیر بتنی در مقیاس واقعی ساخته شد. تیرهای ساخته شده دارای طول ۱۵۰، عرض ۲۰ و ارتفاع ۳۰ سانتی‌متر بودند. از ۵ تیر ساخته شده ۱ تیر حاوی ۱۰۰ درصد NA و بدون الیاف بعنوان نمونه شاهد، ۱ تیر حاوی ۱۰۰ درصد RCA و بدون الیاف و ۳ تیر دیگر حاوی ۱۰۰ درصد RCA و مسلح شده به ۰/۵ درصد از الیاف‌های فولادی، پلی‌پروپیلن و کورتا بودند. مشخصات میلگردگذاری طولی و عرضی برای تمام تیرها مشابه بود. تمام تیرها دارای ۳ عدد میلگرد طولی به قطر ۱۴ میلی‌متر در ناحیه تحتانی و ۲ عدد میلگرد طولی به قطر ۱۰ میلی‌متر در ناحیه فوقانی بودند. میلگردهای عرضی نیز با قطر ۱۰ میلی‌متر در فاصله‌ی ۱۵ سانتی‌متری نسبت به همدیگر قرار گرفتند. آرایش میلگردگذاری تیرها در شکل (۴) نشان داده شده است.



شکل ۴: آرایش میلگردهای طولی و عرضی بکار رفته در تیرها.

۲-۳- طرح‌های اختلاط

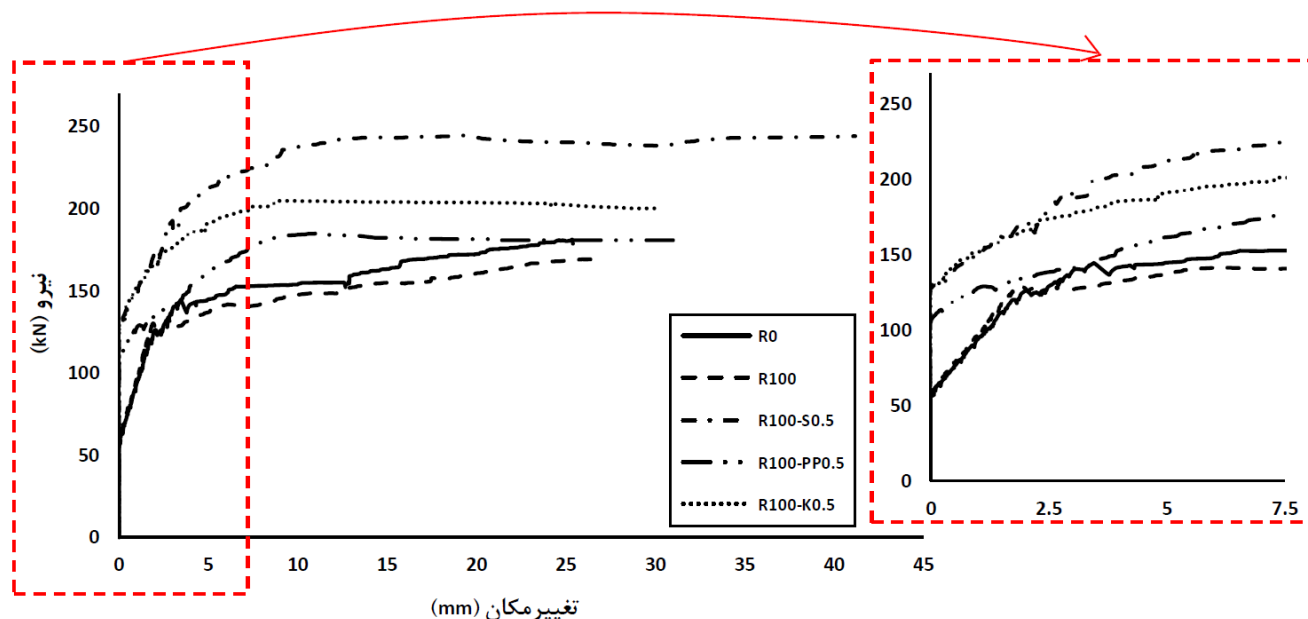
جزئیات طرح‌های اختلاط مورد استفاده در ساخت تیرها در جدول (۳) نشان داده شده است. متغیرهای بکار رفته در ساخت تیرها شامل نوع درشت دانه و الیاف مورد استفاده می‌باشند. نحوه نامگذاری نمونه‌ها به گونه‌ای است که عدد مقابل حرف R نشان دهنده درصد استفاده از RCA و عدد مقابل هر کدام از حروف S، PP و K به ترتیب نشان دهنده درصد استفاده از الیاف‌های فولادی، پلی پروپیلن و کورتا می‌باشد. مقاومت فشاری طرح‌های اختلاط مورد استفاده بر اساس استاندارد [۳۰] ASTM C39 بررسی شدند. نتایج این آزمایش‌ها در جدول (۳) نشان داده شده است. بر اساس نتایج بدست آمده، جایگزینی ۱۰۰ درصدی NA با RCA موجب کاهش ۱۰ درصدی مقاومت فشاری بتن می‌شود. بررسی نتایج طرح‌های اختلاط حاوی الیاف نیز نشان دهنده آن است که ۰/۵ درصد از الیاف‌های فولادی، پلی پروپیلن و کورتا می‌توانند به ترتیب موجب افزایش ۱۹، ۱۲ و ۱۵ درصدی مقاومت فشاری شوند.

جدول ۳: طرح‌های اختلاط مورد استفاده در ساخت تیرها.

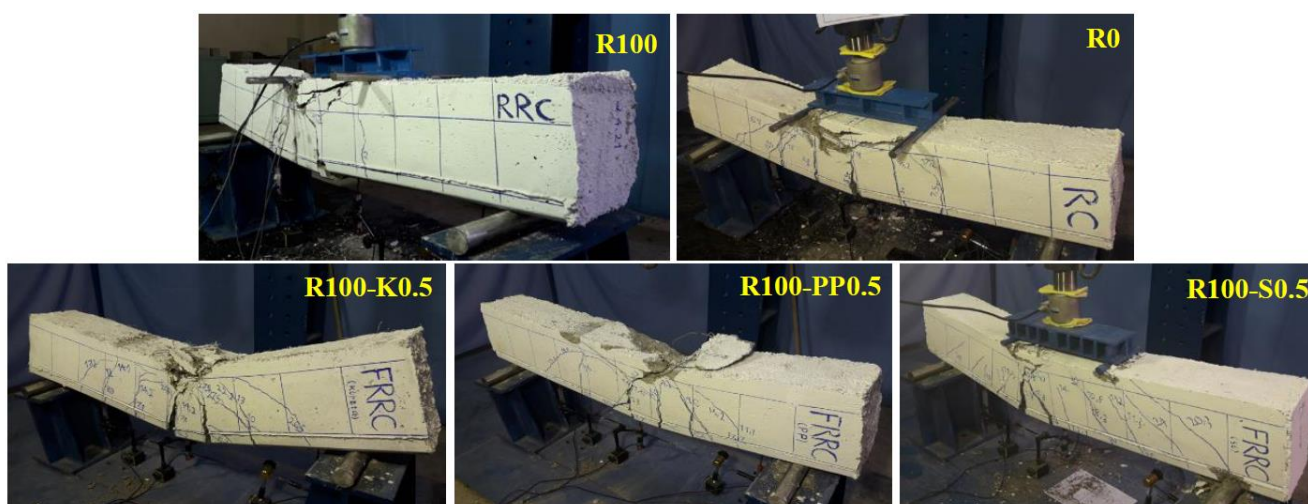
شماره	عنوان طرح	سیمان (kg/m ³)	ریزدانه (kg/m ³)	درشت دانه (kg/m ³)		آب (kg/m ³)	الیاف (%)			مقاومت فشاری (MPa)
				طبیعی	بازیافتی		فولادی	پلی پروپیلن	کورتا	
۱	R0	۳۶۵	۸۹۰	۸۳۴	۰	۲۰۱	۰	۰	۰	۳۶/۳۵
۲	R100	۳۶۵	۸۹۰	۰	۸۲۷/۹	۲۰۱	۰	۰	۰	۳۲/۸۱
۳	R100-S0.5	۳۶۵	۸۹۰	۰	۸۲۷/۹	۲۰۱	۰	۰/۵	۰	۳۹/۱۲
۴	R100-PP0.5	۳۶۵	۸۹۰	۰	۸۲۷/۹	۲۰۱	۰	۰	۰/۵	۳۶/۸۳
۵	R100-K0.5	۳۶۵	۸۹۰	۰	۸۲۷/۹	۲۰۱	۰	۰	۰/۵	۳۷/۸

۲-۴- دستگاه بارگذاری

تیرهای بتنی ساخته شده بعد از گذشت ۲۸ روز تحت آزمایش خمش چهار نقطه‌ای قرار گرفتند. فاصله میان دو تکیه‌گاه ۱۳۰ سانتی متر و فاصله‌ی میان دو نقطه‌ی بارگذاری برابر با یک سوم فاصله دو تکیه‌گاه در نظر گرفته شد. بار وارده به تیر بتنی توسط بارسنج با ظرفیت ۵۰۰ kN ثبت شد. جهت اندازه‌گیری خیز تیر نیز از خیزسنج‌هایی با طول ۱۰ سانتی متر استفاده شد. جزئیات نحوه انجام این آزمایش در شکل (۵) نشان داده شده است.



شکل ۶: نمودار بار - تغییر مکان تیرها در آزمایش مقاومت خمشی.



شکل ۷: نحوه شکست تیرها در آزمایش مقاومت خمشی.

۳-۱- بررسی رفتار در ناحیه الاستیک

۳-۱-۱- حد تناسب

بیشترین نیروی تحمل شده توسط تیر در ناحیه‌ای که منحنی بار - تغییر مکان بصورت کاملاً خطی می‌باشد، تحت عنوان حد تناسب تعیین شد. نتایج مربوط به این پارامتر بر حسب kN در شکل (الف) نشان داده شده است. نتایج مربوط به پارامتر حد تناسب برای تیرهای حاوی NA و RCA تقریباً مشابه بدست آمد. حد تناسب تیرهای حاوی ۱۰۰ درصد NA و RCA به ترتیب برابر با ۱۲۰ kN و ۱۲۸ بدست آمد که بیانگر رشد ۶/۷ درصدی حد تناسب در تیر بازیافتی در مقایسه با تیر معمولی می‌باشد. از طرفی، مقایسه حد تناسب در تیرهای حاوی و فاقد الیاف نشان دهنده‌ی تاثیر قابل ملاحظه الیاف‌های فولادی و کورتا و تاثیر اندک الیاف پلی‌پروپیلن در افزایش حد تناسب تیرها می‌باشد. افزودن ۰/۵ درصد الیاف فولادی به تیر حاوی ۱۰۰ درصد RCA موجب افزایش حد تناسب تا ۱۷۴ kN شد. این نتیجه نشان دهنده‌ی افزایش ۳۶ درصدی حد تناسب بعلاوه افزودن ۰/۵ درصد الیاف فولادی می‌باشد. این در صورتی است که استفاده از

همین میزان الیاف‌های کورتا و پلی‌پروپیلن موجب افزایش ۳۴ و ۱/۶ درصدی حد تناسب شدند. این نتایج بیانگر تاثیر قابل ملاحظه الیاف‌های فولادی و کورتا و عدم تاثیر الیاف پلی‌پروپیلن در افزایش حد تناسب می‌باشد.

۳-۱-۲- مدول برجهندگی

مساحت زیر منحنی بار - تغییر مکان تا نقطه حد تناسب تحت عنوان مدول برجهندگی بر حسب $kN.m$ محاسبه و در شکل (۸) نشان داده شده است. مدول برجهندگی در واقع نشان دهنده‌ی میزان ظرفیت انرژی الاستیک جذب شده توسط تیر می‌باشد. مدول برجهندگی برای تیر مرجع (حاوی ۱۰۰ درصد NA و فاقد الیاف) برابر با $۰/۱۶۸ kN.m$ بدست آمد که مقایسه‌ی آن با مدول برجهندگی تیر حاوی ۱۰۰ درصد RCA نشان دهنده‌ی تاثیر مثبت RCA بر مدول برجهندگی تیرها می‌باشد. جایگزینی ۱۰۰ درصدی NA با RCA موجب افزایش مدول برجهندگی تا $۰/۱۸۱ kN.m$ شد که این نتیجه بیانگر رشد $۷/۸$ درصدی مدول برجهندگی تیرهای بازیافتی در مقایسه با تیرهای معمولی می‌باشد. همانند نتایج مربوط به پارامتر حد تناسب، در پارامتر مدول برجهندگی نیز شاهد تاثیر قابل ملاحظه الیاف‌های فولادی و کورتا و تاثیر کمتر الیاف پلی‌پروپیلن بودیم. افزودن $۰/۵$ درصد از الیاف‌های فولادی و کورتا به تیرهای حاوی ۱۰۰ درصد RCA موجب افزایش مدول برجهندگی به ترتیب تا $۰/۳۶۰ kN.m$ و $۰/۳۴۴ kN.m$ شدند. این نتایج نشان دهنده‌ی افزایش ۱۱۴ و ۱۰۵ درصدی مدول برجهندگی به ترتیب در اثر افزودن $۰/۵$ درصد از الیاف‌های فولادی و کورتا می‌باشد. این در صورتی است که تیر حاوی $۰/۵$ درصد الیاف پلی‌پروپیلن در پارامتر مدول برجهندگی رشد ۱۲ درصدی را نسبت به تیر مشابه فاقد الیاف تجربه کرد. این نتیجه بیانگر تاثیر اندک این الیاف در مقایسه با تاثیر الیاف‌های فولادی و کورتا در افزایش مدول برجهندگی می‌باشد.

۳-۱-۳- مدول الاستیسیته خمشی

مدول الاستیسیته خمشی مطابق با رابطه (۱) محاسبه شد.

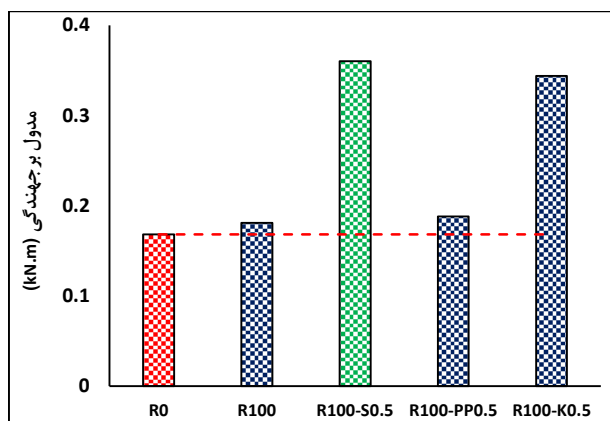
$$E_f = \frac{FL^3}{48Iy} \quad (1)$$

در این رابطه، E_f مدول الاستیسیته خمشی، F نیروی خمشی، L طول دهانه تیر، I ممان اینرسی سطح مقطع تیر (۴۵۰۰۰ cm^4) و y خیز تیر در ناحیه الاستیک می‌باشد. مدول الاستیسیته خمشی برای تیرها بر حسب GPa محاسبه و در شکل (۸) نشان داده شده است. نتایج نشان دهنده‌ی کاهش ۹ درصدی مدول الاستیسیته خمشی در اثر جایگزینی NA با RCA می‌باشد. استفاده از ۱۰۰ درصد RCA مدول الاستیسیته خمشی را از $۳/۹۲ GPa$ در تیر مرجع ($R0$) به $۳/۵۶ GPa$ کاهش داد. از طرفی، استفاده از الیاف‌ها توانست ضغف حاصل از کاربرد RCA را جبران نماید. مدول الاستیسیته خمشی برای تیرهای حاوی $۰/۵$ درصد از الیاف‌های فولادی، پلی‌پروپیلن و کورتا به ترتیب $۵/۸۳ GPa$ ، $۴/۳۵ GPa$ و $۵/۵۱ GPa$ بدست آمد. این نتایج نشان دهنده‌ی افزایش ۶۴، ۲۲ و ۵۵ درصدی مدول الاستیسیته خمشی در اثر افزودن $۰/۵$ درصد از الیاف‌های فولادی، پلی‌پروپیلن و کورتا می‌باشد. بر این اساس، الیاف‌های فولادی و کورتا به خوبی می‌توانند کاهش مدول الاستیسیته خمشی ناشی از RCA را جبران نمایند.

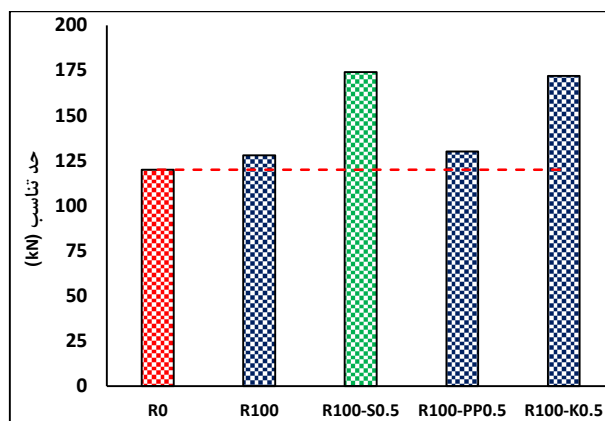
۳-۱-۴- لنگر تسلیم

لنگر خمشی تحمل شده در نقطه‌ای که تیر از ناحیه الاستیک وارد ناحیه پلاستیک می‌شود، ثبت و در شکل (۸) نشان داده شده است. بیشترین لنگر خمشی تحمل شده در نقطه تسلیم را تیر R100-S0.5 (حاوی ۱۰۰ درصد RCA و $۰/۵$ درصد الیاف فولادی) با مقدار $۴۲/۲۵ kN.m$ به خود اختصاص داد. میزان لنگر تحمل شده در نقطه تسلیم تیر مذکور نسبت به نمونه مشابه فاقد الیاف (R100) افزایش ۴۹ درصدی داشته است که نشان دهنده‌ی تاثیر قابل توجه الیاف فولادی در بهبود رفتار خمشی تیرهای بازیافتی می‌باشد. از طرفی، با بررسی نتایج مربوط به تیرهای مسلح شده با الیاف‌های پلیمری نیز شاهد تاثیر مثبت این الیاف‌ها در افزایش میزان لنگر تحمل شده توسط تیرها در نقطه تسلیم بودیم. افزودن $۰/۵$ درصد از الیاف‌های پلیمری پلی‌پروپیلن و کورتا لنگر تسلیم تیرها را به ترتیب ۱۱ و ۲۹

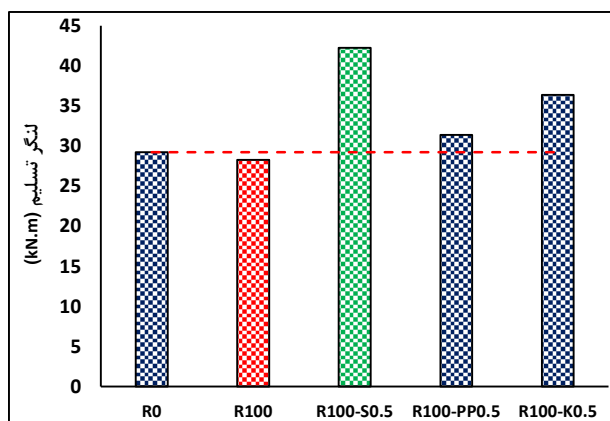
درصد افزایش داد. مقایسه تاثیر الیاف‌های پلیمری و فولادی در افزایش لنگر تسلیم تیرها نشان دهنده تاثیر قابل توجه‌تر الیاف فولادی نسبت به الیاف‌های پلیمری می‌باشد. از طرفی، مقایسه لنگر تسلیم تیرهای حاوی RCA و NA نشان دهنده تاثیر اندک RCA در کاهش این پارامتر می‌باشد. جایگزینی ۱۰۰ درصدی NA با RCA موجب کاهش ۳/۳ درصدی لنگر تحمل شده توسط تیر در نقطه تسلیم می‌شود. این نتیجه بیان کننده آن است که تیرهای بتنی معمولی و بازیافتی از لحاظ لنگر تحمل شده در نقطه تسلیم رفتار تقریباً مشابهی را از خود نشان داده‌اند.



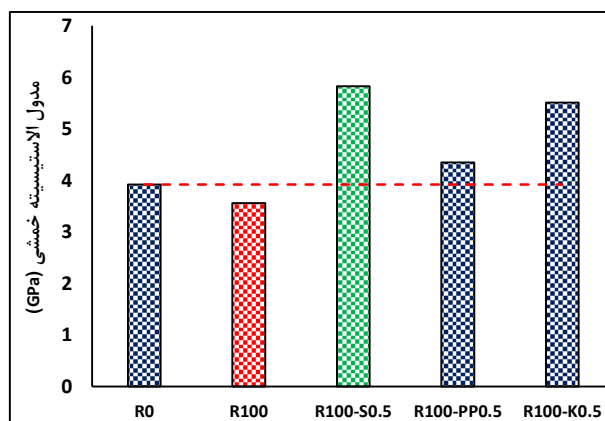
(ب)



(ف)



(د)



(ج)

شکل ۸: نتایج پارامترهای ناحیه الاستیک: (الف) حد تناسب، (ب) مدول برجهنگی، (ج) مدول الاستیسیته خمشی و (د) لنگر تسلیم.

۳-۲- بررسی رفتار در ناحیه پلاستیک

۳-۲-۱- لنگر نهایی

بیشترین میزان لنگر تحمل شده توسط تیرها در آزمایش خمش ثابت و شکل (۹ الف) نشان داده شده است. نتایج این پارامتر نشان دهنده حداکثر مقاومت تیرها در آزمایش خمش می‌باشد. استفاده از RCA موجب تضعیف و استفاده از الیاف موجب تقویت این پارامتر در تیرها شد. لنگر نهایی تیر مرجع (حاوی ۱۰۰ درصد NA و فاقد الیاف) بدست آمد. این پارامتر برای تیر R100 (حاوی ۱۰۰ درصد RCA و فاقد الیاف) برابر با ۳۶/۷۴ kN.m بدست آمد. این نتیجه بیان کننده کاهش ۶/۴ درصدی لنگر نهایی تیرهای بازیافتی در مقایسه تیرهای معمولی می‌باشد. از طرفی، نتایج بیان کننده آن است که استفاده از الیاف به خوبی می‌تواند ضعف تیرهای بازیافتی در پارامتر لنگر نهایی را جبران نماید. افزودن ۰/۵ درصد از الیاف‌های فولادی، پلی پروپیلن و کورتا توانست به ترتیب ۴۴، ۲۱ و ۲۱

درصد لنگر نهایی تیرهای باز یافتی را افزایش دهد. بنابراین نقش الیاف فولادی در افزایش لنگر نهایی تیرها نسبت به نقش الیافهای پلیمری بسیار قابل توجه تر می باشد. از این رو، می توان الیاف فولادی را بعنوان یک گزینه مناسب جهت تقویت عملکرد خمشی تیرهای باز یافتی معرفی نمود، زیرا لنگر نهایی تیر باز یافتی حاوی ۰/۵ درصد الیاف فولادی نسبت به تیر بتنی معمولی افزایش ۳۵ داشته است.

۳-۲-۲- شکل پذیری

شکل پذیری تیرها بر اساس رابطه (۲) محاسبه و در شکل (۹ ب) نشان داده شده است.

$$D = \frac{\delta_u}{\delta_y} \quad (2)$$

در این رابطه، δ_y تغییر مکان نقطه تسلیم و δ_u تغییر مکان نقطه شکست تیر می باشد. شکل پذیری برای تیر مرجع (حاوی ۱۰۰ درصد NA و فاقد الیاف) برابر ۷/۲۵ بدست آمد. این در صورتی است که شکل پذیری تیر R100 (حاوی ۱۰۰ درصد RCA و فاقد الیاف) ۷/۶۵ بدست آمد. این نتیجه نشان دهنده تفاوت ۶ درصدی شکل پذیری تیرهای حاوی NA و RCA می باشد که این میزان تفاوت اندک و قابل چشم پوشی است. بنابراین تیرهای بتنی معمولی و باز یافتی از لحاظ شکل پذیری رفتار تقریباً مشابهی را از خود نشان داده اند. از طرفی، نتایج نشان دهنده آن است که افزودن الیاف بطور قابل توجهی شکل پذیری تیرها را افزایش می دهد. بیشترین تاثیر در میان الیافهای مورد استفاده مربوط به الیاف فولادی می باشد. افزودن ۰/۵ درصد از الیاف مذکور به تیر حاوی ۱۰۰ درصد RCA موجب افزایش شکل پذیری از ۷/۶۵ به ۱۲/۱۲ شده است. این در صورتی است که افزودن همین مقدار از الیافهای پلی پروپیلن و کورتا شکل پذیری را به ترتیب تا ۹/۱۵ و ۹/۹۲ افزایش داد. بنابراین الیاف فولادی در بهبود شکل پذیری تیرهای باز یافتی الیاف مناسب تری می باشد.

۳-۲-۳- انرژی جذب شده

انرژی خمشی جذب شده تیرها با محاسبه مساحت زیر نمودار بار خمشی - تغییر مکان تا نقطه شکست تیر محاسبه شد. این پارامتر بر حسب کیلو ژول (kJ) محاسبه و در شکل (۹ ج) نشان داده شده است. نتایج نشان دهنده آن است که استفاده از RCA تغییری در جذب انرژی خمشی نسبت به نمونه شاهد ایجاد نکرده است. تیر حاوی ۱۰۰ درصد NA دارای جذب انرژی خمشی برابر با ۳/۹۵ و تیر حاوی ۱۰۰ درصد RCA دارای جذب انرژی برابر با ۳/۹۶ kJ می باشد. این نتیجه نشان دهنده رفتار مشابه تیرهای حاوی NA و RCA در پارامتر جذب انرژی خمشی می باشد. از طرفی، با مقایسه جذب انرژی تیرهای حاوی و فاقد الیاف، شاهد تاثیر مثبت الیافهای فولادی و پلیمری در افزایش جذب انرژی خمشی تیرهای باز یافتی می باشیم. این تاثیر مثبت برای الیاف فولادی نسبت به الیافهای پلیمری قابل توجه تر است. استفاده از ۰/۵ درصد الیافهای پلی پروپیلن و کورتا جذب انرژی خمشی را به ترتیب ۳۷ و ۴۹ درصد نسبت به نمونه مشابه فاقد الیاف افزایش داد، در صورتی که همین میزان الیاف فولادی توانست افزایش ۱۴۱ درصدی را ایجاد نماید.

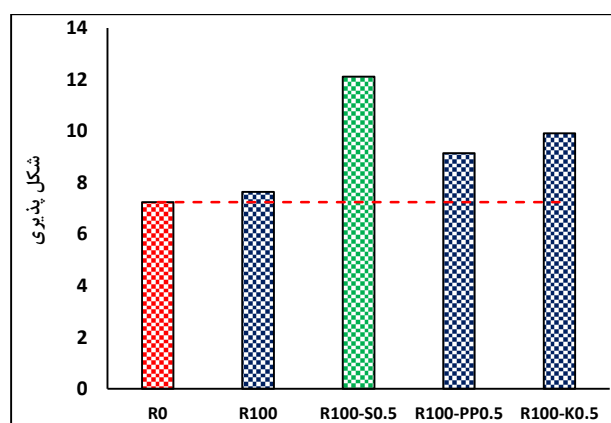
۳-۲-۴- ضریب طاق خمشی

ضریب طاق خمشی تیرهای بتنی بر اساس روش پیشنهادی توسط انجمن مهندسی عمران ژاپن (JSCE) [۳۱] محاسبه شد. بر اساس این روش، ضریب طاق خمشی تیرهای بتنی از طریق رابطه (۳) محاسبه شد.

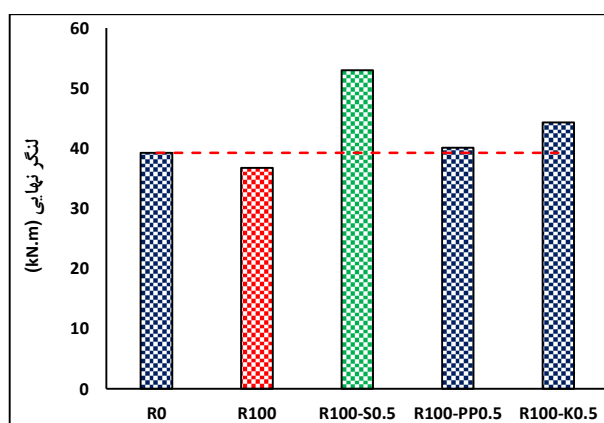
$$f_e = \frac{A\delta_{tb}L}{\delta_{tb}b d^2} \quad (3)$$

در این رابطه، f_e ضریب طاق خمشی، δ_{tb} میزان خیز تیر به اندازه $\frac{1}{150}$ دهانه، $A\delta_{tb}$ مساحت زیر نمودار بار - تغییر مکان تا خیز معادل با δ_{tb} ، عرض، b ارتفاع و L طول دهانه تیر می باشد.

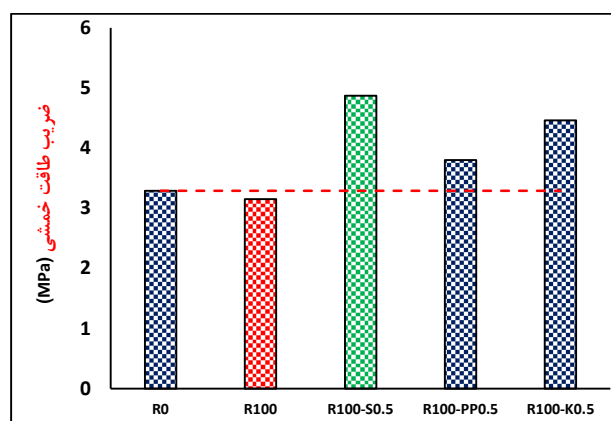
پارامتر ضریب طاقت خمشی تیرها بر حسب MPa محاسبه و در شکل (۹ د) نشان داده شده است. این پارامتر نشان دهنده مقاومت تیرها بعد از رسیدن به تسلیم می‌باشد. همانطوری که از نتایج مشخص است، بیشترین ضریب طاقت مربوط به تیر حاوی ۰/۵ درصد الیاف فولادی می‌باشد. ضریب طاقت برای این تیر برابر با ۴/۸۷ MPa بدست آمده است که افزایش ۵۵ درصدی را نسبت به تیر مشابه فاقد الیاف تجربه کرده است. با مقایسه میزان تاثیر الیاف فولادی با الیافهای پلیمری مورد استفاده این نتیجه حاصل می‌شود که الیاف فولادی در افزایش میزان ضریب طاقت تیرهای بتنی عملکرد بهتری را از خود نشان داده است. ضریب طاقت خمشی تیرهای حاوی ۰/۵ درصد الیافهای پلیمری پلی پروپیلن و کورتا به ترتیب ۳/۸ MPa و ۴/۴۶ MPa بدست آمد. این نتایج نشان دهنده افزایش ۲۱ و ۴۲ درصدی ضریب طاقت خمشی تیرهای بتنی به ترتیب در اثر استفاده ۰/۵ درصدی الیافهای پلی پروپیلن و کورتا می‌باشد. از طرفی، مقایسه ضریب طاقت خمشی تیرهای حاوی NA و RCA نشان دهنده کاهش اندک ضریب طاقت خمشی تیرها در اثر استفاده از RCA می‌باشد. میزان ضریب طاقت خمشی در نمونه حاوی ۱۰۰ درصد NA برابر با ۳/۲۹ MPa بدست آمد که جایگزینی NA با RCA موجب کاهش آن تا ۳/۱۵ MPa شد. این نتیجه بیانگر کاهش ۴ درصدی ضریب طاقت خمشی در اثر استفاده از RCA می‌باشد.



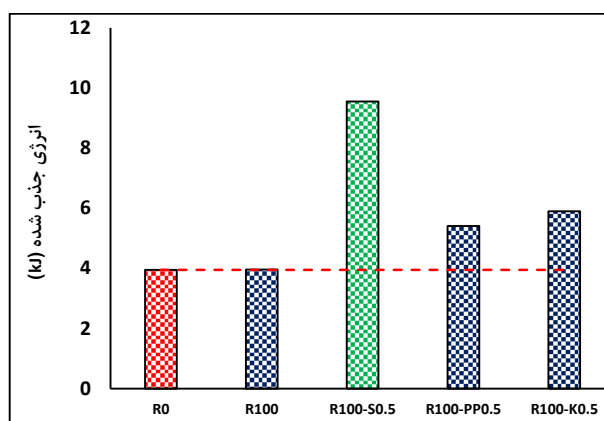
(ب)



(الف)



(د)



(ج)

شکل ۹: نتایج پارامترهای ناحیه پلاستیک: (الف) لنگر نهایی، (ب) شکل پذیری، (ج) انرژی جذب شده و (د) ضریب طاقت خمشی.

۴- مقایسه نتایج با تحقیقات گذشته

در این قسمت از مقاله نتایج بدست آمده برای پارامتر لنگر نهایی تیرهای باز یافتی با نتایج چندین تحقیق معتبر مقایسه خواهد شد. در جدول (۴) اطلاعات مربوط به چندین تحقیق معتبر در حوزه بتن‌های باز یافتی آورده شده است. همانطور که از اطلاعات نشان داده

شده در این جدول مشخص می‌باشد، جایگزینی NA با RCA موجب کاهش لنگر نهایی تیرها شده است. نکته قابل توجه آن است که تقریباً در تمام تحقیقات گذشته کاهش لنگر نهایی تیرهای بتنی بازیافتی در مقایسه با تیرهای بتنی معمولی کمتر از ۱۰ درصد گزارش شده است. در این تحقیق نیز اختلاف میان لنگر نهایی تیر حاوی ۱۰۰ درصد RCA با تیر حاوی ۱۰۰ درصد NA برابر با ۶/۴ درصد بدست آمد که از تطابق قابل قبولی با نتایج تحقیقات گذشته برخوردار است. در شکل (۱۰) نتایج تحقیقات گذشته با تحقیق حاضر بصورت نمودار مقایسه شده است.

جدول ۴: اطلاعات مربوط به تحقیقات گذشته در مورد بتن‌های بازیافتی.

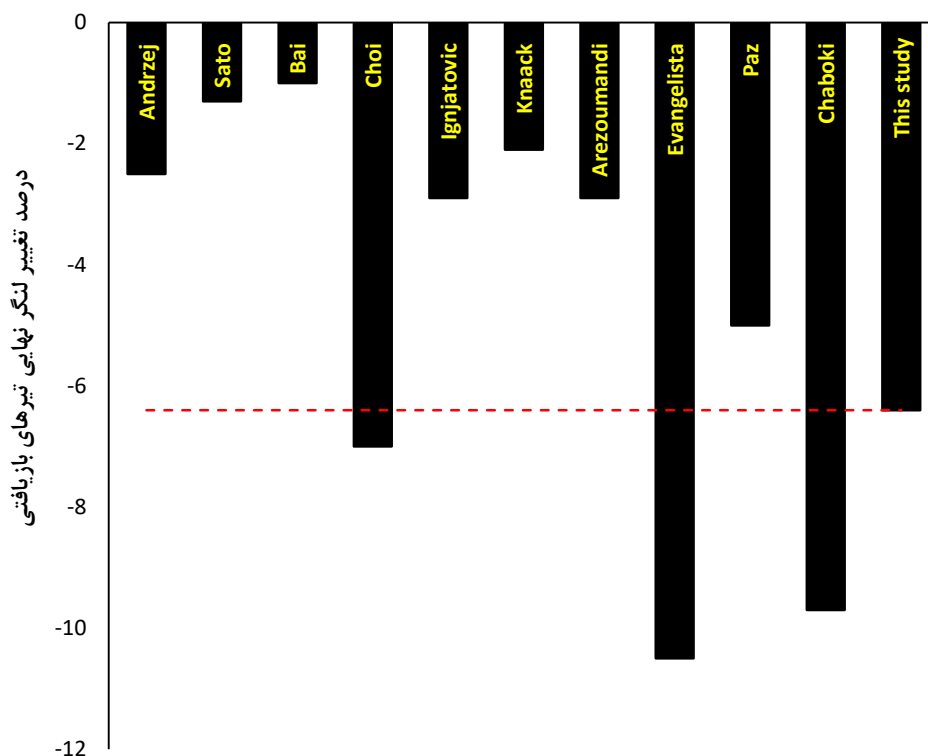
شماره	محقق	سال تحقیق	ابعاد تیر (cm)			درصد آرما تور	مقاومت فشاری بتن (MPa)	RCA (%)	لنگر نهایی (kN.m)	تغییر نسبت به نمونه معمولی (%)
			طول	عرض	ارتفاع					
۱	Andrzej و همکاران [۳۲]	۲۰۰۷	۲۶۰	۲۰	۳۰	۰/۹	۵۷/۹	۰	۶۴	-
۲	Sato و همکاران [۳۳]	۲۰۰۷	۲۸۰	۱۵	۲۰	۱/۰۶	۵۷	۰	۱۵	-
۳	Bai و همکاران [۳۴]	۲۰۱۰	۲۱۰	۱۵	۳۰	۰/۶۸	۴۲/۳	۵۰	۳۴	-۱
۴	Choi و همکاران [۵]	۲۰۱۲	۶۴۰	۴۰	۶۰	۲/۳۴	۲۶/۹	۰	۸۷۸/۹	-
۵	Ignjatovic و همکاران [۳۵]	۲۰۱۳	۳۵۰	۲۰	۳۰	۱/۴۶	۴۴/۲	۵۰	۱۱۰/۶	۱/۸
۶	Knaack و همکاران [۳۶]	۲۰۱۴	۱۹۸	۱۵	۲۰	۱/۳	۴۰	۵۰	۴۱/۸	-۱/۹
۷	Arezoumandi و همکاران [۳۷]	۲۰۱۵	۳۳۰	۳۰	۴۶	۰/۵	۳۷/۲	۰	۱۵۴/۱	-
۸	Evangelista و همکاران [۳۸]	۲۰۱۶	۲۰۰	۱۲	۲۰	۱/۱۳	۳۲/۸	۵۰	۲۳/۹	-۳/۶
۹	Paz و همکاران [۳۹]	۲۰۱۸	۳۶۰	۲۰	۳۰	۰/۷۶	۵۱/۸	۵۰	۵۶/۳	-۱/۱
۱۰	Chaboki و همکاران [۲۲]	۲۰۱۸	۱۵۰	۱۵	۲۰	۲/۱	۳۶	۰	۲۳/۷	-
۱۱	تحقیق حاضر	۲۰۲۱	۱۵۰	۲۰	۳۰	۰/۷۷	۳۶/۳۵	۰	۴۵/۳	-
							۳۲/۸۱	۱۰۰	۴۲/۴	-۶/۴

۵- مقایسه نتایج با روابط آیین نامه‌ای

در این قسمت از مقاله نتایج بدست آمده از آزمایش‌های تجربی با روابط آیین نامه‌ای مقایسه می‌گردد. آیین نامه بتن ایران (آبا) [۴۰] برای محاسبه لنگر نهایی تیرهای دارای میلگردهای کششی و فشاری رابطه‌ی (۴) را پیشنهاد می‌کند.

$$M_{U,ABA} = 0.85 \phi_c f'_c a b \left(d - \frac{a}{2} \right) + \phi_s A'_s f'_s (d - d') \quad (4)$$

در این رابطه، f'_c مقاومت فشاری بتن، f'_s تنش تسلیم میلگردهای فشاری، A'_s مساحت میلگردهای فشاری، b عرض تیر، d ارتفاع موثر، $d - d'$ فاصله مرکز به مرکز میلگردهای فشاری و کششی و a ارتفاع بلوک فشاری تنش می‌باشد. ϕ_s و ϕ_c نیز به ترتیب ضریب جزئی ایمنی بتن و فولاد می‌باشند. بر اساس آیین نامه بتن ایران (آبا) این ضریب برای بتن ۰/۱۶ و برای فولادی ۰/۸۵ در نظر گرفته می‌شود. ارتفاع بلوک فشاری تنش نیز مطابق با رابطه (۵) محاسبه می‌شود.



شکل ۱۰: مقایسه نتایج تحقیقات گذشته با تحقیق حاضر.

$$a = \frac{\phi_s (A_s f_s - A'_s f'_s)}{0.85 \phi_c f'_c b} \quad (5)$$

در این رابطه، A_s و f_s به ترتیب مساحت و تنش تسلیم میلگردهای کششی و A'_s و f'_s به ترتیب مساحت و تنش تسلیم میلگردهای فشاری می‌باشند.

آیین نامه [۴۱] ACI 318-14 به منظور محاسبه لنگر نهایی تیرهای بتنی دارای میلگردهای کششی و فشاری رابطه (۶) را توصیه می‌کند.

$$M_{U,ACI} = A'_s f'_s (d - d') + f_s (A_s - A'_s) \left(d - \frac{a}{2} \right) \quad (6)$$

که پارامتر a بر اساس رابطه (۷) محاسبه می‌شود.

$$a = \frac{A_s f_s - A'_s f'_s}{0.85 f'_c b} \quad (7)$$

آیین نامه [۴۲] EuroCode 2 نیز رابطه (۸) را برای محاسبه لنگر نهایی تیرهای بتنی مسلح معرفی می کند.

$$M_{U,EURO} = K f_{ck} b d^2 \quad (8)$$

در این رابطه، f_{ck} مقاومت فشاری بتن و K ضریبی است که با توجه به نسبت ارتفاع بلوک فشاری تنش به عمق موثر مقطع تعیین می گردد.

علاوه بر این، آیین نامه [۴۳] CSA-A23.3 به منظور محاسبه لنگر نهایی تیرهای بتن مسلح با فولاد فشاری روابط (۹-۱۷) را ارائه می دهد.

$$M_{U,CSA} = M_f - M_{fc} \quad (9)$$

$$M_f = \phi_s A_s f_s \left(d - \frac{a}{2} \right) \quad (10)$$

$$a = \frac{\phi_s A_s f_s}{\alpha_1 \phi_c f'_c b} \quad (11)$$

$$\alpha_1 = 0.85 - 0.0015 f'_c \geq 0.67 \quad (12)$$

$$M_{fc} = C \left(d - \frac{a_b}{2} \right) \quad (13)$$

$$C = \phi_c \alpha_1 f'_c b a_b \quad (14)$$

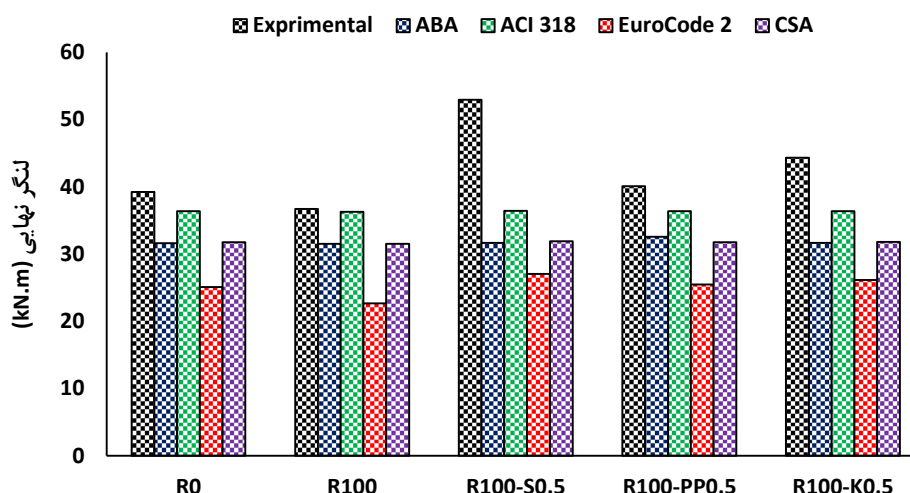
$$a_b = \beta_1 c_b \quad (15)$$

$$\beta_1 = 0.97 - 0.0025 f'_c \geq 0.67 \quad (16)$$

$$c_b = \frac{700}{700 + f_s} d \quad (17)$$

تمام پارامترهای موجود در این روابط مشابه روابط پیشین می باشد، با این تفاوت که در این آیین نامه ϕ_s و ϕ_c به ترتیب برابر ۰/۶۵ و ۰/۸۵ در نظر گرفته می شوند.

لنگر نهایی تیرهای آزمایش شده در این تحقیق بر اساس آیین نامه های مذکور محاسبه و در شکل (۱۱) با نتایج آزمایشگاهی مقایسه شد. با توجه به مقایسه انجام گرفته این نتیجه حاصل می شود که لنگر نهایی محاسبه شده بر اساس تمام این نامه های مذکور کمتر از مقدار لنگر نهایی آزمایشگاهی می باشد. اختلاف میان نتایج آزمایشگاهی و آیین نامه ای در تیرهای حاوی الیاف بطور قابل ملاحظه ای افزایش می یابد. از بین نتایج آیین نامه ای نتایج مربوط به آیین نامه ACI 318 کمترین اختلاف و نتایج مربوط به آیین نامه Eurocode 2 بیشترین اختلاف را با نتایج آزمایشگاهی دارند. لازم بذکر است که نتایج مربوط به آیین نامه های آبا و CSA اختلاف تقریباً مشابهی با نتایج آزمایشگاهی دارند.



شکل ۱۱: مقایسه نتایج تحقیق حاضر با روابط آیین نامه‌ای.

۶- نتیجه‌گیری

در این تحقیق با انجام آزمایش خمش چهار نقطه‌ای بر روی تیرهای بتنی بازیافتی مسلح شده به الیاف‌های فولادی، پلی‌پروپیلن و کورتا و مقایسه آن با رفتار خمشی تیرهای بتنی معمولی در دو ناحیه الاستیک و پلاستیک، نتایج زیر حاصل شد:

- سنگدانه‌های بازیافتی در مقایسه با سنگدانه‌های طبیعی چگالی و مقاومت سایشی کمتر و جذب آب بیشتری دارند.
- بررسی پارامترهای رفتاری تیرها در ناحیه الاستیک نشان داد که در این ناحیه تیرهای بتنی معمولی و بازیافتی دارای رفتار تقریباً مشابهی می‌باشند. تیرهای بازیافتی در پارامترهای حد تناسب و مدول برجهنگی به ترتیب افزایش ۶/۷ و ۷/۸ درصدی و در پارامترهای مدول الاستیسیته خمشی و لنگر تسلیم به ترتیب کاهش ۹ و ۳/۳ درصدی را در مقایسه با تیرهای معمولی تجربه کردند.
- بررسی تاثیر الیاف‌ها در رفتار تیرهای بتنی بازیافتی در ناحیه الاستیک نشان دهنده‌ی تاثیر مثبت قابل ملاحظه الیاف‌های فولادی و کورتا و تاثیر کمتر الیاف پلی‌پروپیلن می‌باشد. ۰/۵ درصد از الیاف‌های فولادی، کورتا و پلی‌پروپیلن به ترتیب موجب افزایش ۳۶، ۳۴ و ۱/۶ درصدی حد تناسب، ۱۱۴، ۱۰۵ و ۱۲ درصدی مدول برجهنگی، ۶۴، ۵۵ و ۲۲ درصدی مدول الاستیسیته خمشی و ۴۹، ۲۹ و ۱۱ درصدی لنگر تسلیم تیرهای بازیافتی شدند.
- رفتار خمشی تیرهای بتنی بازیافتی در ناحیه پلاستیک تقریباً مشابه با رفتار تیرهای بتنی معمولی می‌باشد. در تیرهای بازیافتی پارامترهای لنگر نهایی و ضریب طاقت خمشی به ترتیب کاهش ۶/۴ و ۴ درصدی و پارامتر شکل‌پذیری افزایش ۶۵/۷ درصدی را در مقایسه با تیرهای معمولی تجربه کردند. پارامتر جذب انرژی نیز برای تیرهای بتنی معمولی و بازیافتی تقریباً مشابه بدست آمد.
- الیاف‌های مورد استفاده موجب بهبود رفتار خمشی تیرهای بتنی بازیافتی در ناحیه پلاستیک شدند. در صورتی که تاثیر الیاف فولادی در مقایسه با تاثیر الیاف‌های کورتا و پلی‌پروپیلن قابل توجه‌تر می‌باشد. ۰/۵ درصد از الیاف‌های فولادی، کورتا و پلی‌پروپیلن به ترتیب موجب افزایش ۴۴، ۲۱ و ۹ درصدی لنگر نهایی، ۵۸، ۳۰ و ۲۰ درصدی شکل‌پذیری، ۱۴۱، ۴۹ و ۳۷ درصدی انرژی جذب شده و ۵۵، ۴۲ و ۲۱ درصدی ضریب طاقت خمشی تیرهای بازیافتی در مقایسه با تیرهای معمولی شد.

- مقایسه نتایج تجربی بدست آمده در این تحقیق با روابط توصیه شده توسط آیین نامه‌های آبا، ACI 318، EuroCode 2 و CSA نشان داد که لنگر نهایی محاسبه شده با روابط پیشنهادی آیین نامه‌های مذکور کمتر از مقدار تجربی می‌باشد. با این حال، نتایج مربوط به آیین نامه ACI 318 کمترین اختلاف و نتایج مربوط به EuroCode 2 بیشترین اختلاف را با نتایج تجربی دارند.

تحقیق حاضر نشان داد که رفتار خمشی تیرهای بتنی بازیافتی و بتنی معمولی در نواحی الاستیک و پلاستیک تقریباً مشابه بوده و با کاربرد الیاف‌های فولادی و پلیمری می‌توان عملکرد خمشی تیرهای بتنی بازیافتی را بهبود بخشید. علاوه بر این، نتایج نشان دهنده اختلاف قابل توجه مقادیر لنگر خمشی بدست آمده از روابط آیین نامه‌ای با مقادیر تجربی علی‌الخصوص برای تیرهای بتنی حاوی الیاف بود که این موضوع نشان دهنده آن است که در روابط آیین نامه‌ای بایستی نقش الیاف‌ها در افزایش مقاومت خمشی تیرهای بتنی در نظر گرفته شود.

مراجع

- [1] A. Sahraei Moghadam, F. Omidinasab, S. Moazami Goodarzi., Characterization of concrete containing RCA and GGBFS: Mechanical, microstructural and environmental properties, *Construction and Building Materials*. 289 (2021) 123134.
- [2] M. Etxeberria, A. R. Marí, E. Vázquez., Recycled aggregate concrete as structural material, *Mater Struct*. 40 (2007) 529–41.
- [3] B. González-Fontboa, F. Martínez-Abella, M. F. Herrador, S. Seara-Paz., Structural recycled concrete: behaviour under low loading rate, *Constr Build Mater*. 28 (2012) 111–6.
- [4] G. Fathifazl, A. G. Razaqpur, O. B. Isgor, A. Abbas, B. Fournier, S. Foo., Flexural performance of steel-reinforced recycled concrete beams, *ACI Struct J*. 106 (2009) 858–67.
- [5] W. C. Choi, H. D. Yun, S. W. Kim., Flexural performance of reinforced recycled aggregate concrete beams, *Mag Concr Res*. 64 (2012) 837–48.
- [6] A. Van Gysel, J. Andries., Study of the flexural behaviour of reinforced recycled aggregate concrete beams. *fib Symp. Concr. Struct. Sustain. Community – Proc.* (2012) 583–6.
- [7] TH. K. Kang, W. Kim, Y. K. Kwak, S. G. Hong., Flexural testing of reinforced concrete beams with recycled concrete aggregates, *ACI Struct J*. 111 (2014) 607–16.
- [8] A. B. Ajdukiewicz, A. T. Kliszczewicz., Comparative tests of beams and columns made of recycled aggregate concrete and natural aggregate concrete, *J Adv Concr Technol*. 5 (2007) 259–73.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] R. Kishore., Influence of recycled aggregate on flexural behaviour of reinforced concrete beams, *Int. Conf. Sustain. Constr. Mater. Technol.*, 11-13 June 2007, Coventry. (2007) 36–44.
- [12] A. Sahraei Moghadam, F. Omidinasab, A. Dalvand., Experimental investigation of (FRSC) cementitious composite functionally graded slabs under projectile and drop weight impacts, *Construction and Building Materials*. 237 (2020) 117522.
- [13] A. Sahraei Moghadam, F. Omidinasab, A. Dalvand., Flexural and impact performance of functionally graded reinforced cementitious composite (FGRCC) panels, structures. 29 (2021) 1723–1733.
- [14] M. Mastali, A. Dalvand., Use of silica fume and recycled steel fibers in selfcompacting concrete, *Constr. Build. Mater*. 125 (2016) 196–209.
- [15] E. Martinelli, A. Caggiano, H. Xargay., An experimental study on the postcracking behaviour of hybrid industrial/recycled steel fiber-reinforced concrete, *Constr. Build. Mater*. 94 (2015) 290–298.
- [16] A. Sahraei Moghadam, F. Omidinasab., Assessment of hybrid FRSC cementitious composite with emphasis on flexural performance of functionally graded slabs, *Construction and Building Materials*. 250 (2020) 118904.
- [17] A. Sahraei Moghadam, F. Omidinasab., Effect of Purposive Distribution of Fibers to Prevent the Penetration of Bullet in Concrete Walls, *KSCE J Civ Eng*. (2021).
- [18] V. Athiyamaan, G. Mohan Ganesh., Experimental statistical and simulation analysis on impact of micro steel – fibres in reinforced SCC containing admixtures, *Constr. Build. Mater*. 246 (2020) 118450.

- [19] M. Mastali, A. Dalvand, M. Fakharifar., Statistical variations in the impact resistance and mechanical properties of polypropylene fiber reinforced selfcompacting concrete, *Comp. Concr.* 18 (2016) 113–124.
- [20] A. R. Khaloo, A. Esrafil, M. Kalani, M. H. Mobini., Use of polymer fibres recovered from waste car timing belts in high performance concrete, *Constr. Build. Mater.* 80 (2015) 7–31.
- [21] D. Gao, L. Zhang., Flexural performance and evaluation method of steel fiber reinforced recycled coarse aggregate concrete, *Constr. Build. Mater.* 159 (2018) 126–136.
- [22] H. R. Chaboki, M. Ghalehnovi, A. Karimipour, J. Brito., Experimental study on the flexural behaviour and ductility ratio of steel fibres coarse recycled aggregate concrete beams, *Construction and Building Materials.* 186 (2018) 400–422.
- [23] N. Tošić, 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.
- [24] ASTM C150 / C150M-20, Standard Specification for Portland Cement, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2020
- [25] M. D. J. Sanchez, P.A. Gutierrez., Study on the influence of attached mortar content on the properties of recycled concrete aggregate, *Construction and building materials.* 23 (2009) 872-877.
- [26] ASTM C125-20, Standard Terminology Relating to Concrete and Concrete Aggregates, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2020
- [27] ASTM C131 / C131M-20, Standard Test Method for Resistance to Degradation of Small-Size Coarse Aggregate by Abrasion and Impact in the Los Angeles Machine, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2020
- [28] ASTM C33 / C33M-18, Standard Specification for Concrete Aggregates, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2018
- [29] ASTM A615 / A615M-20, Standard Specification for Deformed and Plain Carbon-Steel Bars for Concrete Reinforcement, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2020
- [30] ASTM C39 / C39M-20, Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2020
- [31] JSCE (Japan Society of Civil Engineering) (1984) SF-4: Method of Test for Flexural Strength and Flexural Toughness of Fiber Reinforced Concrete, Tokyo, 58–66.
- [32] B. Andrzej, A. Ajdukiewicz, T. Kliszczewicz, Comparative tests of beams and columns made of recycled aggregate concrete and natural, *Journal of advanced concrete technology.* 5(2) (2007) 259-273.
- [33] R. Sato, I. Maruyama, T. Sogabe, M. Sogo, Flexural Behavior of Reinforced Recycled Concrete Beams, *Journal of Advanced Concrete Technology.* 5(1) (2007) 43-61.
- [34] W. Bai, B. Sun, Experimental Study on Flexural Behavior of Recycled Coarse Aggregate Concrete Beam, *Applied Mechanics and Materials.* 29 (2010) 543-548.
- [35] S. Ignjatović, B. Marinković, M. Mišković, R. Savić, Flexural behavior of reinforced recycled aggregate concrete beams under short-term loading, 46 (2013) 1045-1059.
- [36] A. M. Knaack, Y. C. Kurama, M. ASCE, Behavior of Reinforced Concrete Beams with Recycled Concrete Coarse Aggregates, *Journal of structural engineering.* 141(3) (2015) B4014009-1.
- [37] M. Arezoumandi, A. Smith, J. S. Volz, K. H. Khayat, An experimental study on flexural strength of reinforced concrete beams with 100% recycled concrete aggregate, *Engineering Structures* 88 (2015) 154–162.
- [38] L. Evangelista, J. Brito, Flexural Behaviour of Reinforced Concrete Beams Made with Fine Recycled Concrete Aggregates, *KSCE Journal of Civil Engineering,* 21 (2017) 353-363.
- [39] S. Paz, B. González-Fontebo, F. Martínez-Abella, J. Eiras-López, Flexural performance of reinforced concrete beams made with recycled concrete coarse aggregate, *Engineering Structures* 156 (2018) 32–45.
- [40] Iran concrete code (ABA), Tehran: Country Management and Planning Organization; Deputy for Administrative, Financial and Human Resources Affairs, Scientific Documentation Center, Museum and Publications.
- [41] ACI Committee 318, Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-14) and Commentary, American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, 2014.
- [42] EN, Eurocode 2: Design of concrete structures – Part 1-1: General rules and rules for buildings, CEN, Brussels, 2014.
- [43] CSA A23.3-14, Design of Concrete Structures, A trade-mark of the Canadian Standards Association, operating as “CSA Group” published in June 2014 by CSA Group, 2014.