مجله علمی – پژوهشی
مهندسی عمران مدرس
دوره بیست و دوم، شماره ۲، سال ۱۴۰۱

بررسی آزمایشگاهی رفتار مکانیکی بتن حاوی سنگدانه-های بازیافتی مسلح به الیاف فولادی و پلی‌پروپیلن

سیناحسینی[۱]، جلیل شفائی[۲*]، فرشید جندقی علائی[۳]

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ایران
۲- استادیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ایران
۳- دانشیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ایران

js.shafaei@gmail.com

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۳/۲۲ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۸/۵

چکیده

امروزه استفاده از بتن‌های بازیافتی به دلایل اقتصادی و زیست‌محیطی رشد چشمگیری پیدا کرده است و افزایش درصد جایگزینی سنگدانه‌های بازیافتی، مشخصات مکانیکی بتن را تغییر می‌دهد. در این پژوهش، به بررسی آزمایشگاهی رفتار مکانیکی بتن حاوی سنگدانه‌های بازیافتی با درصدهای مختلف الیاف فولادی و پلی‌پروپیلن به منظور تعیین مقادیر بهینه پرداخته شده است. همچنین الیاف‌های فولادی و پلی‌پروپیلن به ترتیب با نسبت‌های ۰٪، ۰،۵٪، ۱٪ و ۰٪، ۰،٤٪ به نمونه‌های بتنی بازیافتی اضافه شد. نمونه‌های بتن الیافی حاوی سنگدانه‌های بازیافتی تحت نیروی فشاری، کشش غیرمستقیم و خمش سه‌نقطه‌ای مورد آزمایش قرار گرفته و عواملی همچون، مقاومت فشاری، مقاومت شکافت کششی، مقاومت خمشی مورد بررسی قرار گرفتند. نتایج نشان می‌دهد که با افزایش درصد جایگزینی سنگدانه بازیافتی مقاومت فشاری کاهش می‌یابد. الیاف پلی‌پروپیلن در افزایش مقاومت فشاری تاثیر مثبتی دارد و ترکیب الیاف پلی‌پروپیلن با ۰،۵ و ۱٪ الیاف فولادی موجب افزایش ٦٨ و ١٦٩ برابر میزان جذب انرژی می‌شود. همچنین بیشینه مقاومت کششی با افزایش درصد جایگزینی سنگدانه بازیافتی کاهش می‌یابد. نتایج آزمایش مقاومت خمشی نشان می‌دهد که الیاف پلی‌پروپیلن در افزایش بارنهایی و جلوگیری از فروپاشی بتن، تاثیر مثبتی دارد و ترکیب این الیاف با الیاف فولادی موجب افزایش شکل‌پذیری می‌شود.

واژگان کلیدی: الیاف فولادی، الیاف پلی‌پروپیلن، بتن بازیافتی، بتن الیافی، مقاومت فشاری.

۱- مقدمه

امروزه بتن به دلیل ویژگی‌هایی همچون مقاومت فشاری بالا، دوام مناسب و همچنین فرم‌پذیری بالا به عنوان یکی از پرمصرف‌ترین مصالح ساختمانی، در جهان شناخته شده است. در مقابل دارای معایبی همچون مقاومت کششی پایین و وزن مخصوص بالا است [1]. در بیشتر کشورهای در حال توسعه، بهبود زیرساخت‌ها و بازسازی ساختمان‌های قدیمی، موجب تولید مقدار زیادی زباله ساختمانی شده است [2]. در کشورهای اروپایی سالانه بیش از ۵۱۰ میلیون تن ضایعات ساختمانی تولید می‌شود، این مقدار در کشورهایی همچون آمریکا، ژاپن، هند به ترتیب برابر با ۳۲۵، ۷۷ و ۵۳۰ میلیون تن

است [3, 4]. به همین دلیل نیاز به بازیافت بیشتر در سراسر جهان به دلیل رشد جمعیت، نیاز مستمر به ساخت خانه‌های جدید و درنهایت تقاضا برای مواد اولیه افزایش یافته است. افزایش آگاهی از اهمیت مدیریت پسماند، به ویژه در صنعت ساختمان‌سازی بسیار مورد توجه جهان قرار گرفته است [5].

علاوه بر آن بلایایی از جمله جنگ، سیل و زلزله، مانند آنچه در کرمانشاه رخ داد، مقدار زیادی ساختمان‌های ویران‌شده و زباله‌های ساختمانی برجای می‌گذارد که انتقال این مقدار از زباله‌های ساختمانی به محل دفن زباله، علاوه بر هزینه نگهداری بالا و تجزیه‌پذیری پایین، موجب تولید مقدار زیادی دی اکسید کربن می‌شود [6].

کارونیز و همکاران با ترکیب مقدار ۰٫۷۵٪ الیاف فولادی و ۲۵٪ از سنگدانه‌های بازیافتی دریافتند که اضافه‌کردن الیاف فولادی در بتن بازیافتی می‌تواند باعث جلوگیری از فروپاشی بتن شود و مقاومت مکانیکی بتن بازیافتی را نیز افزایش دهد[7]. تحقیقات کانگ و همکارانش نشان می‌دهد که مقاومت کششی بتن بازیافتی و بتن معمولی اختلاف زیادی ندارد[8]. پژوهش‌های کاتالمیس و همکارانش نشان می‌دهد که وجود الیاف پلی‌پروپیلن در بتن‌های بازیافتی تأثیر خاصی بر مقاومت فشاری بتن ندارد. اما اضافه کردن الیاف پلی‌پروپیلن به بتن باعث افزایش قابل توجه مقاومت بتن در کشش و خمش می‌شود. اضافه کردن الیاف پلی‌پروپیلن به بتن‌های بازیافتی باعث ناهمگن‌تر شدن بتن می‌شود. همچنین با افزایش میزان استفاده از این الیاف، کارایی و امکان قالب‌ریزی بتن کاهش می‌یابد [9]. آقای جلیلفر و همکاران با ترکیب ٤ نوع مقدار ۰، ۰٫۵، ۱، ۱٫۵ درصد الیاف فولادی و جایگزینی ۰، ۳۰، ۵۰، ۱۰۰ درصد سنگدانه بازیافتی به بررسی مقاومت مکانیکی و یافتن درصد بهینه جایگزینی سنگدانه بازیافتی پرداختند، آنها نشان دادند که با افزایش درصد جایگزینی سنگدانه بازیافتی، به دلیل افزایش خلل و فرج، مقاومت فشاری بتن کاهش می‌یابد[10].

حفاظت از محیط زیست و منابع اولیه، کمبود محل دپو و دفع ضایعات ساختمانی و بالا بودن هزینه نگهداری ضایعات ساختمانی از فاکتورهای مهم، برای افزایش توجه کشورهای جهان در استفاده از ضایعات بتنی به عنوان مصالح مورد استفاده در تولید بتن است [11].

از این رو موضوع بازیافت ضایعات بتن از دیدگاه زیست‌محیطی امری مهم و ضروری محسوب می‌شود. و با توجه به مشکلات مذکور و ضرورت استفاده از بتن بازیافتی، مطالعه بر تغییرات خواص این ماده مصرفی با استفاده از انواع الیاف و جایگزینی سنگدانه‌های بازیافتی نیز ضروری خواهد بود.

۲- روش انجام تحقیق

باتوجه به درصدهای بهینه الیاف فولادی و پلی‌پروپیلن [12, 13] در این پژوهش، در مجموع ۳٦ نمونه فشاری استوانه‌ای، ۳٦ نمونه کشش غیرمستقیم استوانه‌ای با ابعاد ۲۰ ×۱۰ سانتی‌متر و ۳٦ نمونه خمشی با ابعاد ۱۰×۱۰×۳۵ سانتی‌متر مورد آزمایش قرار گرفت. سنگدانه‌های بازیافتی (درشت‌دانه) با نسبت ۰، ۲۵ و ۵۰٪ (نسبت وزنی)، جایگزین مصالح طبیعی (درشت‌دانه) شد. با استفاده از نسبت‌های۰، ۲۵ و ۵۰ درصد جایگزینی سنگدانه بازیافتی در بتن و همچنین افزودن و ترکیب الیاف‌های فولادی و پلی‌پروپیلن ب iترتیب با نسبت‌های ۰٪، ۰٫۵٪، ۱٪ و ۰٪، ۰٫٤٪ به بررسی رفتار فشاری، شکافت کششی و خمشی نمونه‌های بتنی پرداخته شده است. آزمایش مقاومت خمشی بتن به صورت غیر مستقیم مقاومت کششی بتن را ارزیابی می کند. این آزمایش هم به صورت سه نقطه‌ای و هم به صورت چهار نقطه‌ای انجام می‌گیرد. مطابق با ASTM C1609، طول نمونه‌های خمشی باید پنجاه میلی‌متر بیشتر از سه برابر ارتفاع نمونه خمشی بوده یا حداقل برابر با ۳۵۰ میلی‌متر باشد. همچنین ارتفاع و عرض نمونه‌های خمشی باید بیش از سه برابر بیشینه الیاف مصرفی باشد [14]. در این پژوهش با استفاده از سنگدانه بازیافتی سعی بر آن شده گامی کوچک در راستای کاهش هزینه ساخت بتن برداشته شود، نوآوری این پژوهش می‌توان به ساخت بتن بازیافتی در کشور ایران نام برد و استفاده از الیاف‌های مختلف برای جلوگیری از کاهش مقاومت و میزان جذب انرژی است. قبل از تشریح جزئیات مراحل انجام

پژوهش، مشخصات مصالح مصرفی در ساخت طرح اختلاط-های مختلف بتن ارائه شده است.

۳- مشخصات مصالح مصرفی

در این پژوهش، مصالح مصرفی طرح اختلاط بتن شامل آب، سیمان، سنگدانه‌های بازیافتی، سنگدانه شکسته طبیعی، الیاف فولادی و الیاف پلی‌پروپیلن است، که مشخصات کلی آن‌ها به شرح زیر است:

۳-۱- سیمان

سیمان مصرفی برای ساخت بتن الیافی حاوی سنگدانه‌های بازیافتی، سیمان تیپ دو شاهرود بوده و مشخصات فیزیکی و شیمیایی سیمان مصرفی مطابق جدول (۱ و ۲) است:

جدول ۱. مشخصات شیمیایی سیمان مصرفی

SiO_2	MgO	CaO	Al_2O_3	Fe_2O_3	So_3
21.11 %	1.37 %	63.63 %	4.48 %	3.91 %	2.58 %

Table 1. Chemical specification of Cement

جدول ۲. مشخصات فیزیکی سیمان مصرفی

Density (g/cm^2)	Specific surface (cm^2/g)	Compressive strength (MPa)
3.1	3155	435

Table 2. Physical specification of cement

۳-۲- سنگدانه مصرفی

در این پژوهش، از سنگدانه‌های طبیعی و بازیافتی به عنوان درشت‌دانه‌های مورد استفاده در ساخت نمونه‌های بتنی حاوی الیاف استفاده شد. همچنین از سنگدانه‌های شکسته آهکی با بیشینه ابعاد ۱۲ میلی‌متر و از نوعی سنگدانه بازیافتی (درشت‌دانه) حاصل از خردکردن نمونه‌های بتنی با مقاومت ۳۵۰ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع با بیشینه ابعاد ۱۲ میلی‌متر استفاده شد. ریزدانه طبیعی از نوع سنگدانه رودخانه‌ای در ساخت نمونه‌های آزمایشگاهی مورد استفاده قرار گرفت. منحنی دانه‌بندی سنگدانه‌های طبیعی و بازیافتی مطابق شکل (۱) است. در شکل (۱)، محدوده درشت‌دانه، ریزدانه و منحنی سنگدانه طبیعی و منحنی سنگدانه بازیافتی نشان داده شده است.

شکل ۱. منحنی دانه‌بندی سنگدانه مصرفی

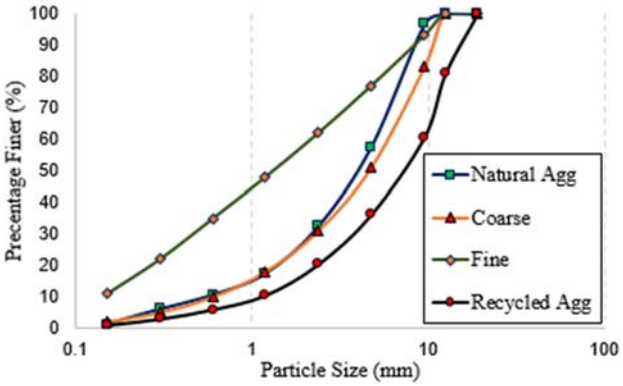


Fig. 1. Grading of aggregates

مشخصات مکانیکی سنگدانه‌های بازیافتی و طبیعی براساس استاندارد ASTM C131 اندازه‌گیری شدند [15]. مطابق جدول ۳، سنگدانه‌های طبیعی چگالی بیشتر و درصد جذب آب کمتری نسبت به سنگدانه‌های بازیافتی دارند. در مقابل درصد جذب آب سنگدانه‌های بازیافتی حدود ۳٫۶٪ بیشتر از سنگدانه‌های طبیعی است.

جدول ۳. مشخصات فیزیکی سنگدانه مصرفی

Type of Agg	water absorption	Density (Kg/m^3)	Abrasion
NCA[1]	0.95%	2611	24.18%
RCA[2]	4.5%	2036	27.54%
NFA[3]	3.3%	2543	-

Table 3. Physical specification of aggregates

۳-۳- آب

آب مصرفی برای ساخت نمونه‌های بتن الیافی حاوی سنگدانه بازیافتی، آب شرب و بدون سختی شهرستان شاهرود با میزان ۴۰ گرم آهک در هر متر مکعب بوده و دارای کیفیت مناسب برای ساخت بتن است.

۳-۴- الیاف مصرفی

الیاف مصرفی در این پژوهش شامل دو نوع الیاف فولادی و پلی‌پروپیلن است که مشخصات فیزیکی و مکانیکی آن‌ها در جدول (۴) نشان داده شده است. همچنین الیاف فولادی مورد استفاده از نوع دو سر قلاب و الیاف پلی‌پروپیلن از نوع ساده

1. Natural Coarse Aggregates
2. Recycled Coarse Aggregates
3. Natural Fine Aggregates

است. شکل (۲ و ۳)، به ترتیب الیاف پلی‌پروپیلن و فولادی را نشان می‌دهد.

شکل ۲. الیاف پلی پروپیلن

Fig. 2. Polypropylene fibers

شکل ۲. الیاف فولادی

Fig. 3. Steel fibers

جدول ٤. مشخصات فیزیکی الیاف های مصرفی

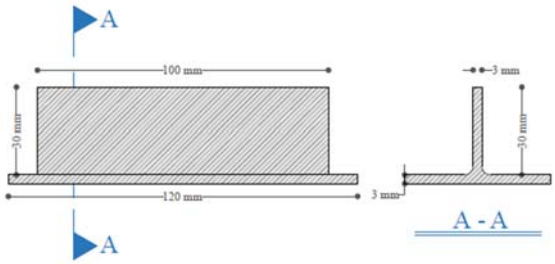
Specification	Polypropylene fiber	Steel fiber
Density (g/cm3)	0.91	7.85
Length (mm)	18	35
Diameter (mm)	0.2	0.8
Aspect Ratio (L/D)	90	43.75

Table 4. Physical specification of fibers

٤- مراحل ساخت و عمل‌آوری نمونه‌های بتنی

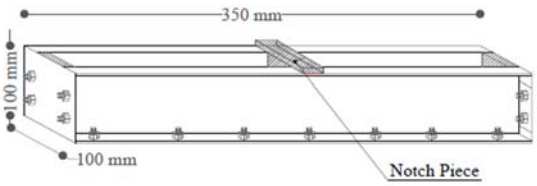
در این پژوهش برای ساخت سنگدانه‌های بازیافتی، ابتدا نمونه‌های بتن مادر با مقاومت ۳۵-٤۰ مگاپاسکال در سنگ-شکن فکی قرار داده و خرد می‌شوند؛ سنگدانه‌های بازیافتی تولیدشده پس از فرایند خرد، دانه‌بندی شده و از شن بازیافتی بدست آمده برای جایگزینی سنگدانه بازیافتی استفاده شده است. برای ساخت نمونه‌های بتن الیافی حاوی سنگدانه بازیافتی، ابتدا مصالح درشت‌دانه و ریزدانه درون میکسر استوانه‌ای به مدت دو دقیقه مخلوط می‌شود. سپس سیمان را به آرامی به مخلوط اضافه نموده و به مدت دو الی سه دقیقه مخلوط می‌شود. مقدار آب موجود را به دو قسمت تقسیم کرده و نیمه اول آن را به آرامی به مخلوط اضافه می‌کنیم و به مدت یک دقیقه مخلوط می‌شود. سپس الیاف پلی‌پروپیلن و الیاف فولادی را به آرامی (به صورت دستی) اضافه کرده و نیمه دوم آب را بلافاصله به مخلوط اضافه می‌شود، اختلاط به مدت سه تا پنج دقیقه صورت می‌گیرد. بعد از تخلیه بتن ساخته‌شده، آزمایش اسلامپ صورت می‌گیرد، مقدار اسلامپ بتن تازه برابر با ۱۵ سانتی‌متر است. دمای بتن تازه بین ۲٦ تا ۲۸ درجه سیلسیوس است. برای ساخت نمونه‌های فشاری و کششی از قالب‌های استوانه‌ای با ابعاد ۱۰ × ۲۰ سانتی‌متر و برای ساخت نمونه‌های خمشی از قالب‌هایی با ابعاد ۱۰ × ۱۰ × ۳۵ سانتی‌متر استفاده شد. برای ایجاد شکاف در نمونه‌های خمشی از تیغه شیاری با ارتفاع ۳۰ میلی‌متر و ضخامت ۳ میلی‌متر استفاده شد. جزییات تیغه شیاری در شکل (٤) نشان داده شده است.

شکل ٤. الف-جزییات ابعاد قطعه شیاری؛ جهت ایجاد شکاف در نمونه‌های خمشی، ب- جزئیات ابعاد قالب نمونه‌های خمشی



4 Notch Piece

شکل ٤- الف



شکل ۳-ب

Fig. 4. A. Detail of dimension notch, B- Details of flexural mold dimensions

در جدول (۵)، مشخصات طرح اختلاط بتن شاهد (R0)، بتن حاوی ۲۵٪ سنگدانه بازیافتی (R25) و بتن حاوی ۵۰٪ سنگدانه بازیافتی (R50) مشخص شده است. در این مقاله R سنگدانه بازیافتی، S الیاف فولادی، P الیاف پلی‌پروپیلن است. برای نمونه نماد R50-P4-S1، نشان‌دهنده بتن حاوی ۵۰٪ سنگدانه بازیافتی، ۰,٤٪ الیاف پلی‌پروپیلن و ۱٪ الیاف فولادی است.

جدول ۵. طرح اختلاط بتن حاوی سنگدانه بازیافتی

Mix Design	Water (Kg/m^3)	Cement (Kg/m^3)	W/C	NFA (Kg/m^3)	NCA (Kg/m^3)
R0	185	400	0.43	794	530
R25	189	400	0.43	794	530
R50	193	400	0.43	794	530

Table 5- Mix design of recycled aggregates

R0: نمونه‌های معمولی، R25: نمونه‌های با ۲۵٪ سنگدانه بازیافتی، R50: نمونه‌های با ۵۰٪ سنگدانه بازیافتی

۵- تفسیر نتایج

۵-۱- وزن مخصوص بتن تازه

وزن مخصوص بتن تازه بعنوان یکی از پارامترهای مهم، برای کنترل صحت طرح اختلاط و یکنواختی بتن مورد بررسی قرار می‌گیرد. با توجه به اینکه وزن مخصوص بتن‌های الیافی تا ۲٪ حجمی مشابه وزن مخصوص بتن معمولی است [۱۶]. مطابق با استاندارد ASTM C138، برای محاسبه وزن مخصوص بتن تازه می‌توان از رابطه ۱ استفاده کرد [۱۷].

$$T = \frac{M}{V} \qquad (۱)$$

T وزن مخصوص، M جرم اندازه‌گیری‌شده بتن و V حجم اندازه‌گیری شده نمونه بتنی الیافی حاوی سنگدانه‌های بازیافتی است. تاثیر درصدهای جایگزینی سنگدانه‌های بازیافتی بر وزن مخصوص بتن در شکل ٦ نشان داده شده است، باتوجه به شکل ۵، افزایش درصد جایگزینی سنگدانه‌های بازیافتی موجب افزایش خلل و فرج در بتن می‌شود که این افزایش، کاهش وزن مخصوص بتن بازیافتی به دنبال دارد.

شکل ۵. نمودار وزن مخصوص بتن الیافی با درصدهای مختلف سنگدانه بازیافتی

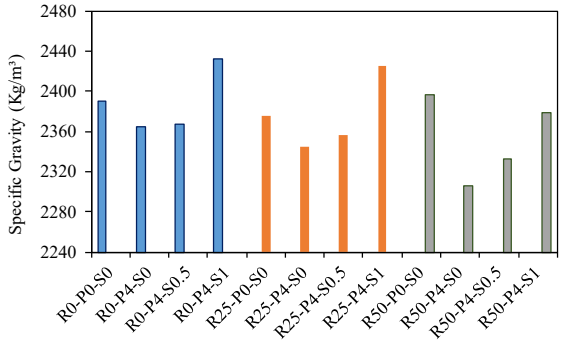


Fig. 5.Specific gravity of fiber reinforced concrete with different percentages of recycled aggregate

شکل (۵) نشان می‌دهد، افزایش ترکیب ۱٪ الیاف فولادی با الیاف پلی‌پروپیلن بدون حضور سنگدانه بازیافتی در افزایش وزن مخصوص بتن نسبت به الیاف پلی‌پروپیلن (به تنهایی) تاثیر بیشتری دارد. شکل (۵) نشان می‌دهد با افزایش ۲۵ و ۵۰ درصد جایگزینی سنگدانه بازیافتی، بترتیب ۰,۸ و ۲,۵ درصد از وزن مخصوص بتن کاهش می‌یابد. یکی از دلایل اصلی کاهش وزن مخصوص ناشی از افزایش جایگزینی سنگدانه بازیافتی، افزایش خلل فرج است.

۵-۲- بررسی رفتار مکانیکی بتن الیافی حاوی سنگدانه‌های بازیافتی

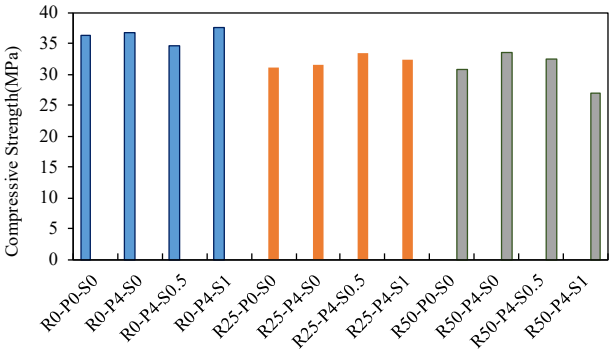
در این بخش، به بررسی رفتار مکانیکی بتن الیافی حاوی سنگدانه‌های بازیافتی از جمله مقاومت فشاری، مقاومت شکافت کششی، مقاومت خمشی پرداخته می‌شود.

۵-۳- جزییات مقاومت فشاری بتن الیافی حاوی سنگدانه‌های بازیافتی

مقاومت فشاری یکی از مهمترین پارامترهای سنجش رفتار بتن است. از گذشته تاکنون دانشمندان زیادی با اضافه‌کردن افزودنی‌ها و الیاف‌های مختلف موجب بهبود مقاومت فشاری بتن شده‌اند. در این پژوهش با ترکیب الیاف فولادی و پلی‌پروپیلن در بتن حاوی سنگدانه‌های بازیافتی به بررسی مقاومت فشاری بتن پرداخته می‌شود. مطابق شکل (٦)، با افزایش درصد

جایگزینی سنگدانه‌های بازیافتی مقاومت فشاری کاهش می‌یابد به طوری که با افزایش ۲۵ و ۵۰ درصد جایگزینی سنگدانه‌های بازیافتی به ترتیب ۱٤,۵٪ و ۱۵,۱۳٪ مقاومت فشاری کاهش می‌یابد. همچنین با استفاده از ۰,٤٪ الیاف پلی‌پروپیلن، مقاومت فشاری در حدود ۲٪ افزایش می‌یابد. در این راستا با ترکیب الیاف پلی‌پروپیلن و ۰,۵٪ الیاف فولادی، مقاومت فشاری ٤٪ افزایش می‌یابد. همانگونه که در شکل (٦)، نشان داده شده است، استفاده از ۱٪ الیاف فولادی به دلیل پدیده گلوله شدن (بالینگ) باعث کاهش مقاومت فشاری می‌شود. باتوجه به استاندارد ASTM C39، ترک‌های عمودی ایجادشده از یک طرف نشان‌دهنده یک الگوی شکست قابل قبول تحت نیروی فشاری است. شکل (۷)، جزییات الگوی شکست نمونه‌های استوانه فشاری را نشان می‌دهد.

شکل ٦. نمودار مقاومت فشاری نمونه‌های بتن الیافی حاوی سنگدانه بازیافتی



aggregate

Fig. 6. Compressive strength of fiber reinforced concrete with different percentages of recycled

شکل ۷. شمای گسیختگی نمونه‌های فشاری

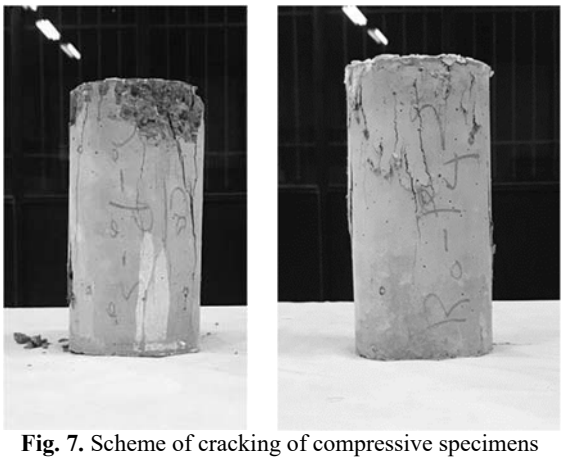
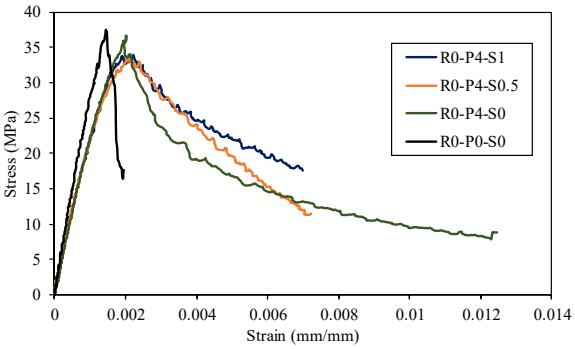


Fig. 7. Scheme of cracking of compressive specimens

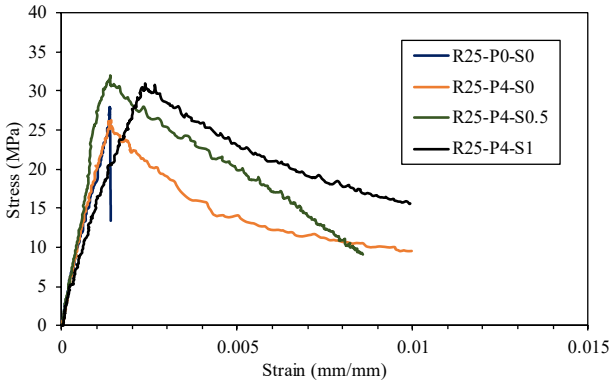
منحنی‌های تنش-کرنش نمونه‌های فشاری بتن الیافی با و بدون سنگدانه بازیافتی در شکل (۸) نشان داده شده است. مطابق شکل (۸- الف)، با افزودن ۰,٤٪ الیاف پلی‌پروپیلن به نمونه‌های فشاری، مقاومت فشاری تنها ۱,۵٪ نسبت به نمونه شاهد افزایش می‌یابد. ترکیب ۰,٤٪ الیاف پلی‌پروپیلن با ۰,۵٪ و ۱٪ الیاف فولادی به ترتیب موجب کاهش ٤٪ و افزایش ۳,٦۱٪ مقاومت فشاری می‌شود. همچنین کرنش نمونه‌های فشاری حاوی الیاف ۲,۵ برابر نمونه‌های بدون الیاف است.

مطابق با شکل(۸- ب و ج)، با افزودن ۰,٤٪ الیاف پلی‌پروپیلن به نمونه‌های فشاری، مقاومت فشاری نسبت به نمونه ۲۵٪ و ۵۰٪ سنگدانه بازیافتی فاقد الیاف تغییر چندانی حاصل نشد. بررسی‌ها نشان می‌دهد، افزودن الیاف‌ها تاثیر چندانی بر بهبود مقاومت فشاری نمونه‌های حاوی ۰٪، ۲۵٪، ۵۰٪ سنگدانه بازیافتی ندارند و الیاف‌ها موجب افزایش ناحیه بعد از ترک‌خوردگی می‌شوند. همچنین جایگزینی ۲۵٪ و ۵۰٪ سنگدانه بازیافتی به طور متوسط موجب کاهش ۱۰,۸٪ و ۱۳,۱۷٪ مقاومت فشاری می‌شود. ترکیب ۰,٤٪ الیاف پلی‌پروپیلن با ۰,۵٪ و ۱٪ الیاف فولادی به ترتیب موجب افزایش ٦,٦۹٪ و ٦,۸۳٪ مقاومت فشاری در نمونه‌های حاوی ۲۵٪ سنگدانه بازیافتی و به ترتیب موجب افزایش ٤,۷۷٪ و کاهش ٤۲٪ مقاومت فشاری در نمونه‌های حاوی ۵۰٪ سنگدانه بازیافتی می‌شود.

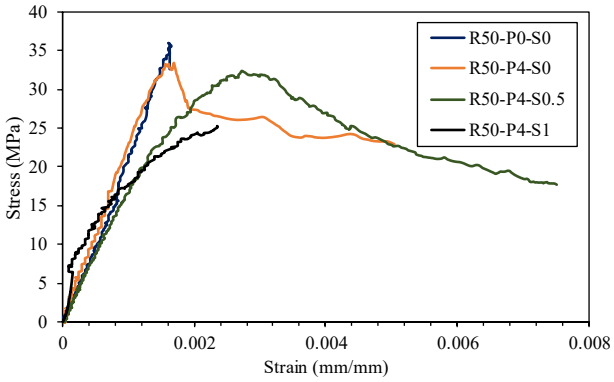
شکل ۸. جزییات منحنی تنش-کرنش نمونه‌های فشاری، الف-منحنی تنش- کرنش بتن بدون سنگدانه بازیافتی،ب- منحنی تنش- کرنش بتن حاوی ۲۵٪ سنگدانه بازیافتی، ج- منحنی تنش- کرنش بتن حاوی ۵۰٪ سنگدانه بازیافتی



شکل ۸- الف



شکل ۸-ب



شکل ۸-ج

Fig. 8. Details of stress-strain curve of compressive specimens, A - stress-strain curve of concrete without recycled aggregate, B- stress-strain curve of concrete containing 25% recycled aggregate, C- stress-strain curve of concrete containing 50% recycled aggregate

۵-٤- جزییات مقاومت شکافت کششی (کشش برزیلی) بتن الیافی حاوی سنگدانه‌های بازیافتی

مقاومت کششی بتن، یکی از مهمترین پارامترهایی است که بر میزان ترک‌خوردگی بتن موثر است. در شکل (۹)، با افزایش درصد جایگزینی سنگدانه‌های بازیافتی مقاومت کششی کاهش می‌یابد به طوری که با افزایش ۲۵ و ۵۰ درصد جایگزینی سنگدانه‌های بازیافتی به ترتیب ۳٪ و ۱۳٪ مقاومت شکافت کششی (کشش برزیلی) نسبت به نمونه‌های شاهد کاهش می‌یابد.

همچنین با افزودن ۰,٤٪ الیاف پلی‌پروپیلن، مقاومت کششی در حدود ٤٪ افزایش می‌یابد. ترکیب الیاف پلی‌پروپیلن با ۰,۵٪ الیاف فولادی تغییر چندانی در مقاومت شکافت کششی نسبت به نمونه‌های حاوی ۰,٤٪ الیاف پلی‌پروپیلن ایجاد نکرده است، اما ترکیب الیاف پلی‌پروپیلن با ۱٪ الیاف فولادی موجب افزایش ۲۵٪ مقاومت شکافت کششی نسبت به نمونه‌های حاوی ۰,٤٪ الیاف پلی‌پروپیلن شده است. جزئیات آزمایش مقاومت کششی غیرمستقیم در شکل (۱۰) نشان داده شده است.

شکل ۹.نمودار مقاومت شکافت کششی نمونه‌های بتن الیافی حاوی سنگدانه بازیافتی

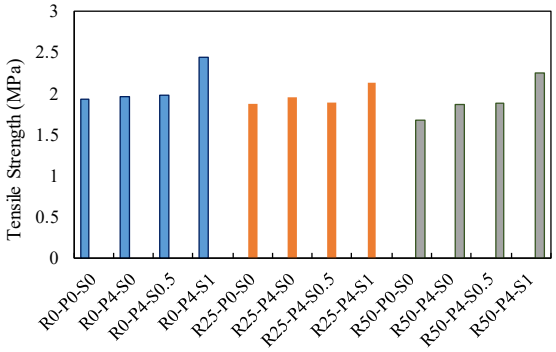
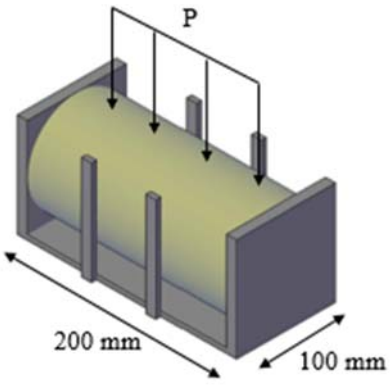


Fig. 92. Compressive strength of fiber reinforced concrete with different percentages of recycled aggregate

شکل ۱۰- الف-جزییات آزمایش مقاومت شکافت کششی، ب- جزئیات ابعاد نمونه‌های استوانه‌ای برای آزمایش شکافت کششی

شکل ۱۰- الف



شکل ۱۰-ب

Fig. 10- A- Details of splitting tensile strength test, B- Details of dimensions of cylindrical specimens for splitting tensile strength test

۵-۵- جزییات آزمایش خمش سه‌نقطه‌ای بتن الیافی حاوی سنگدانه‌های بازیافتی

نمونه‌های خمشی با ابعاد ۳۵۰×۱۰۰×۱۰۰ میلی‌متر مطابق با استاندارد ASTM C1609 با هدف بررسی رفتار مکانیکی بتن الیافی حاوی سنگدانه‌های بازیافتی تحت بارگذاری خمش سه نقطه قرار گرفته شد. یک شیار با عمق و ضخامت به ترتیب ۳۰ و ۳ میلی‌متر در وسط دهانه ایجاد شد. هدف از ایجاد این شیار، جلوگیری از تشکیل ترک‌خوردگی در ناحیه کششی تیر بود. نمونه‌های خمشی با سرعت ۰٫۰۷۵ میلی‌متر بر دقیقه، تا محدوده $L/150$ (۲ میلی‌متر) تحت بارگذاری قرار گرفت. در این پژوهش مطابق با شکل (۱۱)، طول موثر نمونه L، مقدار بارنهایی اول P_1، بارنهایی P_p و بارهای P_{600}^D، P_{150}^D به ترتیب بارهای متناظر با تغییرمکان های $L/600$ و $L/150$ در جدول (۵) ارائه شده است.

شکل ۱۱. منحنی نیرو-تغییرمکان [۱۴]

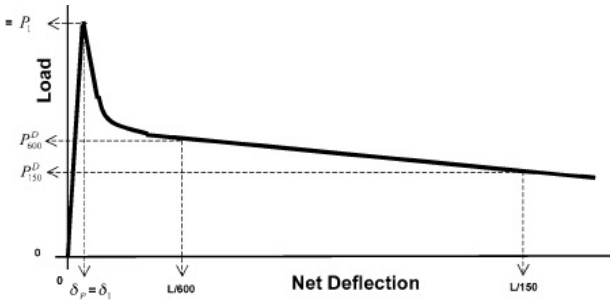


Fig. 11. Load- Displacement curve [14]

شکل ۱۲. جزییات منحنی نیرو-تغییرمکان مطابق با ASTM C1609

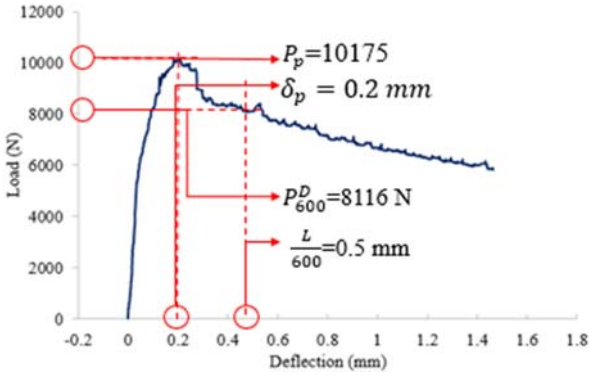


Fig. 12. Detail of load-displacement curve according to ASTM C1609

همان‌گونه که در جدول (٦) نشان داده شده است، الیاف پلی‌پروپیلن به تنهایی تاثیر چندانی در افزایش بار نهایی در نمونه‌های خمشی نداشته است، اما ترکیب الیاف پلی‌پروپیلن با ۰٫۵ و ۱٪ الیاف فولادی به ترتیب موجب افزایش ۳۰٪ و ۱۲۷٪ بار نهایی در نمونه‌های بتنی بدون سنگدانه بازیافتی شده است. همچنین ترکیب الیاف پلی‌پروپیلن با ۰٫۵ و ۱٪ الیاف فولادی به ترتیب موجب افزایش ۲۰٪ و ۹۵٪ بار نهایی در ۲۵٪ جایگزینی سنگدانه‌های بازیافتی و افزایش ۱۹٪ و ۲۱٪ بارنهایی در ۵۰٪ جایگزینی سنگدانه بازیافتی شده است. افزایش درصد جایگزینی سنگدانه بازیافتی در کاهش میزان بار نهایی تاثیر منفی گذاشته و موجب کاهش بار نهایی در نمونه‌های خمشی شده است. جزئیات تغییرمکان سنج در نمونه شیاردار در شکل (۱۳) نشان داده شده است.

شکل ۱۳. جزئیات نمونه‌های خمشی و تغییرمکان سنج

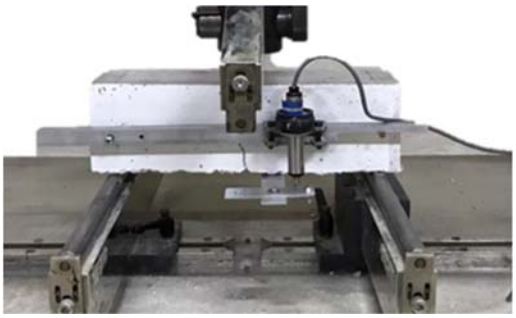


Fig. 13. Detail of Flexural specimens and LVDT[5]

جدول ٦. مقاومت خمشی بتن الیافی حاوی سنگدانه‌های بازیافتی

Specimen	P_1 (N)	P_p(N)	P_{600}^D(N)
R0-P0-S0	4478	4478	0
R0-P4-S0	4200	4200	518.51
R0-P4-S0.5	5591	5773	5422
R0-P4-S1	10175	10175	8116
R25-P0-S0	4163	4163	0
R25-P4-S0	3900	4205	2193
R25-P4-S0.5	4990	5022	4773
R25-P4-S1	7900	8144	7390
R50-P0-S0	4701	4701	0
R50-P4-S0	4537	4537	1438
R50-P4-S0.5	5630	5630	3778
R50-P4-S1	5680	5724	0

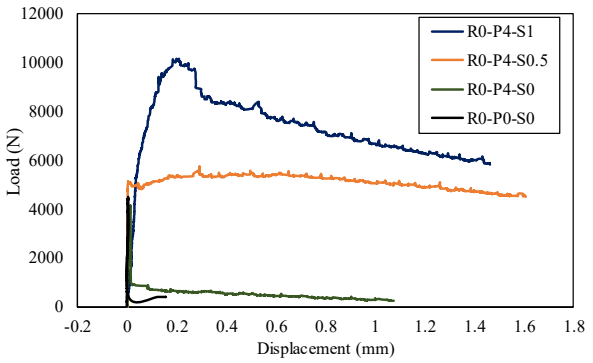
Table 6. Flexural strength of fiber reinforced concrete containing recycled aggregates

5. Linear Variable Differential Transformer

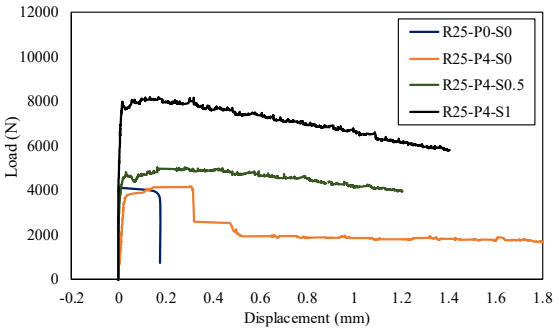
در شکل (۱۴– الف)، افزایش درصد الیاف پلی‌پروپیلن تاثیر چندانی در افزایش بیشینه بارنهایی نداشته و با افزودن الیاف فولادی، مقدار تغییرشکل در ناحیه بعد از ترک خوردگی و میزان جذب انرژی افزایش می‌یابد، با افزودن ۰٫۴٪ الیاف پلی‌پروپیلن به نمونه‌های خمشی، بیشینه بارنهایی نسبت به نمونه شاهد ۶٫۲٪ کاهش یافته است. ترکیب ۰٫۴٪ الیاف پلی‌پروپیلن با ۰٫۵٪ و ۱٪ الیاف فولادی بترتیب موجب افزایش ۲۰٫۶٪ و ۹۵٫۶٪ بیشینه بار نهایی می‌شود. با افزودن ۰٫۴٪ الیاف پلی‌پروپیلن به نمونه‌های خمشی، میزان جذب انرژی نسبت به نمونه بدون الیاف خود ۱۴٫۴۹ برابر افزایش می‌یابد؛ ترکیب ۰٫۴٪ الیاف پلی‌پروپیلن با ۰٫۵٪ و ۱٪ الیاف فولادی نسبت به نمونه‌های بدون الیاف خود به ترتیب افزایش ۴۱٫۳ و ۹۴٫۸ برابر افزایش می‌یابد.

بررسی‌ها نشان می‌دهد، الیاف پلی‌پروپیلن تاثیر چندانی در بهبود بیشینه بارنهایی نداشته و در افزایش ناحیه بعد از ترک‌خوردگی میزان جذب انرژی تاثیر مثبتی دارد، به علاوه از فروپاشی بتن جلوگیری می‌کند. الیاف فولادی در بهبود ناحیه بعد از ترک‌خوردگی و افزایش میزان جذب انرژی تاثیر زیادی داشته و در ترکیب با الیاف پلی‌پروپیلن در افزایش ناحیه بعد از ترک‌خوردگی و بیشینه بارنهایی تاثیر چشمگیری دارد.

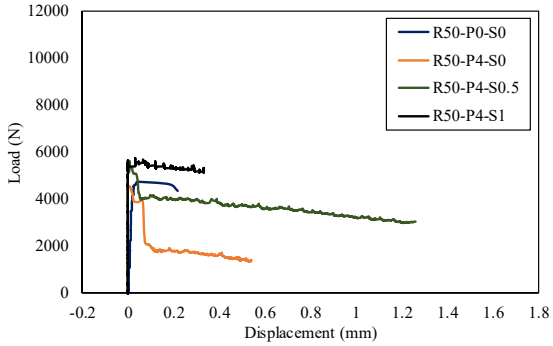
شکل ۱۴. منحنی نیرو–تغییرمکان بتن الیافی، الف– نمونه‌های بدون سنگدانه بازیافتی، ب– نمونه‌های حاوی ۲۵٪ سنگدانه بازیافتی، ج– نمونه‌های حاوی ۵۰٪ سنگدانه بازیافتی



شکل ۱۴–الف



شکل ۱۴–ب



شکل ۱۴–ج

Fig. 14.Details of Load-Displacement curve of compressive specimens, A – Specimens without recycled aggregate, B- Specimens containing 25% recycled aggregate, C- Specimens containing 50% recycled aggregate

در شکل (۱۴–ب و ج)، با افزودن ۰٫۴٪ الیاف پلی‌پروپیلن، بیشینه بارنهایی و میزان جذب انرژی نسبت به نمونه بدون الیاف خود به ترتیب ۱٪ و ۵٫۲ برابر در نمونه‌های خمشی حاوی ۲۵٪ جایگزینی افزایش یافته و در نمونه‌های خمشی حاوی ۵۰٪ جایگزینی بیشینه بارنهایی و میزان جذب انرژی نسبت به نمونه بدون الیاف خود بترتیب ۳٫۴٪ و ۴۷٫۷٪ افزایش یافته است. ترکیب ۰٫۴٪ الیاف پلی‌پروپیلن با ۰٫۵٪ و ۱٪ الیاف فولادی به ترتیب موجب افزایش ۲۸٫۹٪ و ۱۲۷٪ بیشینه بار نهایی در نمونه‌های حاوی ۲۵٪ جایگزینی و موجب افزایش ۳٫۹ و ۱٫۵ برابر می شود. همچنین افزایش ۲۵٪ و ۵۰٪ جایگزینی سنگدانه بازیافتی به طور متوسط موجب کاهش ۱۳٫۳٪ و ۴٪ افزایش بیشینه بار نهایی نسبت به نمونه‌های بدون سنگدانه‌های بازیافتی می شود. بررسی‌ها نشان می‌دهد مقاومت بالای بتن مادر می‌تواند در عدم افت بیشینه بارنهایی در نمونه‌های حاوی ۵۰٪ سنگدانه بازیافتی موثر باشد.

الیاف پلی‌پروپیلن تاثیر چندانی در بهبود بیشـــینه بارنهایی نداشته و در افزایش ناحیه بعد از ترک‌خوردگی و میزان جذب انرژی تاثیر مثبتی دارد، به علاوه از فروپاشی بتن نیز جلوگیری می‌کند. الیاف فولادی در بهبود ناحیه بعد از ترک‌خوردگی و افزایش میزان جذب انرژی تاثیر زیادی داشـــته و در ترکیب با الیاف پلی‌پروپیلن در افزایش ناحیه بعد از ترک‌خوردگی و بیشینه بارنهایی تاثیر چشمگیری دارد. همچنین افزایش درصد جایگزینی ســـنگدانه بازیافتی موجب کاهش بیشـــینه بارنهایی می‌شـــود. شـــکل (۱۵)، جزییات الگوی شـــکســـت نمونه‌های خمشی را نشان می‌دهد.

شکل ۱۵. الگوی شکست نمونه‌های خمشی

Fig. 15. Schematic of cracking of flexural specimens

٦- نتیجه‌گیری

- افزایش درصد تخلخل در بتن بازیافتی متاثر از افزایش درصد جایگزینی سنگدانه‌های بازیافتی بوده و موجب کاهش وزن مخصوص بتن می‌شود. افزایش ترکیب ۱٪ الیاف فولادی با الیاف پلی‌پروپیلن بدون حضور سنگدانه بازیافتی در افزایش وزن مخصوص بتن نسبت به الیاف پلی‌پروپیلن (به تنهایی) تاثیر بیشتری دارد. با افزایش ۲۵ و ۵۰ درصد جایگزینی سنگدانه بازیافتی، بترتیب ۰٫۸ و ۲٫۵ درصد از وزن مخصوص بتن کاهش می‌یابد.
- نتایج آزمایش لس‌آنجلس بر سنگدانه‌های بازیافتی و طبیعی نشان می‌دهد که مقاومت در برابر سایش و ضربه سنگدانه‌های بازیافتی، نسبت به سنگدانه‌های طبیعی در حدود ۳٪ کمتر است.
- با افزایش ۲۵ و ۵۰ درصد جایگزینی سنگدانه‌های بازیافتی به ترتیب ۱٤٫۵٪ و ۱۵٫۱۳٪ مقاومت فشاری کاهش می‌یابد. علت کاهش مقاومت فشاری ناشی از افزایش جایگزینی می‌توان به افزایش میزان خلل و فرج و ضعف ناحیه انتقال اشاره کرد. همچنین با استفاده از ۰٫٤٪ الیاف پلی‌پروپیلن، در مقاومت فشاری تغییری حاصل نشد. در این راستا با ترکیب الیاف پلی‌پروپیلن و ۰٫۵٪ الیاف فولادی، مقاومت فشاری ٤٪ افزایش می‌یابد. نتایج نشان می‌دهد، استفاده از ۱٪ الیاف فولادی به دلیل پدیده گلوله‌شدن باعث کاهش مقاومت فشاری شده است.
- نتایج آزمایش شکاف کششی نشان می‌دهد با افزایش ۲۵ و ۵۰ درصد جایگزینی سنگدانه‌های بازیافتی به ترتیب ۳٪ و ۱۳٪ مقاومت شکافت کششی نسبت به نمونه‌های شاهد کاهش می‌یابد. علت کاهش مقاومت کششی ناشی از افزایش جایگزینی میتوان به افزایش میزان خلل و فرج و ضعف ناحیه انتقال اشاره کرد. با افزودن ۰٫٤٪ الیاف پلی‌پروپیلن، مقاومت کششی به مقدار ناچیزی افزایش می‌یابد. به طورکلی الیاف پلی‌پروپیلن در افزایش مقاومت کششی، فشاری و خمشی تاثیری ندارد. ترکیب الیاف پلی‌پروپیلن با ۰٫۵٪ الیاف فولادی تغییر چندانی نسبت به نمونه‌های حاوی ۰٫٤٪ الیاف پلی‌پروپیلن در مقاومت کششی ایجاد نکرده است، اما ترکیب الیاف پلی‌پروپیلن با ۱٪ الیاف فولادی موجب افزایش ٪۲۵ مقاومت شکافت کششی نسبت به نمونه‌های حاوی ۰٫٤٪ الیاف پلی‌پروپیلن شده است.
- منحنی‌های نیرو- تغییرمکان حاصل از آزمایش خمش سه نقطه‌ای نشان می‌دهد، الیاف پلی‌پروپیلن به تنهایی تاثیر چندانی در افزایش بار نهایی در نمونه‌های خمشی نداشته است، اما ترکیب الیاف پلی‌پروپیلن با ۰٫۵ و ۱٪ الیاف فولادی بترتیب موجب افزایش ۳۰٪ و ۱۲۷٪ بار نهایی در نمونه‌های بتنی بدون سنگدانه بازیافتی شده است. همچنین ترکیب الیاف پلی‌پروپیلن با ۰٫۵ و ۱٪ الیاف فولادی به ترتیب موجب افزایش ۲۰٪ و ۹۵٪ بار نهایی در ۲۵٪ جایگزینی سنگدانه‌های بازیافتی و افزایش ۱۹٪ و ۲۱٪ بارنهایی در ۵۰٪ جایگزینی سنگدانه بازیافتی شده است. بررسی‌ها نشان می‌دهد که افزایش درصد جایگزینی سنگدانه بازیافتی در کاهش میزان بار نهایی و ناحیه بعد از

ترک خوردگی تاثیر منفی گذاشته و موجب کاهش پارامترهای مذکور می‌شود. همچنین الیاف فولادی با ایجاد پدیده پل‌زدگی موجب افزایش ناحیه بعد از ترک خوردگی و بهبود رفتار مکانیکی بتن می‌شود.

۱- مراجع

[1] ACI 318-14, Building Code Requirements for structural Concrete and Commentary, American Concrete Institute, (2014).
[2] V.W. Tam, M. Soomro, A.C.J. Evangelista, A review of recycled aggregate in concrete applications (2000–2017), Construction and Building Materials, 172 (2018) 272-292.
[3] CSI, Cement Sustainability Initiative, Recycling Concrete Report (2015).
[4] S. Mondal, A. Kar, A. Guharay, N. James, Characterization of Building Derived Materials for Ground Improvement of Contaminated Soils, CONSTRUCTION MATERIALS AND SYSTEMS, (2017) 65.
[5] Y.E. Ibrahim, Durability and Structural Performance of Recycled Aggregate Concrete: a Review, (2019).
[6] S. Caijun, L. Yake, Z. Jiake, L. Wengui, C. Linlin, X. Zhaobin, Performance enhancement of recycled concrete aggregate, A Review Journal of Cleaner Production, 112 (2016) 466-472.
[7] J.A. Carneiro, P.R.L. Lima, M.B. Leite, R.D. Toledo Filho, Compressive stress–strain behavior of steel fiber reinforced-recycled aggregate concrete, Cement and concrete composites, 46 (2014) 65-72.
[8] T. Kang, W. Kim, Y.-K. Kwak, S.-G. Hong, The choice of recycled concrete aggregates for flexural members, in: IABSE Congress Report, International Association for Bridge and Structural Engineering, 2012, pp. 726-731.
[9] K.R. Akça, Ö. Çakır, M. İpek, Properties of polypropylene fiber reinforced concrete using recycled aggregates, Construction and Building Materials, 98 (2015) 620-630.
[10] H. Jalilifar, F. Sajedi, S. Kazemi, RETRACTED: Investigation on the Mechanical Properties of Fiber Reinforced Recycled Concrete, Civil Engineering Journal, 2(1) (2016) 13-22.
[11] M. Alves, R. Cremonini, D. Dal Molin, A comparison of mix proportioning methods for high-strength concrete, Cement and Concrete Composites, 26(6) (2004) 613-621.
[12] T.W. Ahmed, Properties of high strength polypropylene fiber concrete containing recycled aggregate, Construction and Building Materials, (2020).
[13] M.A. Mohammad Jamshidi Avanaki, Abdollah Hoseini,Mohammad Sadegh Maerefat1, Stress-Strain Constitutive Material Models for Hybrid Steel Fiber Reinforced Concrete, Journal of Civil Engineering and Construction, (2020).
[14] ASTM C1609, Standard Test Method for Flexural Performance of Fiber-Reinforced Concrete (Using Beam With Third-Point Loading).
[15] (ASTM C131) Standard Test Method for Resistance to Degradation of Small-Size Coarse Aggregate by Abrasion and Impact in the Los Angeles Machine.
[16] (ACI 544.3R-08) Guide for Specifying, Proportioning, and Production of Fiber-Reinforced Concrete.
[17] (ASTM C138) Standard Test Method for Density (Unit Weight), Yield, and Air Content (Gravimetric) of Concrete.

Experimental Evaluation of Mechanical Behavior of Concrete Containing Recycled Aggregates Reinforced with Steel and Polypropylene Fibers

Sina Hosseini[1], Jalil Shafaei[2*], Farshid Jandaghi Alaee[3]

1.MSc Student, Civil Engineering Department, Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran
2.Assistant Professor, Civil Engineering Department, Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran
3.Associate Professor, Civil Engineering Department, Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran

Abstract

Nowadays, the use of recycled concrete has increased significantly for economic and environmental reasons. Increasing the replacement percentages of recycled aggregates change the mechanical properties of concrete. In this research, the mechanical properties of concrete containing recycled aggregates with different percentages of steel fibers and polypropylene fiber has been investigated in the structural laboratory. A total of 36 cylindrical compression specimens. Recycled aggregates (coarse aggregates) in ratios of 25 and 50% (weight ratio) replaced with natural materials (coarse aggregates). Also, steel and polypropylene fibers were added to recycled concrete samples in ratios of 0%, 0.5%, 1% and 0%, 0.4%, respectively. Fiber concrete samples containing recycled aggregates under compressive force, indirect tension and three-point bending are tested and factors such as compressive strength, tensile fracture toughness, modulus of elasticity, flexural strength and fracture energy were investigated. The results show that the increase in porosity in recycled concrete is affected by the increase in the percentage of replacement of recycled aggregates and reduces the specific gravity of concrete. Increasing the composition of 1% steel fibers with polypropylene fibers without the presence of recycled aggregate has a greater effect on increasing the specific gravity of concrete than polypropylene fibers (alone). By increasing 25 and 50% replacement of recycled aggregate, 0.8% and 2.5% of specific gravity of concrete were reduced, respectively. Compressive strength decreases with increasing replacement percentage of recycled aggregate. Increasing the percentage of replacement of recycled aggregate due to poor transmission area reduces the amount of energy absorption. So that by replacing 25% and 50% of recycled aggregate, the energy absorption rate decreases by 21.7% and 26%, respectively, compared to the control samples. Polypropylene fibers have a positive effect on increasing compressive strength and combination of polypropylene fibers with 0.5 and 1% steel fibers increases the energy absorption. Also, increasing the replacement percentage of recycled aggregates reduces the hardness. Maximum tensile strength decreases by 3% and 13% with 25 and 50% increase in replacement of recycled aggregate, respectively. The results of flexural strength test show that increasing the replacement percentage of recycled aggregate has a negative effect on reducing the final load and reduces the final load in flexural specimens. Also, polypropylene fibers have a positive effect on increasing the loads and preventing the collapse of concrete, and combining polypropylene fibers with 0.5 and 1% steel fibers, respectively, increases the final load by 20% and 95% in 25%, replacing recycled aggregates and increasing 19% and 21% of rainfall in 50% recycled aggregate replacement. Increasing the percentage of steel fibers, the amount of deformation in the area after cracking and the amount of energy absorption increases, so that by increasing the amount of steel fibers to 0.5% and 1% by volume of concrete, the amount of energy absorption to 2 and it increases 3 times. The use of polypropylene fibers in the area after cracking has little effect and increases the load capacity.

Keywords :Recycled Concrete, Fiber reinforced Concrete, Steel Fiber, Polypropylene Fibers, Compressive Strength