

Experimental study of mechanical properties of concrete containing natural and recycled aggregates reinforced with steel and PVA fibers

Saeed Bahrami¹, Seyed Amir Hossein Hashemi^{2*}, Ali Delnavaz³, Pourya Rashvand⁴

1- Ph.D. Student, Department of Civil Engineering, Qazvin Branch, Islamic Azad University, Qazvin, Iran.

2- Assistance Professor, Department of Civil Engineering, Qazvin Branch, Islamic Azad University, Qazvin, Iran.

3- Assistance Professor, Department of Civil Engineering, Qazvin Branch, Islamic Azad University, Qazvin, Iran.

4- Assistance Professor, Department of Civil Engineering, Qazvin Branch, Islamic Azad University, Qazvin, Iran.

ABSTRACT

The present study, the laboratory examination of compressive and flexural strengths of concrete samples made with recycled materials, steel fibers, and PVA was done at different ages. The presence of recycled aggregates instead of natural aggregates on the compressive and flexural strengths of non-fiber concrete at the ages of 3, 7, 28, 56, and 90 days was examined. Then, by adding different percentages of steel fibers, PVA including 0.5, 1, 1.5%, and 2 to concrete with natural and recycled materials, we compared their compressive and flexural strengths in the mentioned ages. The results revealed that the compressive and flexural strengths of concrete samples made with natural materials are always higher than recycled materials. Also, comparing the compressive strength of concrete samples with the percentage of different fibers revealed that the highest compressive strength was related to the samples made with natural materials with 0.5% and the lowest compressive strength was related to the concrete samples made with recycled materials with 2% PVA fibers. Additionally, the flexural strength of the samples with PVA fibers is far less than the steel fibers of the same age and the same fiber percentages. By increasing the percentage of steel fibers and PVA from 0.5 to 2%, the flexural strength of the samples also increases. In all ages of concrete, the highest flexural strength is related to concrete samples made with natural materials with 2% steel fibers and the lowest compressive strength is also related to samples made with recycled materials with 0.5% PVA fibers. Higher percentage of steel fibers and PVA in concrete leads to a reduction in the stone materials, and thus, a reduction in the compressive strength of concrete, which is more significant in steel fibers due to the higher density of steel fibers compared to PVA fibers. Also, due to the increase in the elasticity of concrete, its flexural strength increases.

ARTICLE INFO

Receive Date: 09 August 2023

Revise Date: 28 October 2023

Accept Date: 17 November 2023

Keywords:

Concrete
Steel Fibers and PVA
Natural aggregates
Recycled aggregates
Compressive strength
Bending strength

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: <https://doi.org/10.22065/jsce.2023.408376.3176>

*Corresponding author: Seyed Amir Hossein Hashemi.

Email address: hashemi@qiau.ac.ir

مطالعه آزمایشگاهی خواص مکانیکی بتن حاوی سنگدانه های طبیعی و بازیافتی مسلح شده با الیاف فولادی و PVA

سعید بهرامی^۱، سید امیرحسین هاشمی^{۲*}، علی دلنواز^۳، پوریا رشوند^۴

۱- دانشجوی دکتری، گروه مهندسی عمران، واحد قزوین، دانشگاه آزاد اسلامی، قزوین، ایران.

۲- استادیار، گروه مهندسی عمران، واحد قزوین، دانشگاه آزاد اسلامی، قزوین، ایران.

۳- استادیار، گروه مهندسی عمران، واحد قزوین، دانشگاه آزاد اسلامی، قزوین، ایران.

۴- استادیار، گروه مهندسی عمران، واحد قزوین، دانشگاه آزاد اسلامی، قزوین، ایران.

چکیده

این پژوهش به بررسی آزمایشگاهی مقاومت‌های فشاری و خمشی نمونه‌های بتنی ساخته شده با مصالح بازیافتی و الیاف‌های فولادی و PVA در سنین مختلف پرداخته شده است. ابتدا تأثیر وجود سنگدانه‌های بازیافتی به جای سنگدانه‌های طبیعی بر مقاومت فشاری و خمشی بتن بدون الیاف در سنین ۳، ۷، ۲۸، ۵۶ و ۹۰ روزه بررسی می‌گردد؛ سپس با افزودن درصدهای مختلف الیاف‌های فولادی و PVA شامل ۰/۵، ۱، ۱/۵ و ۲ درصد به بتن با مصالح طبیعی و بازیافتی، به مقایسه مقاومت فشاری و خمشی آنها در سنین مذکور پرداخته می‌شود. نتایج نشان داد که مقاومت فشاری و خمشی نمونه‌های بتنی ساخته شده با مصالح طبیعی همواره بیشتر از مصالح بازیافتی است. همچنین با مقایسه مقاومت فشاری نمونه‌های بتنی با درصد الیاف‌های مختلف ملاحظه گردید که بیشترین مقاومت فشاری مربوط به نمونه‌های بتنی ساخته شده با مصالح طبیعی دارای ۰/۵ درصد و کمترین مقاومت فشاری نیز مربوط به نمونه‌های بتنی ساخته شده با مصالح بازیافتی دارای ۲ درصد الیاف PVA است. از سوی دیگر مقاومت خمشی نمونه‌های دارای الیاف PVA به مراتب کمتر از الیاف فولادی در سنین برابر و درصدهای الیاف یکسان می‌باشد با افزایش درصد الیاف‌های فولادی و PVA از ۰/۵ به ۲ درصد، مقاومت خمشی نمونه‌ها نیز افزایش می‌یابد؛ به طوری که در کلیه سنین بتن، بیشترین مقاومت خمشی مربوط به نمونه‌های بتنی ساخته شده با مصالح طبیعی دارای ۲ درصد الیاف فولادی و کمترین مقاومت فشاری نیز مربوط به نمونه‌های بتنی ساخته شده با مصالح بازیافتی دارای ۰/۵ درصد الیاف PVA است. هرچه درصد الیاف‌های فولادی و PVA در بتن بیشتر شود، منجر به کاهش مصالح سنگی و در نتیجه کاهش مقاومت فشاری بتن می‌گردد که به علت چگالی بالاتر الیاف فولادی نسبت به الیاف PVA، این امر در الیاف فولادی مشهودتر است. از سوی دیگر به علت افزایش خاصیت ارتجاعی بتن، مقاومت خمشی آن افزایش می‌یابد.

کلمات کلیدی: بتن، الیاف فولادی و PVA، مصالح طبیعی و بازیافتی، مقاومت فشاری، مقاومت خمشی.

شناسه دیجیتال:		سابقه مقاله:				
doi:	شناسه دیجیتال:	چاپ	انتشار آنلاین	پذیرش	بازنگری	دریافت
	https://doi.org/10.22065/jsce.2023.408376.3176					
	10.22065/jsce.2023.408376.3176	۱۴۰۲/۰۴/۳۱	۱۴۰۲/۰۸/۲۶	۱۴۰۲/۰۸/۲۶	۱۴۰۲/۰۸/۰۶	۱۴۰۲/۰۵/۱۸
سید امیرحسین هاشمی hashemi@qiau.ac.ir			*نویسنده مسئول: پست الکترونیکی:			

۱- مقدمه

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 ترک خوردگی‌های 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. به کار گرفتن الیاف در بتن و تولید بتن الیافی (FRC^۱) این امکان را فراهم آورده است که بتوان بتنی شکل‌پذیر و با قابلیت جذب انرژی بیشتر و نیز بتنی با توسعه‌ی ترک خوردگی کمتر تحت بار و تنش‌های ناشی از انقباض و حرارت، تولید نمود. از مشخصات دیگر بتن الیافی افزایش مقاومت خمشی و به خصوص کنترل توسعه‌ی ترک خوردگی است. در قرن اخیر سرعت رشد تولید ضایعات، به خصوص نخاله‌های ساختمانی یکی از مشکلات اساسی در جوامع است. اگرچه ساخت و ساز از عوامل اصلی توسعه‌ی شهرها و گسترش امکانات است، اما تأثیرات نامطلوبی بر منابع طبیعی و محیط زیست دارد. کمبود مکان‌های انباشتن نخاله‌های ساختمانی، هدر رفتن وقت و انرژی، تولید گرد و خاک و تولید گازهای گلخانه‌ای از جمله پیامدهای منفی نخاله‌های ساختمانی هستند. در بیشتر کشورهای در حال توسعه، بهبود زیرساخت‌ها و بازسازی ساختمان‌های قدیمی، موجب تولید مقدار زیادی زباله ساختمانی شده است [۱]. طبق مطالعات انجام شده، ضایعات جامد شهری در کشورهای توسعه یافته ۳۵ درصد و در کشورهای در حال توسعه ۵۰ درصد از نسبت به کشورهای توسعه‌یافته بسیار بالاتر است. 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. به همین دلیل نیاز به بازیافت بیشتر در سراسر جهان به دلیل رشد جمعیت، نیاز مستمر به ساخت خانه‌های جدید و در نهایت تقاضا برای مواد اولیه افزایش یافته است [۲ - ۳]. افزایش آگاهی از اهمیت مدیریت پسماند، به ویژه در صنعت ساختمان‌سازی بسیار مورد توجه جهان قرار گرفته است [۴]. علاوه بر آن بلایایی از جمله جنگ، سیل و زلزله، مقدار زیادی ساختمان‌های ویران شده و زباله‌های ساختمانی برجای می‌گذارد که انتقال این مقدار از زباله‌های ساختمانی به محل دفن زباله، علاوه بر هزینه نگهداری بالا و تجزیه-پذیری پایین، موجب تولید مقدار زیادی دی اکسید کربن می‌شود [۵]. در کشور ایران ساخت و تخریب نسبت به کشورهای توسعه یافته بسیار بالاتر است. از این رو به کارگیری بتن‌های ضایعاتی که بخش عمده‌ی ضایعات ساختمانی را تشکیل می‌دهند، در ساخت بتن‌های جدید بسیار پراهمیت است. برای این منظور ابتدا باید از خواص و ویژگی‌های سنگدانه‌های بازیافتی بتنی جایگزین (RCA^۲) آگاهی داشت [۶]. مقاومت فشاری بتن بازیافتی تحت تأثیر مقدار RCA و خصوصیات آنها است. نسبت آب به سیمان (W/C^3)، درصد RCA جایگزین سنگدانه‌های طبیعی (NA^4) و میزان چسبندگی ملات خشک شده‌ی RCA از جمله مهمترین عوامل تأثیرگذار بر مقاومت فشاری بتن بازیافتی هستند [۷].

دینگ و کاسترل^۵ [۸] تأثیر الیاف فولادی بر مقاومت فشاری بتن و شاکریت را مورد بررسی قرار دادند. طبق نتایج به دست آمده، افزودن الیاف به صورت دو بعدی در شاکریت و همچنین به صورت سه بعدی در بتن، موجب تقویت و بهبود خواص بتن سخت شده می‌شود. همچنین استفاده از الیاف فولادی در بتن تازه و سخت شده باعث افزایش جذب انرژی و مقاومت خمشی بتن می‌شود. زیائو و همکاران^۶ [۹] به مطالعه‌ی استفاده از درشت‌دانه‌های بازیافتی به میزان ۳۰٪ تا ۱۰۰٪ پرداختند و نتایج نشان داد که تا ۳۰٪ جایگزینی این‌گونه مصالح کاهش مقاومت فشاری بتن ناچیز می‌باشد. پراساد و کومار^۷ [۱۰] از خرده نخاله‌های ساختمانی و خرده بتن به عنوان سنگدانه‌های بازیافتی به میزان ۵۰٪ و ۱۰۰٪ و همچنین از الیاف شیشه‌ای و پلی‌پروپیلن در بتن استفاده کردند. نتایج نشان داد که با

¹ Fiber-reinforced concrete

² Recycled Concrete Aggregate

³ Water-cement ratio

⁴ Natural Aggregate

⁵ Ding and Kusterle

⁶ Xiao et al.

⁷ Prasad and Kumar

افزایش سنگدانه‌های بازیافتی مقاومت بتن کاهش می‌یابد اما با افزودن الیاف کاهش مقاومت جبران می‌شود. همچنین الیاف شیشه‌ای نسبت به الیاف پلی‌پروپیلن عملکرد بهتری از خود نشان داده‌اند. دبایب و کنای^۸ [۱۱] به بررسی جایگزینی خرده آجر به عنوان سنگدانه در بتن پرداختند. کاهش مقاومت فشاری بتن با جایگزینی خرده آجر به عنوان درشت‌دانه، ریزدانه و هر دو به ۳۰٪ و ۴۰٪ در نظر گرفته شده است. جاگاناداها و احمد^۹ [۱۲] بر روی الیاف شیشه‌ای در بتن با سنگدانه‌های بازیافتی انجام شد نتایج مطالعه آنها نشان داد که با افزایش الیاف تا ۰/۰۳٪ حجم بتن، مقاومت‌های فشاری، کششی و خمشی افزایش می‌یابد. ویتلاکیلاوا^{۱۰} [۱۳] از نخاله‌های ساختمانی و خرده بتن به صورت جداگانه به عنوان سنگدانه‌های بازیافتی به میزان ۱۰۰٪ به همراه الیاف پلی‌پروپیلن استفاده کرد. بر طبق گزارش وی سنگدانه‌های بازیافتی از خرده نخاله‌های ساختمانی نسبت به خرده بتن عملکرد بهتری از خود نشان داده‌اند. چوی و یان^{۱۱} [۱۴] نشان دادند که استفاده همزمان از درشت‌دانه و ریزدانه بازیافتی باعث افزایش مقاومت فشاری بتن می‌شود. دلیل این افزایش مقاومت به چسبندگی بالاتر درشت‌دانه‌های بازیافتی و خمیر سیمان نسبت داده شده است. افزایش چسبندگی بین سنگدانه‌های بازیافتی و خمیر سیمان به علت تیز گوشه گی سنگدانه‌ها و ملات چسبیده قدیمی به سطح سنگدانه‌ها می‌باشد. سطح زبر و ناصاف سنگدانه‌ها باعث نفوذ خمیر سیمان به حفرات درشت‌دانه‌های بازیافتی می‌شود که باعث گیرش بهتر خمیر سیمان و سنگدانه می‌شود. تحقیقات کانگ و همکاران^{۱۲} [۱۵] نشان می‌دهد که مقاومت کششی بتن بازیافتی و بتن معمولی اختلاف زیادی ندارد. واگیه و همکاران^{۱۳} [۱۶] به بررسی درشت‌دانه بازیافتی به جای سنگدانه‌های طبیعی پرداختند. میزان کاهش مقاومت فشاری بتن حاوی ۲۵٪، ۵۰٪، ۷۵٪ و ۱۰۰٪ سنگدانه‌های بازیافتی به ترتیب ۴٪، ۱۲٪، ۲۲٪ و ۲۷٪ گزارش شده است. نتایج نشان داد که درصد بهینه درشت‌دانه‌های بازیافتی بین ۲۵٪ تا ۵۰٪ می‌باشد. آوچات و کانه^{۱۴} [۱۷] از خرده بتن به همراه الیاف فولادی و پلیمری در بتن استفاده کردند. بررسی‌ها نشان داد با افزایش الیاف در بتن با سنگدانه‌های بازیافتی مقاومت‌های فشاری و خمشی افزایش می‌یابد. چوی و یون^{۱۵} [۱۸] در مورد تغییرشکل 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 تغییرشکل خمشی بلند مدت بدست 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. در مطالعه کارنیرو و همکاران^{۱۶} [۱۹] در خصوص بررسی جایگزینی مصالح بازیافتی با ترکیب از ۵۵٪ ملات، ۲۰٪ بتن و ۲۵٪ آجر پرداختند. بتن با ۲۵٪ سنگدانه بازیافتی مقاومت بیشتری نسبت به بتن با سنگدانه‌های طبیعی دارد. علت افزایش مقاومت بتن با این سنگدانه‌ها تغییر در خرابی بتن (شکست سنگدانه‌ها) به علت چسبندگی بهتر سنگدانه‌های بازیافتی با خمیر سیمان می‌باشد. گآو و همکاران^{۱۷} [۲۰] عملکرد خمشی بتن بازیافت شده درشت با الیاف را ارزیابی کردند. در این مطالعه، الیاف فولادی با ۰، ۵، ۱، ۱/۵ و ۲ درصد (از نظر حجم) اضافه شدند. علاوه بر این، درشت‌دانه بازیافتی با سنگدانه‌های طبیعی را ۰، ۳۰، ۵۰ و ۱۰۰ درصد (در هر حجم) جایگزین کرد. مقاومت خمشی، چقرمگی و تغییرشکل چشمگیر با افزایش مقدار الیاف فولادی افزایش یافت. آرورا و سینگ^{۱۸} [۲۱] 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 ساخته و آزمایش شدند.

⁸ Debieb and Kenai

⁹ Jagannadha and Ahmed

¹⁰ Vytlačilova

¹¹ Choi and Yun

¹² Kang et al.

¹³ Wagih et al.

¹⁴ Awchat, and Kanhe

¹⁵ Choi and Yun

¹⁶ Carneiro et al.

¹⁷ Guo et al.

¹⁸ Arora et al.

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. آکا و همکاران^{۱۹} [۲۲] 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. جلیل‌فر و همکاران^{۲۰} [۲۳] با ترکیب ۴ نوع مقدار ۰، ۰/۵، ۱ و ۱/۵ درصد الیاف فولادی و جایگزینی ۰، ۳۰، ۵۰ و 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. توشیک و همکاران^{۲۱} [۲۴] 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 آرمتور عرضی برآورد کند. زاتنگ و همکاران^{۲۲} [۲۵] 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 موثرتر بودند. محمد و همکاران^{۲۳} [۲۶] از آجر به عنوان سنگدانه برای تولید نمونه استفاده کردند. ۲۴ نمونه با ابعاد ۲۱۰ × ۲۰ × ۲۵۰ میلی‌متر 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. محمد^{۲۴} [۲۷] رفتار خمشی تیرهای بتن مسلح را که با مواد زاید بازیافت ساخته شده، مورد مطالعه قرار داد. در این مطالعه از ضایعات PET^{۲۵} به عنوان ماده بازیافتی استفاده شد. مقاومت فشاری، حداکثر ظرفیت بار، رفتار تغییرشکل - بار، حالت سختی و خرابی نمونه‌ها مشخص شد. نتایج نشان داد که پسماندهای PET تا ۱۵ درصد می‌توانند به بتن اضافه شوند. سریراپاز و همکاران^{۲۶} [۲۸] 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 ترک خوردگی 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. نعمت‌زاده و ذبیحی^{۲۷} [۲۹] مقاومت فشاری بتن حاوی لاستیک تایر بازیافتی همراه با الیاف فولادی در معرض دماهای بالا بهینه‌سازی نمودند. نتایج پژوهش آنها نشان داد که افزودن الیاف فولادی به حجم بتن و اضافه کردن لاستیک تایر جایگزین ماسه به مخلوط بتن منجر به کاهش مقاومت فشاری نمونه‌های بتنی حرارت دیده و حرارت ندیده می‌شود. همچنین، با افزایش درجه حرارت، مقاومت فشاری کلیه نمونه‌های بتنی با یک افت قابل توجهی روبه‌رو شده است. از این رو، در دمای ۶۰۰ درجه سانتی‌گراد، نرخ افت مقاومت فشاری نمونه‌ها در مقایسه با سایر دماها بیشتر بود به طوری که مقاومت فشاری نمونه مرجع و نمونه‌های بتنی حاوی تایر و الیاف نسبت به مقاومت نمونه متناظر در دمای محیط، با کاهش مقاومت در ۷۶٪ روبرو شدند.

¹⁹ Akça et al.

²⁰ Jalilifar et al.

²¹ Tošić et al.

²² Zaetang et al.

²³ Mohammed et al.

²⁴ Mohammed

²⁵ Polyethylene terephthalate

²⁶ Seara-Paz et al.

²⁷ Nematzadeh and Zabizi

نیو و همکاران^{۲۸} [۳۰] به بررسی آزمایشگاهی خواص مکانیکی بتن بازیافتی مسلح شده با الیاف فولادی و PVA پرداختند. نتایج پژوهش آنها نشان داد در حالتی که الیاف فولادی با بتن ترکیب شد، مقاومت فشاری و مقاومت خمشی بتن بازیافتی به ترتیب ۶ درصد و ۵۵/۲ درصد افزایش و در شرایطی که الیاف PVA با بتن ترکیب گردید، مقاومت فشاری بتن بازیافتی به میزان ۱۴/۱ درصد کاهش و مقاومت خمشی آن به میزان ۴۷/۹ درصد افزایش یافت. امیدی نسب و اسکندری^{۲۹} [۳۱] به بررسی آزمایشگاهی رفتار تیرهای ساخته شده از بتن الیافی حاوی سنگدانه‌های طبیعی و بازیافتی پرداختند. در پژوهش آنها 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 $۰/۲ \times ۰/۳ \times ۱/۵$ متر مکعب ساخته شد که جزییات آرماتورگذاری همه تیرها یکسان بوده و سه نوع الیاف فولادی، پلی پروپیلن 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، شکل پذیری 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. حسینی و همکاران^{۳۰} [۳۲] به بررسی آزمایشگاهی رفتار مکانیکی بتن حاوی سنگدانه‌های بازیافتی مسلح به الیاف فولادی و پلی پروپیلن پرداختند. نتایج پژوهش آنها نشان داد که با افزایش درصد جایگزینی سنگدانه بازیافتی مقاومت فشاری کاهش می‌یابد. الیاف پلی پروپیلن در افزایش مقاومت فشاری تاثیر مثبتی دارد و ترکیب الیاف پلی پروپیلن با ۰،۵ و ۱٪ الیاف فولادی موجب افزایش ۶۸ و ۱۶۹ برابر میزان جذب انرژی می‌شود. همچنین بیشینه مقاومت کششی با افزایش درصد جایگزینی سنگدانه بازیافتی کاهش می‌یابد. در پژوهش‌های مورد مطالعه، صرفاً به بررسی تاثیر الیاف‌های فولادی یا پلی-پروپیلن بر خصوصیات مکانیکی بتن‌های حاوی سنگدانه‌های طبیعی یا بازیافتی به صورت محدود پرداخته شده و بررسی و مقایسه تاثیر الیاف فولادی و PVA^{۳۱} بر مقاومت‌های فشاری و خمشی بتن حاوی سنگدانه‌های طبیعی و بازیافتی به صورت توأم کمتر مورد پژوهش قرار گرفته است. لذا در این پژوهش به بررسی خواص مکانیکی بتن حاوی سنگدانه‌های طبیعی و بازیافتی مسلح شده با الیاف فولادی و PVA و مقایسه مقاومت‌های فشاری و خمشی آنها با یکدیگر پرداخته شده است. برای این منظور نمونه‌های بتنی مکعبی جهت تعیین مقاومت فشاری با ابعاد $۱۵ \times ۱۵ \times ۱۵$ سانتی‌متر و تیرهای بتنی مکعبی جهت تعیین مقاومت خمشی با ابعاد $۷۵ \times ۱۵ \times ۱۵$ سانتی‌متر با دو نوع مصالح سنگی طبیعی و مصالح بازیافتی تهیه و با افزودن درصد‌های مختلف الیاف‌های فولادی و PVA شامل ۰،۵، ۱، ۱/۵ و ۲ درصد به نمونه‌های مذکور، مقاومت فشاری و خمشی آنها در سنین ۳، ۷، ۲۸، ۵۶ و ۹۰ روزه مورد بررسی و مقایسه قرار می‌گیرد. وی و همکاران^{۳۲} [۳۳] عملکردهای فشاری و خمشی بتن مسلح با الیاف پلی پروپیلن را به صورت آزمایشگاهی مورد مطالعه قرار دادند. در پژوهش آنها، الیاف پلی پروپیلن (PPF) با محتوای صفر، ۰/۶، ۰/۹ و ۱/۵ کیلوگرم بر متر مکعب به بتن اضافه شد. آزمایش‌های فشاری و خمشی بتن ساده (PC) و بتن مسلح با الیاف پلی پروپیلن (PPFRC) در سنین ۱۴، ۲۸ و ۶۰ روز انجام شد. نتایج نشان داد مقاومت فشاری و خمشی PPFRC در مقایسه با PC افزایش یافته است. با این حال، افزایش مقاومت همیشه با افزایش محتوای الیاف افزایش نمی‌یابد. مقاومت فشاری تک محوری PPFRC با ۱/۲ کیلوگرم بر متر مکعب PPF در سنین ۱۴ و ۲۸ روزه بهینه بوده که به ترتیب ۲۰/۵۶ و ۱۱/۲۴ درصد بیشتر از PC است. PPFRC با ۰/۹ کیلوگرم بر متر مکعب PPF در ۶۰ روز از همه بهتر است که ۱۹/۶۸ بیشتر از PC است و استحکام خمشی آن بیشترین مقدار است. ژیاو و همکاران^{۳۳} [۳۴] رفتار فشاری ستون‌های کوتاه بتن مسلح شده با مخلوطی از الیاف فولادی و PVA پس از قرار گرفتن در معرض دمای بالا را مورد بررسی قرار دادند. در پژوهش آنها، سه گروه ۱۵ تایی (بدون یا مخلوط با الیاف فولادی و PVA) انتخاب و این نمونه‌ها پس از قرار گیری در معرض دمای بالا تحت بارگذاری فشاری شبه استاتیک قرار گرفتند. نتایج نشان داد که پس از قرار گیری نمونه‌های بتنی در معرض دماهای بالا، ظرفیت باربری نمونه‌هایی که حاوی مخلوطی از الیاف فولادی و PVA هستند در مقایسه با بتن معمولی فاقد الیاف مذکور، افزایش یافت. همچنین نمونه‌های با الیاف فولادی بیشتر، در ظرفیت باربری بهتر عمل نموده و الیاف

²⁸ Niu et al.

²⁹ Omidinasab and Eskandari

³⁰ Hosseini et al.

³¹ Polyvinyl alcohol

³² Wei et al.

³³ Xiao et al.

PVA موجود در بتن، تشکیل و گسترش ترک در آن را پس از قرار گیری در معرض دمای بالا، به طور موثری کاهش و شکل پذیری آن را افزایش می دهد. وانگ و همکاران^{۳۴} [۳۵] به بررسی آزمایشگاهی و نظری رفتار خمشی کامپوزیت سیمانی تقویت شده با مخلوط الیاف فولاد و PVA (SPHFRCC) پرداختند. در پژوهش آنها محتوای الیاف (صفر، ۱/۵، ۱/۶، ۱/۷۵ و ۱/۹ درصد) و نسبت ترکیب الیاف فولاد و PVA (۱:۱۵، ۱:۶، ۲:۵، ۳:۴) در نظر گرفته شد. نتایج نشان داد علی رغم اینکه افزایش نسبت الیاف PVA می تواند منجر به افزایش قابل توجه مقاومت خمشی شود، در نسبت بسیار بالایی از ترکیب الیاف PVA با بتن، کاهش مقاومت خمشی را به دنبال خواهد داشت. بنابراین در حالتی که محتوای کل الیاف ۱/۷۵ درصد است، افزودن الیاف PVA به میزان ۰/۲۵، ۰/۵ و ۰/۷۵ درصد برای جایگزینی با الیاف فولادی منجر به افزایش مقاومت خمشی به میزان ۹/۳، ۳۴/۳ و ۲۲/۴ درصد شد. ژانگ و همکاران^{۳۵} [۳۶] به مطالعه آزمایشگاهی رفتار پیوند بین میلگرد فولادی و بتن مسلح با الیاف PVA پرداختند. در آزمایش پژوهش ۲۰ نمونه با چهار محتوای حجمی مختلف الیاف (صفر، ۰/۲، ۰/۴ و ۰/۶ درصد) و بتن با رده مقاومت C35 تهیه و تاثیر الیاف مذکور بر خواص مکانیکی بتن مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که الیاف PVA مقاومت فشاری بتن را کاهش داده، اما مقاومت کششی، خمشی و کششی مستقیم را افزایش می دهد.

۲- روش تحقیق

در این پژوهش ابتدا تأثیر وجود سنگدانه های بازیافتی به جای سنگدانه های طبیعی بر مقاومت فشاری و خمشی بتن بدون الیاف در سنین ۳، ۷، ۲۸، ۵۶ و ۹۰ روزه بررسی می شود؛ سپس با افزودن درصد های مختلف الیاف های فولادی و PVA شامل ۰/۵، ۱، ۱/۵ و ۲ درصد به بتن با مصالح طبیعی و بازیافتی، به مقایسه مقاومت فشاری و خمشی آنها در سنین مذکور پرداخته می گردد. مراحل ساخت نمونه ها در شرکت آزمایشگاه فنی و مکانیک خاک استان گیلان انجام و مورد آزمایش قرار گرفت.

۲-۱- مشخصات مصالح مصرفی

در طرح های مختلف اختلاط بتن شامل آب، سیمان، سنگدانه های طبیعی و بازیافتی، الیاف فولادی و الیاف PVA است که در ادامه مشخصات کلی آنها بیان می شود.

۲-۲- آب

آب مصرفی جهت ساخت نمونه های بتنی، آب شرب شهر رشت است که دارای کیفیت مناسب برای ساخت بتن است. آب مورد استفاده در حوضچه عمل آوری نمونه ها از آب بدون سختی است که میزان ۴۰ گرم آهک در هر متر مکعب آن حل شده است.

۲-۳- سیمان

برای ساخت نمونه های آزمایشگاهی از سیمان تیپ ۳۲۵ آبیکی قزوین با خواص فیزیکی و شیمیایی مندرج در جدول ۱ استفاده شده است. این سیمان برای مصارف عمومی در ساخت ملات یا بتن به کار می رود.

جدول ۱: مشخصات فیزیکی و شیمیایی سیمان مصرفی

مشخصات شیمیایی							مشخصات فیزیکی		
CaO (درصد)	SiO ₂ (درصد)	C ₃ A (درصد)	Al ₂ O ₃ (درصد)	FeO ₃ (درصد)	MgO (درصد)	SO ₃ (درصد)	گیرش اولیه (دقیقه)	مقاومت فشاری ۲۸ روزه	سطح ویژه (gr/cm ²)
۶۴-۶۳	۲۰/۵-۲۰	۸-۷/۵	۶-۵/۵	۶-۴/۵	۵-۳	۳-۲/۵	۴۵	۳۷۰-۳۲۵	۳۰۰۰-۲۸۰۰

۲-۴- سنگدانه های مصرفی

³⁴ Wang et al.

³⁵ Zhang et al.

با توجه به اینکه تقریباً ۷۵ درصد از حجم بتن را سنگدانه‌ها تشکیل می‌دهند، برای تهیه طرح اختلاط بتن، بررسی مشخصات این مصالح لازم است. در این پژوهش از دو نوع سنگدانه در اندازه‌های ماسه (۰ تا ۴/۷۵ میلی‌متر) و شن در دو رده نخودی (۴/۷۵ تا ۹/۵ میلی‌متر) و بادامی (۹/۵ تا ۱۹ میلی‌متر) بر اساس استاندارد ASTM C136-84a استفاده شده است. سنگدانه‌های طبیعی (NA) مورد استفاده در این پژوهش آزمایشگاهی، از معادن لوشان در استان گیلان تهیه شده است. سنگدانه‌های بازیافتی بتنی (RCA) مورد استفاده در این پژوهش از خرد و سرند کردن بتن‌های قدیمی در اندازه ماسه، نخودی و بادامی تهیه شده است. بتن‌های قدیمی تشکیل دهنده RCA، نمونه‌های مکعبی ۱۵ سانتیمتری با مقاومت ۲۸ روزه، ۲۵ تا ۳۵ مگاپاسکال هستند. عملیات تهیه و سرند کردن سنگدانه‌های بازیافتی در سنگ‌شکن شهر لوشان استان گیلان صورت گرفته است. در شکل‌های ۱ و ۲ به ترتیب مراحل سرند شدن سنگدانه‌های بازیافتی و انواع سنگدانه‌های مصرفی در این پژوهش در ابعاد مختلف نشان داده شده است.



شکل ۱: مراحل تهیه و سرند شدن سنگدانه‌های بازیافتی



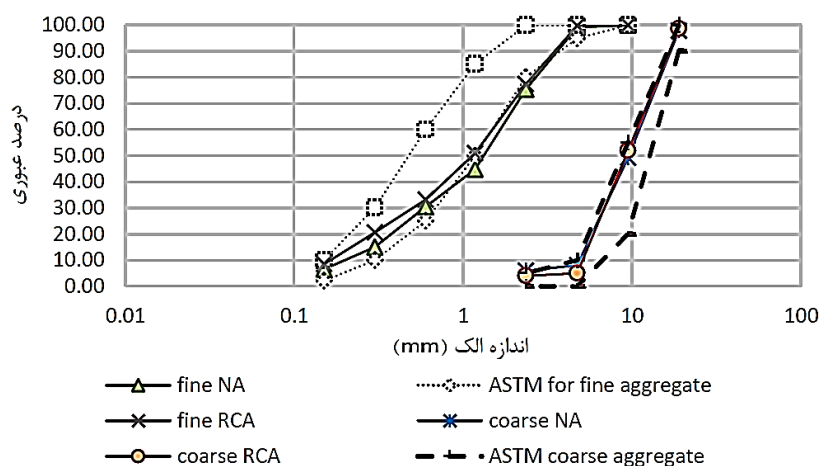
شکل ۲: سنگدانه‌های مصرفی در ابعاد و انواع مختلف

در جدول ۲ مشخصات اندازه‌گیری شده سنگدانه‌های مصرفی ذکر گردیده است. در شکل ۳ منحنی دانه‌بندی سنگدانه‌های بازیافتی و طبیعی ترسیم شده است:

جدول ۲: مشخصات فیزیکی سنگدانه‌های مصرفی ویژگی استاندارد

ویژگی	استاندارد آزمایش انجام شده	سنگدانه طبیعی	سنگدانه بازیافتی
-------	----------------------------	---------------	------------------

۲/۵	۲/۵۸	ASTM C127	چگالی درشت‌دانه در حالت SSD (gr/cm^3)
۲/۴۲	۲/۵۵	ASTM C128	چگالی ریزدانه در حالت SSD (gr/cm^3)
۴/۹	۱/۷	ASTM C127	جذب آب درشت‌دانه (درصد)
۷/۷۲	۴/۱۴	ASTM C128	جذب آب ریزدانه (درصد)
۳۰/۴۴	۱۸/۲	ASTM C131	درصد سایش آزمایش لوس آنجلس
۱۹/۲	۱۵	BS812	شاخص تطویل سنگدانه‌ها
۱۴/۲	۱۳/۸	BS812	شاخص تورق سنگدانه‌ها



شکل ۳: منحنی دانه‌بندی سنگدانه‌های مصرفی

۵-۲- الیاف مصرفی

الیاف مصرفی در این پروژه از جنس فولادی و PVA هستند. در شکل ۴ الیاف مصرفی نشان داده شده است. در جدول ۳ مشخصات الیاف مصرفی درج شده است.



(ب)



(الف)

شکل ۴: الیاف مصرفی در نمونه‌های بتنی (الف) الیاف PVA (ب) الیاف فولادی

جدول ۳: مشخصات فنی الیاف مصرفی

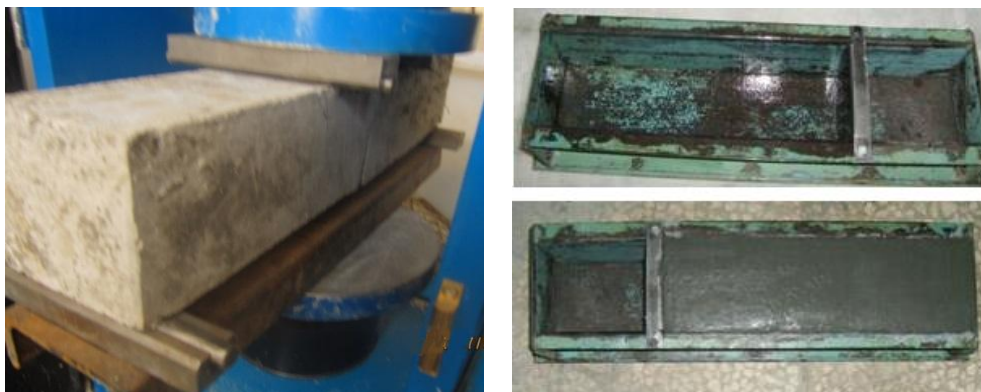
مشخصات	الیاف PVA	الیاف فولادی
--------	-----------	--------------

۷/۸	۱/۲	چگالی (gr/cm^3)
۰	۰	جذب آب (%)
۵۰	۵۰	طول (mm)
۱	۱	ابعاد یا قطر (mm)
۱۲۰۰-۱۰۰۰	۱۵۰۰-۱۲۰۰	مقاومت کششی (Mpa)

۶-۲- مراحل ساخت و عمل آوری نمونه‌ها

در شکل (۵) مراحل ساخت، عمل آوری و شکستن نمونه‌ها نشان داده شده است. برای اختلاط و ساخت تمامی نمونه‌های بتنی از میکسر استوانه‌ای کج شونده استفاده می‌شود. برای ساخت بتن‌های بدون الیاف، ابتدا مصالح درشت‌دانه و مقداری از مصالح ریز دانه به میکسر اضافه می‌شود و مقداری از آب طرح اختلاط به مصالح اضافه می‌شود تا سطح آنها مرطوب شود. اختلاط مصالح دانه‌ای به مدت ۲ دقیقه در میکسر انجام می‌گیرد و سپس سیمان و ریزدانه‌های باقی‌مانده به میکسر افزوده و همزمان آب باقی‌مانده به همراه روان کننده محلول در آن به مخلوط اضافه می‌شود و اختلاط بتن به مدت ۳ دقیقه دیگر صورت می‌گیرد. روند ساخت بتن‌های الیافی مشابه بتن‌های بدون الیاف است با این تفاوت که با توجه به اینکه اضافه کردن الیاف نیازمند صرف مقداری وقت است، ابتدا در مدت ۳ دقیقه سنگدانه‌ها به میکسر اضافه می‌شوند و الیاف به صورت دستی در حین کار میکسر به مخلوط افزوده و با تغییر در زاویه قرار گرفتن میکسر و نظارت بر مخلوط، سعی در توزیع یکنواخت الیاف در بتن می‌گردد. در تمامی مراحل ساخت بتن با تغییر در زاویه دوران محور میکسر، بتن همگن و یکنواخت ساخته می‌شود. پس از تخلیه میکسر ابتدا با بیلچه بتن زیر و رو می‌شود و بلافاصله پس از آن آزمایش اسلامپ انجام می‌شود. طبق اندازه‌گیری‌های صورت گرفته دمای بتن تازه بین ۲۷ تا ۲۹ درجه سلسیوس و دمای آب عمل آوری ۲۰ تا ۲۴ درجه سلسیوس است. خواص مکانیکی مورد بررسی در این پژوهش در سنین ۳، ۷، ۲۸، ۵۶ و ۹۰ روزه بتن و از میانگین‌گیری سه نمونه بتنی حاصل می‌گردد. برای بررسی مقاومت فشاری بتن از نمونه‌های مکعبی $15 \times 15 \times 15$ سانتی‌متری و برای بررسی مقاومت خمشی بتن از تیرهای با ابعاد $15 \times 15 \times 75$ سانتی‌متری استفاده می‌گردد. قالب‌ها هر کدام در سه لایه بتن‌ریزی و هر لایه ۲۵ ضربه کوبیده می‌شود. سپس با چکش لاستیکی ضربه‌هایی به بدنه قالب زده می‌شود تا هوای موجود در بتن خارج گردد. تیرها هر کدام در دو لایه بتن‌ریزی شده و با کمک وایراتور، هر لایه متراکم شده و هوای موجود در آن خارج می‌گردد. پس از اتمام قالب‌ریزی و تراکم، سطح نمونه‌های بتنی با گونی‌های مرطوب پوشانده می‌شود تا از تبخیر آب بتن جلوگیری به عمل آید. نمونه‌های بتنی پس از ۲۴ ساعت از قالب خارج شده و به حوضچه عمل آوری منتقل می‌شوند.





شکل ۵: مراحل ساخت، عمل آوری و شکستن نمونه‌ها

۳- نتایج و بحث

۳-۱- مقاومت فشاری

مقاومت فشاری یکی از مهمترین پارامترهای سنجش رفتار بتن است. از گذشته تاکنون دانشمندان زیادی با اضافه کردن افزودنی‌ها و الیاف‌های مختلف موجب بهبود مقاومت فشاری بتن شده‌اند. در این پژوهش با ترکیب جداگانه الیاف فولادی و PVA در بتن حاوی سنگدانه‌های بازیافتی و بازیافتی به تعیین مقاومت فشاری نمونه‌های بتنی با دستگاه جک بتن شکن ۲۰۰ تن پرداخته می‌شود. در شکل‌های ۶ الی ۱۰ مقاومت فشاری نمونه‌های بتنی ساخته شده با سنگدانه طبیعی و بازیافتی بدون الیاف و با درصد‌های مختلف الیاف فولادی و PVA در سنین مختلف مقایسه گردیده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود مقاومت فشاری نمونه‌های بتنی با مصالح طبیعی همواره بیشتر از مقاومت فشاری نمونه‌های بتنی با مصالح بازیافتی است. علت این امر وجود خلل و فرج و فضاهای خالی بیشتر ما بین سنگدانه‌های بازیافتی در مقایسه با سنگدانه‌های طبیعی می‌باشد. از سوی دیگر بتن بدون الیاف‌های فولادی و PVA همواره دارای مقاومت فشاری بیشتری نسبت به بتن با درصد‌های مختلف الیاف‌های مذکور در سنین مختلف است. همچنین با مقایسه مقاومت فشاری نمونه‌های بتنی با درصد الیاف‌های مختلف ملاحظه می‌گردد که در سنین ۳، ۷، ۲۸، ۵۶ و ۹۰ روزه، بیشترین مقاومت فشاری مربوط به نمونه‌های بتنی ساخته شده با مصالح طبیعی دارای ۰/۵ درصد الیاف PVA و کمترین مقاومت فشاری نیز مربوط به نمونه‌های بتنی ساخته شده با مصالح بازیافتی دارای ۲ درصد الیاف PVA است. در واقع هرچه درصد الیاف در بتن بیشتر می‌شود منجر به کاهش مصالح سنگی و در نتیجه کاهش مقاومت فشاری بتن می‌گردد. در جداول ۴ و ۵ به مقایسه تغییرات مقاومت فشاری نمونه‌های ساخته شده به ترتیب با مصالح طبیعی و بازیافتی با درصد‌های مختلف الیاف نسبت به مقاومت فشاری نمونه بدون الیاف در سنین مختلف پرداخته شده است.

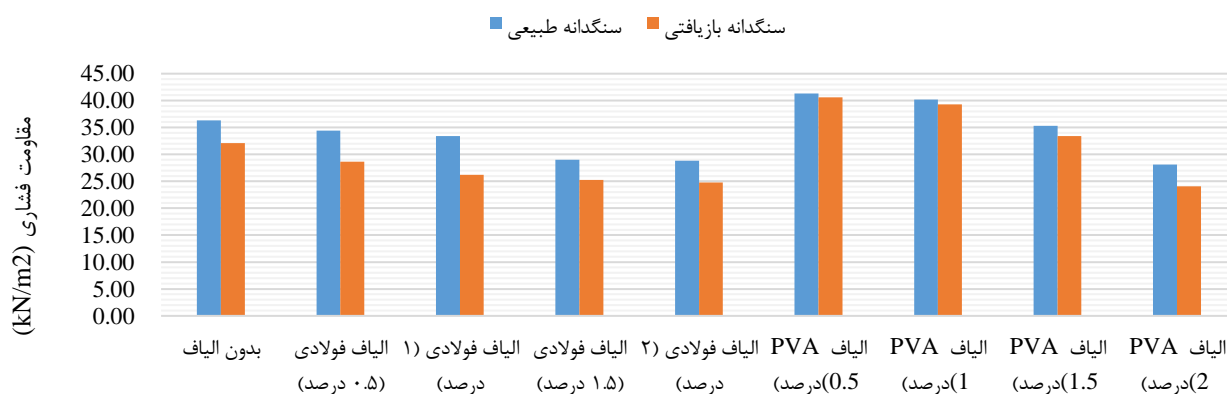
جدول ۴: مقایسه تغییرات مقاومت فشاری نمونه‌های ساخته شده با مصالح طبیعی و درصد‌های مختلف الیاف نسبت به مقاومت فشاری نمونه بدون الیاف در سنین مختلف

دیمانسیون سن (روز)	150×150×150 mm ³							
	الیاف فولادی				الیاف PVA			
	۰/۵	۱	۱/۵	۲	۰/۵	۱	۱/۵	۲
۳	-۲۵/۷	-۲۷/۸۶	-۳۷/۳۷	-۴۱/۴۷	-۱۰/۸	-۱۳/۱۷	-۲۳/۷۶	-۳۹/۳۱
۷	-۱۷/۶۵	-۲۳/۵۳	-۲۵/۴۴	-۲۸/۷۶	-۶/۰۶	-۱۰/۸۱	-۱۵/۹	-۲۰/۶۷
۲۸	-۱۷/۷۶	-۲۲/۴۹	-۲۹/۳	-۳۲/۳	-۸/۳	-۱۴/۳	-۱۹/۲۶	-۲۱/۲۲
۵۶	-۱۵/۷۶	-۲۰/۹۸	-۲۶/۹۸	-۳۱/۶۳	-۱۲/۳۶	-۱۵/۰۸	-۱۹/۱۶	-۲۰/۶۵
۹۰	-۱۲/۲۰	-۱۷/۶۳	-۲۲/۴۳	-۲۷/۱۲	-۹/۲۶	-۱۳/۷۳	-۱۶/۵۲	-۲۰/۴۲

جدول ۵: مقایسه تغییرات مقاومت فشاری نمونه‌های ساخته شده با مصالح بازیافتی و درصد‌های مختلف الیاف نسبت به مقاومت فشاری نمونه بدون

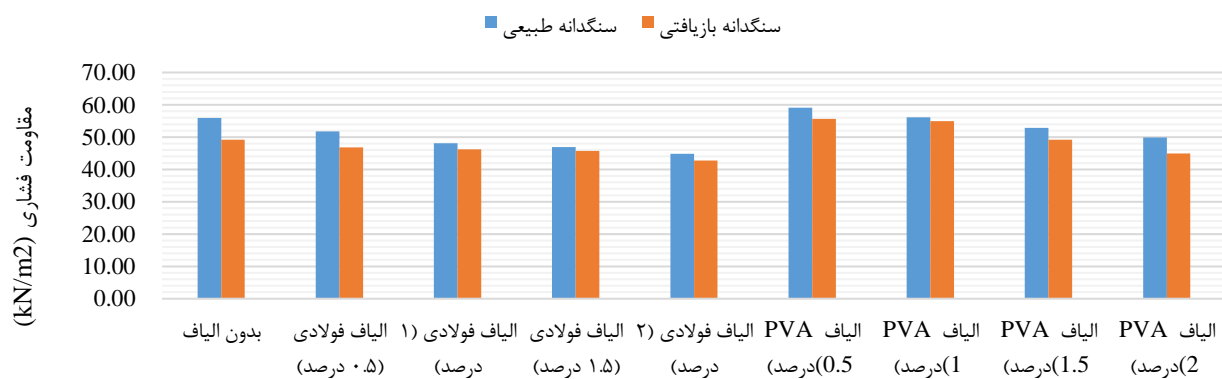
الیاف در سنین مختلف

150×150×150 mm ³								دیمانسیون
الیاف PVA				الیاف فولادی				سن (روز)
۲	۱/۵	۱	۰/۵	۲	۱/۵	۱	۰/۵	
-۴۱/۰۸	-۲۰/۶۸	-۶/۶۷	-۳/۵۹	-۴۲/۷۷	-۴۰/۰۴	-۳۷/۸۱	-۳۴/۹۳	۳
-۲۴/۱۶	-۱۶/۸۹	-۷/۳۶	-۶/۰۸	-۲۷/۷	-۲۲/۸	-۲۱/۹۶	-۲۰/۵۹	۷
-۲۷/۶۱	-۲۵/۶۵	-۱۷/۵	-۱۵/۷۷	-۳۲/۵۴	-۲۹/۹۵	-۲۵/۶۵	-۲۶/۲۵	۲۸
-۲۹/۷	-۲۴/۲۶	-۱۵/۶	-۱۴/۸۴	-۳۷/۳۴	-۳۱/۸	-۲۷/۸	-۲۰/۶۱	۵۶
-۲۶/۷۹	-۱۶/۸	-۱۴/۱۷	-۱۰/۰۵	-۳۲	-۲۳/۰۲	-۱۷/۱۲	-۱۱/۹۲	۹۰



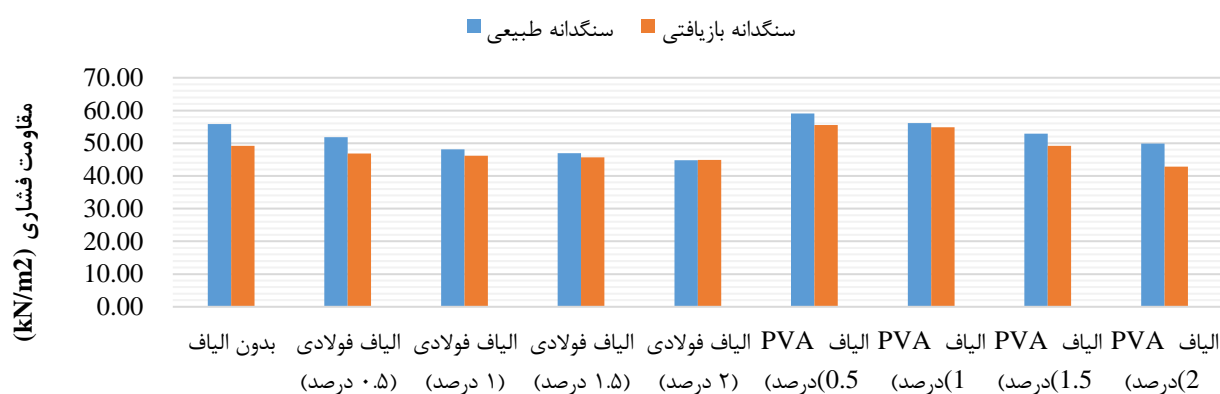
سن: ۳ روزه

شکل ۶: مقایسه مقاومت فشاری ۳ روزه نمونه‌های بتنی ساخته شده با سنگدانه طبیعی و بازیافتی بدون الیاف و با درصد‌های مختلف الیاف فولادی و PVA



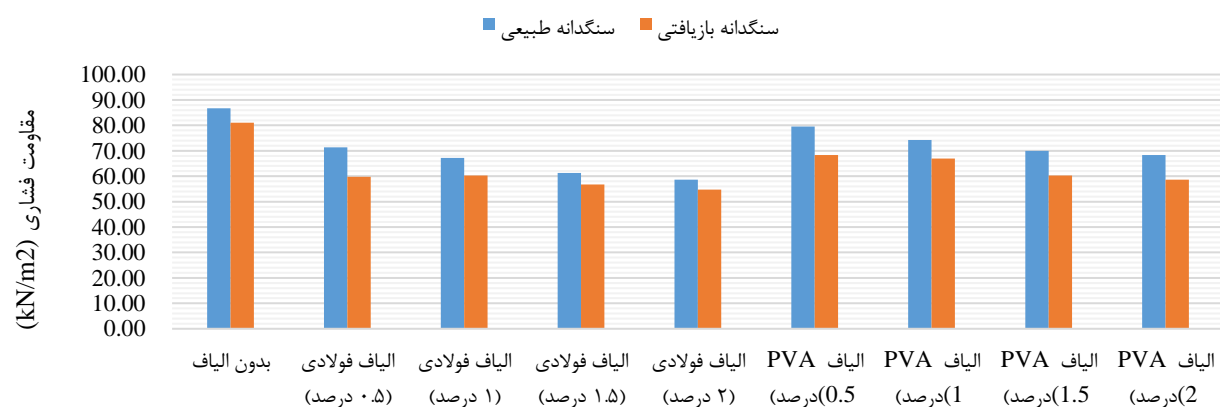
سن: ۷ روزه

شکل ۷: مقایسه مقاومت فشاری ۷ روزه نمونه‌های بتنی ساخته شده با سنگدانه طبیعی و بازیافتی بدون الیاف و با درصد‌های مختلف الیاف فولادی و PVA



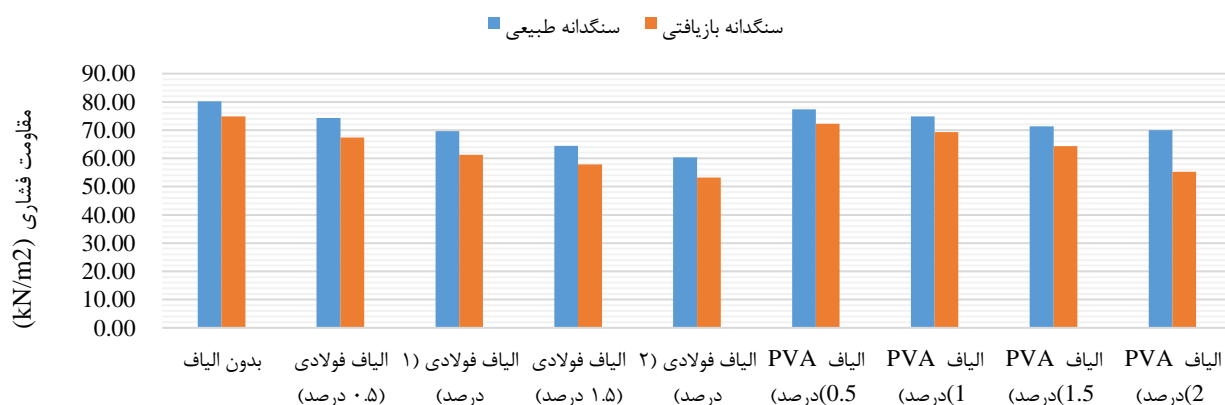
سن: ۲۸ روزه

شکل ۸: مقایسه مقاومت فشاری ۲۸ روزه نمونه‌های بتنی ساخته شده با سنگدانه طبیعی و بازیافتی بدون الیاف و با درصد‌های مختلف الیاف فولادی و PVA



سن: ۵۶ روزه

شکل ۹: مقایسه مقاومت فشاری ۵۶ روزه نمونه‌های بتنی ساخته شده با سنگدانه طبیعی و بازیافتی بدون الیاف و با درصد‌های مختلف الیاف فولادی و PVA



سن: ۹۰ روزه

شکل ۱۰: مقایسه مقاومت فشاری ۹۰ روزه نمونه‌های بتنی ساخته شده با سنگدانه طبیعی و بازیافتی بدون الیاف و با درصد‌های مختلف الیاف فولادی و PVA

۲-۳- مقاومت خمشی

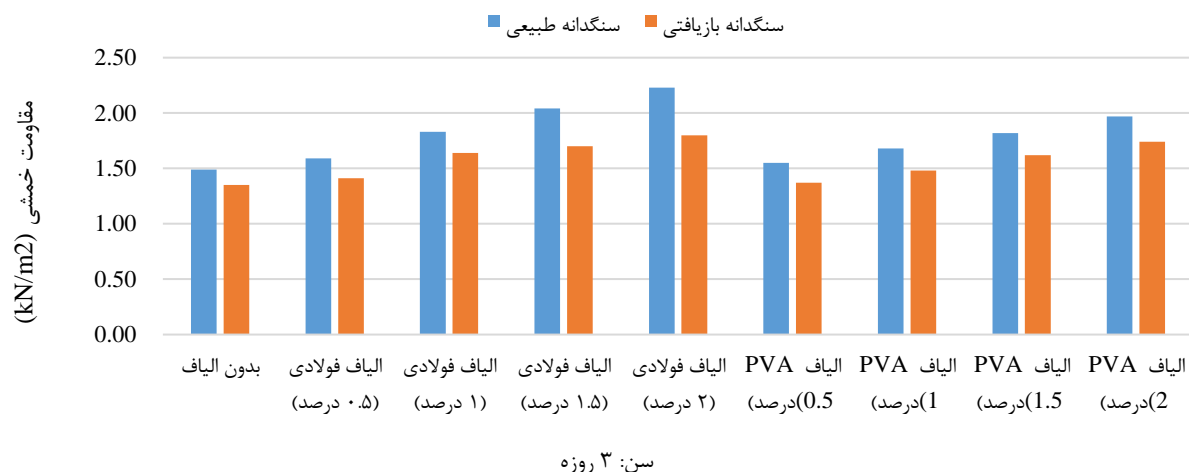
در شکل‌های ۱۱ الی ۱۵ به مقایسه مقاومت خمشی نمونه‌های بتنی ساخته شده با سنگدانه طبیعی و بازیافتی بدون الیاف و با درصد‌های مختلف الیاف فولادی و PVA در سنین مختلف پرداخته شده است. مقاومت خمشی نمونه‌های بتنی با استفاده از روش بار سه نقطه‌ای بر اساس استاندارد ASTM C78 تعیین شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌گردد، مقاومت خمشی نمونه‌های بتنی با سنگدانه‌های طبیعی در همه سنین بیش از نمونه‌های بتنی ساخته شده با سنگدانه‌های مصنوعی است. از سوی دیگر مقاومت خمشی نمونه‌های دارای الیاف PVA به مراتب کمتر از الیاف فولادی در سنین برابر و درصد‌های الیاف یکسان می‌باشد و با افزایش درصد الیاف‌های فولادی و PVA از ۰/۵ به ۲ درصد، مقاومت خمشی نمونه‌ها نیز افزایش می‌یابد به طوری که در کلیه سنین بتن، بیشترین مقاومت خمشی مربوط به نمونه‌های بتنی ساخته شده با مصالح طبیعی دارای ۲ درصد الیاف فولادی و کمترین مقاومت فشاری نیز مربوط به نمونه‌های بتنی ساخته شده با مصالح بازیافتی دارای ۰/۵ درصد الیاف PVA است. در جداول ۶ و ۷ به مقایسه تغییرات مقاومت خمشی نمونه‌های ساخته شده به ترتیب با مصالح طبیعی و بازیافتی با درصد‌های مختلف الیاف نسبت به مقاومت فشاری نمونه بدون الیاف در سنین مختلف پرداخته شده است.

جدول ۶: مقایسه تغییرات مقاومت خمشی نمونه‌های ساخته شده با مصالح طبیعی و درصد‌های مختلف الیاف نسبت به مقاومت خمشی نمونه بدون الیاف در سنین مختلف

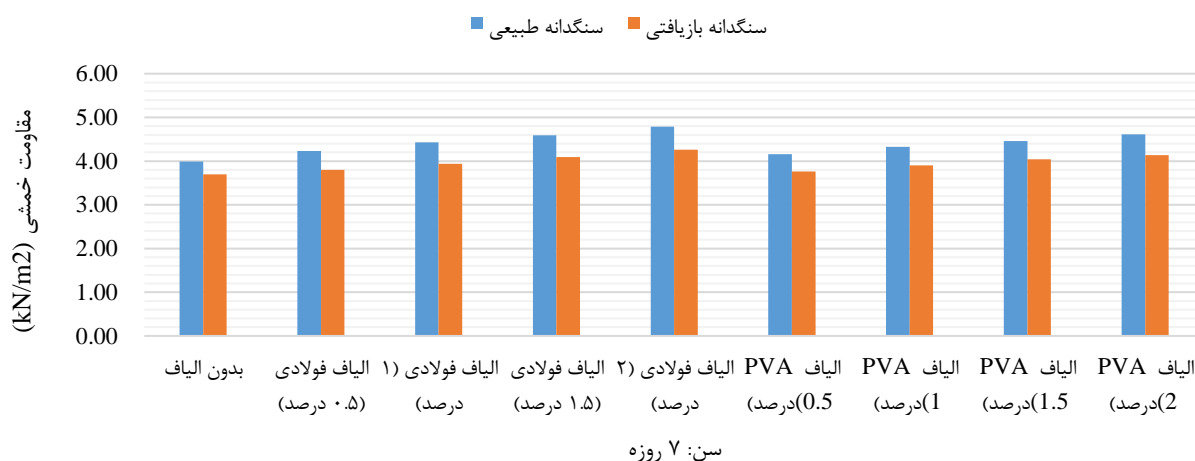
150×150×750 mm ³								دیمانسیون
الیاف PVA				الیاف فولادی				سن (روز)
۲	۱/۵	۱	۰/۵	۲	۱/۵	۱	۰/۵	
۳۲/۲۱	۲۲/۱۵	۱۲/۷۵	۴/۰۳	۴۹/۶۶	۳۶/۹۱	۲۲/۸۲	۶/۷۱	۳
۱۵/۵۴	۱۱/۷۸	۸/۵۲	۴/۲۶	۲۰/۰۵	۱۵/۰۴	۱۱/۰۳	۶/۰۲	۷
۱۲/۹۱	۱۰/۴۵	۷/۷۹	۴/۵۱	۱۶/۶	۱۲/۵	۹/۰۲	۵/۳۳	۲۸
۱۲/۰۲	۱۰/۰۱	۶/۵۸	۳/۴۳	۱۴/۱۶	۱۱/۵۹	۷/۵۸	۴/۵۸	۵۶
۱۰/۷۹	۷/۶۹	۵/۱۷	۲/۵۳	۱۲/۶۳	۱۰/۱	۵/۹۷	۳/۷۹	۹۰

جدول ۷: مقایسه تغییرات مقاومت خمشی نمونه‌های ساخته شده با مصالح بازیافتی و درصد‌های مختلف الیاف نسبت به مقاومت خمشی نمونه بدون الیاف در سنین مختلف

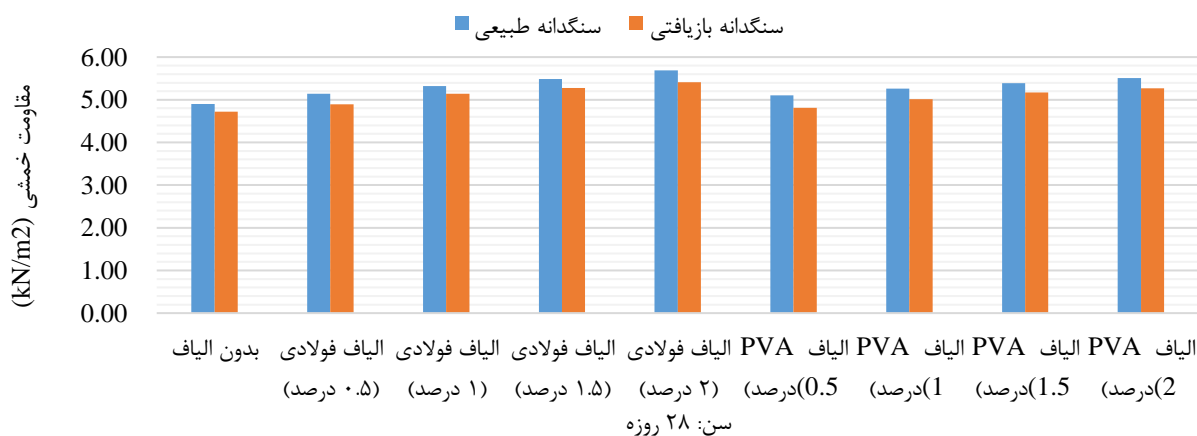
150×150×750 mm ³								دیمانسیون
الیاف PVA				الیاف فولادی				سن (روز)
۲	۱/۵	۱	۰/۵	۲	۱/۵	۱	۰/۵	
۲۸/۸۹	۲۰	۹/۶۳	۱/۴۸	۳۳/۳۳	۲۵/۹۳	۲۱/۴۸	۴/۴۴	۳
۱۱/۸۹	۹/۱۹	۵/۴۱	۱/۶۲	۱۵/۱۴	۱۰/۵۴	۶/۴۹	۲/۷	۷
۱۱/۶۵	۹/۵۳	۶/۱۴	۱/۹۱	۱۴/۶۲	۱۱/۸۶	۸/۹	۳/۶	۲۸
۱۰/۱۵	۸/۵۱	۵/۶۷	۲/۲۴	۱۱/۷۹	۹/۷	۶/۵۷	۳/۴۳	۵۶
۸/۴۱	۶/۶۶	۳/۹۷	۲/۴۵	۱۰/۸۶	۸/۷۶	۴/۷۹	۲/۸	۹۰



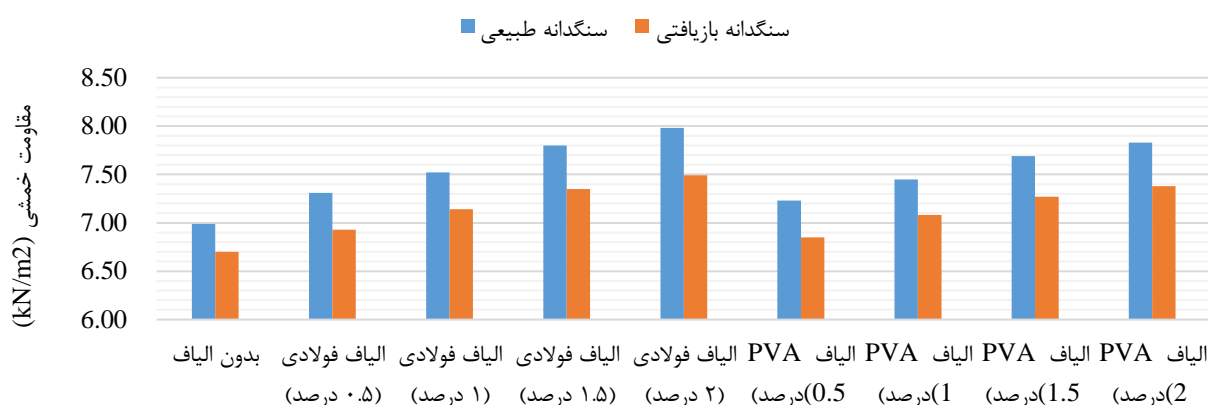
شکل ۱۱: مقایسه مقاومت خمشی ۳ روزه نمونه‌های بتنی ساخته شده با سنگدانه طبیعی و بازیافتی بدون الیاف و با درصدهای مختلف الیاف فولادی و PVA



شکل ۱۲: مقایسه مقاومت خمشی ۷ روزه نمونه‌های بتنی ساخته شده با سنگدانه طبیعی و بازیافتی بدون الیاف و با درصدهای مختلف الیاف فولادی و PVA



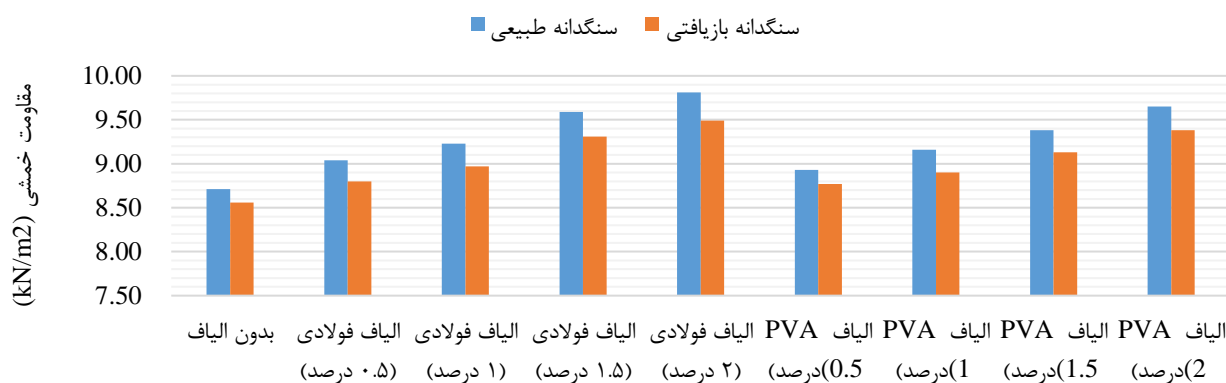
شکل ۱۳: مقایسه مقاومت خمشی ۲۸ روزه نمونه‌های بتنی ساخته شده با سنگدانه طبیعی و بازیافتی بدون الیاف و با درصدهای مختلف الیاف فولادی و PVA



سن: ۵۶ روزه

شکل ۱۴: مقایسه مقاومت خمشی ۵۶ روزه نمونه‌های بتنی ساخته شده با سنگدانه طبیعی و بازیافتی بدون یاف و با درصد‌های مختلف یاف فولادی و

PVA



سن: ۹۰ روزه

شکل ۱۵: مقایسه مقاومت خمشی ۹۰ روزه نمونه‌های بتنی ساخته شده با سنگدانه طبیعی و بازیافتی بدون یاف و با درصد‌های مختلف یاف فولادی و

PVA

۴- نتیجه گیری

در این پژوهش این منظور ابتدا تأثیر وجود سنگدانه‌های بازیافتی به جای سنگدانه‌های طبیعی بر مقاومت فشاری و خمشی بتن بدون یاف در سنین ۳، ۷، ۲۸، ۵۶ و ۹۰ روزه بررسی می‌گردد؛ سپس با افزودن درصد‌های مختلف یاف‌های فولادی و PVA شامل ۰/۵، ۱، ۱/۵ و ۲ درصد به بتن با مصالح طبیعی و بازیافتی، به مقایسه مقاومت فشاری و خمشی آنها در سنین مذکور پرداخته می‌شود. نتایج نشان داد:

- ۱- مقاومت فشاری و خمشی نمونه‌های بتنی ساخته شده با مصالح طبیعی همواره بیشتر از مصالح بازیافتی است.
- ۲- در کلیه سنین بتن، بیشترین مقاومت فشاری مربوط به نمونه‌های بتنی ساخته شده با مصالح طبیعی دارای ۰/۵ درصد یاف PVA و کمترین مقاومت فشاری نیز مربوط به نمونه‌های بتنی ساخته شده با مصالح بازیافتی دارای ۲ درصد یاف PVA است.
- ۳- مقاومت خمشی نمونه‌های دارای یاف PVA به مراتب کمتر از یاف فولادی در سنین برابر و درصد‌های یاف یکسان می‌باشد و با افزایش درصد یاف‌های فولادی و PVA از ۰/۵ به ۲ درصد، مقاومت خمشی نمونه‌ها نیز افزایش می‌یابد.
- ۴- در کلیه سنین بتن، بیشترین مقاومت خمشی مربوط به نمونه‌های بتنی ساخته شده با مصالح طبیعی دارای ۲ درصد یاف فولادی و کمترین مقاومت فشاری نیز مربوط به نمونه‌های بتنی ساخته شده با مصالح بازیافتی دارای ۰/۵ درصد یاف PVA است.

مراجع

- [1] ACI, G. (2014). ACI 318-14: Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary.
- [2] CSI, C. S. I. (2015). Recycling Concrete report.
- [3] Mondal, S., Kar, A., Guharay, A., & James, N. (2017). Characterization of Building Derived Materials for Ground Improvement of Contaminated Soils. *Construction Materials and Systems*, 65.
- [4] Ibrahim, Y. (2019). Durability and structural performance of recycled aggregate concrete: A review. *Int. Rev. Civil. Eng*, 10, 135-141.
- [5] Shi, C., Li, Y., Zhang, J., Li, W., Chong, L., & Xie, Z. (2016). Performance enhancement of recycled concrete aggregate—a review. *Journal of cleaner production*, 112, 466-472.
- [6] Saghafi, M. D., & Teshnizi, Z. A. H. (2011). Building deconstruction and material recovery in Iran: an analysis of major determinants. *Procedia Engineering*, 21, 853-863.
- [7] Limbachiya, M. C., Leelawat, T., & Dhir, R. K. (2000). Use of recycled concrete aggregate in high-strength concrete. *Materials and Structures*, 33, 574-580.
- [8] Ding, Y., & Kusterle, W. (2000). Compressive stress–strain relationship of steel fibre-reinforced concrete at early age. *Cement and Concrete Research*, 30(10), 1573-1579.
- [9] Xiao, J., Li, J., Sun, Z., & Hao, X. (2004). Study on compressive strength of recycled aggregate concrete. *Tongji Daxue Xuebao/Journal of Tongji University*, 1558-1561.
- [10] Prasad, M. L. V., & Kumar, P. R. (2007). Mechanical properties of fiber reinforced concretes produced from building demolished waste. *Environmental Research and Development*, 2(2), 180-187.
- [11] Debieb, F., & Kenai, S. (2008). The use of coarse and fine crushed bricks as aggregate in concrete. *Construction and building materials*, 22(5), 886-893.
- [12] JAGANNADHA, R. K., & AHMED, K. T. (2009). Suitability of glass fibers in high strength recycled aggregate concrete-An experimental investigation.
- [13] Vytlačilova, V. (2010). Behaviour of the sustainable fiber reinforced concrete with recycled aggregate after loading. *Mathematical Methods and Techniques in Engineering and Environmental Science*, 2(2), 299-304.
- [14] Choi, W. C., & Yun, H. D. (2012). Compressive behavior of reinforced concrete columns with recycled aggregate under uniaxial loading. *Engineering structures*, 41, 285-293.
- [15] Kang, T., Kim, W., Kwak, Y. K., & Hong, S. G. (2012, September). The choice of recycled concrete aggregates for flexural members. In *IABSE Congress Report* (Vol. 18, No. 21, pp. 726-731). International Association for Bridge and Structural Engineering.
- [16] Wagih, A. M., El-Karmoty, H. Z., Ebid, M., & Okba, S. H. (2013). Recycled construction and demolition concrete waste as aggregate for structural concrete. *HBRC journal*, 9(3), 193-200.
- [17] Awchat, G. D., & Kanhe, N. M. (2013). Experimental studies on polymer modified steel fibre reinforced recycled aggregate concrete. *International Journal of Application or Innovation in Engineering & Management*, 2(12), 126-134.
- [18] Choi, W. C., & Yun, H. D. (2012). Compressive behavior of reinforced concrete columns with recycled aggregate under uniaxial loading. *Engineering structures*, 41, 285-293.
- [19] Carneiro, J. A., Lima, P. R. L., Leite, M. B., & Toledo Filho, R. D. (2014). Compressive stress–strain behavior of steel fiber reinforced-recycled aggregate concrete. *Cement and concrete composites*, 46, 65-72.
- [20] Guo, Y. C., Zhang, J. H., Chen, G. M., & Xie, Z. H. (2014). Compressive behaviour of concrete structures incorporating recycled concrete aggregates, rubber crumb and reinforced with steel fibre, subjected to elevated temperatures. *Journal of cleaner production*, 72, 193-203.
- [21] Arora, S., & Singh, S. P. (2016). Analysis of flexural fatigue failure of concrete made with 100% coarse recycled concrete aggregates. *Construction and building materials*, 102, 782-791.
- [22] Akça, K. R., Çakır, Ö., & İpek, M. (2015). Properties of polypropylene fiber reinforced concrete using recycled aggregates. *Construction and Building Materials*, 98, 620-630.

- [23] Jalilifar, H., Sajedi, F., & Kazemi, S. (2016). RETRACTED: Investigation on the mechanical properties of fiber reinforced recycled concrete. *Civil Engineering Journal*, 2(1), 13-22.
- [24] Tošić, N., Marinković, S., & Ignjatović, I. (2016). A database on flexural and shear strength of reinforced recycled aggregate concrete beams and comparison to Eurocode 2 predictions. *Construction and Building Materials*, 127, 932-944.
- [25] Zaetang, Y., Sata, V., Wongsu, A., & Chindaprasirt, P. (2016). Properties of pervious concrete containing recycled concrete block aggregate and recycled concrete aggregate. *Construction and Building Materials*, 111, 15-21.
- [26] Mohammed, T. U., Das, H. K., Mahmood, A. H., Rahman, M. N., & Awal, M. A. (2017). Flexural performance of RC beams made with recycled brick aggregate. *Construction and Building Materials*, 134, 67-74.
- [27] Mohammed, A. A. (2017). Flexural behavior and analysis of reinforced concrete beams made of recycled PET waste concrete. *Construction and Building Materials*, 155, 593-604.
- [28] Seara-Paz, S., González-Fontebao, B., Martínez-Abella, F., & Eiras-López, J. (2018). Flexural performance of reinforced concrete beams made with recycled concrete coarse aggregate. *Engineering Structures*, 156, 32-45.
- [29] Nematzadeh, M., & Zabizi, R. (2020). Optimizing compressive strength of concrete containing recycled tire rubber together with steel fiber exposed to high temperatures. *Modares Civil Engineering journal*, 20(3), 175-188.
- [30] Niu, H., Wang, L., Li, J., & Ji, J. (2021). Experimental Study on Mechanical Properties of Steel-Polyvinyl Alcohol Fibre-Reinforced Recycled Concrete. *Applied Sciences*, 11(22), 10550.
- [31] Omidinasab, F., & Eskandari, A. (2022). Experimental investigation of flexural behavior of beams made of fibrous concrete containing natural and recycled aggregates. *Amirkabir Journal of Civil Engineering*, 54(6), 2101-2128.
- [32] Hosseini, S., Shafaei, J., & Jandaghi Alaei, F. (2022). Experimental evaluation of mechanical behavior of concrete containing recycled aggregates reinforced with steel and polypropylene fibers. *Modares Civil Engineering journal*, 22(2), 77-88.
- [33] Wei, Y., Qin, Y., Chai, J., Xu, C., Zhang, Y., & Zhang, X. (2022). Experimental Study on Compressive and Flexural Performances of Polypropylene Fiber-Reinforced Concrete. *Geofluids*, 2022.
- [34] Xiao, L., Chen, P., Huang, J., Peng, S., & Yang, Z. (2022). Compressive behavior of reinforced steel-PVA hybrid fiber concrete short columns after high temperature exposure. *Construction and Building Materials*, 342, 127935.
- [35] Wang, Z., Liang, X., & Zhai, T. (2023). Predicting the flexural behavior of steel-PVA hybrid fiber reinforced cementitious composite. *Structures*, 51, 1189-1204.
- [36] Zhang, X., Lu, Q., & Wang, Y. (2023). Experimental study on bond behavior between steel rebar and PVA fiber-reinforced concrete. *Coatings*, 13(4), 740.