



University Of Qom

Experimental Investigating the Effect of Non-steel Fibers on the Consistency and Mechanical Properties and Toughness of RCCP

Hosein Arabyarmohammadi¹, Mohammad Kazem Sharbatdar² , Hosein Naderpour³ 

1. Department of Civil Engineering, Islamic Azad University, Sari Branch, Sari, Iran. E-mail: haym1358@gmail.com

2. Corresponding author, Faculty of Civil Engineering, Semnan University, Iran. E-mail: msharbatdar@semnan.ac.ir

3. Faculty of Civil Engineering, Semnan University, Iran. E-mail: naderpour@semnan.ac.ir

Article Info

Article type:

Research Article

Article history:

Received 27 Oct 2022

Revised 18 Jun 2023

Accepted 19 Jun 2023

Keywords:

Roller-Compacted Concrete, Mechanical Properties, Non-Steel Fibers, Pavement, Toughness.

ABSTRACT

Roller-Compacted Concrete (RCC), which is a kind of dry consistency concrete with zero slump, has two various main applications, pavement and dams. But, owing to the benefits such as cost efficiency, low hydration heat, durability, and high speed of execution, RCC is particularly preferred in the construction of airstrips, military sites, and nuclear plants. In order to evaluate the effect of non-steel fibers on the Vebe time, modulus of elasticity, and also compressive strength, flexural strength, and splitting tensile strength of RCC as the aim of this research, a basic mix was used by adding three types of fibers including Barchip, Emboss and Glass fibers with percentages of 0.1, 0.3 and 0.5, the less percentage for controlling shrinkage cracks and higher amount for improving mechanical properties. The results showed that the addition of non-steel fibers to RCC reduced or increased compressive strength up to 5%, little decrease in Modulus of Elasticity and flexural strength and increasing up to 20% in tensile strength. Also, the fibers decreased the consistency and increased the vebe time of the basic mix. Barchip and Emboss fiber compared with Glass fibers showed better softening behavior after cracking. The amount of toughness was increased with the volume percentage of fiber, and this increase was higher for the Barchip fiber than the Emboss fiber. The best behavior after cracking was shown by Barchip fiber with a volume percentage of 0.5.

Cite this article: Arabyarmohammadi, Hosein., Sharbatdar, Mohammad Kazem., & Naderpour, Hosein. (2023). Experimental Investigating the Effect of Non-Steel Fibers on the Consistency and Mechanical Properties and Toughness of RCCP. *Civil Infrastructure Researches*, 9(2), 17-33. <https://doi.org/10.22091/cer.2023.8714.1435>





بررسی آزمایشگاهی اثر الیاف غیر فولادی بر کار آیی و مشخصات مکانیکی و طاق بتن غلتکی روسازی

حسین عرب یارمحمدی^۱، محمد کاظم شربتدار^۲، حسین نادرپور^۳

۱. گروه مهندسی عمران، دانشگاه آزاد اسلامی واحد ساری، ساری، ایران. رایانامه: haym1358@gmail.com

۲. نویسنده مسئول، استاد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران. رایانامه: msharbatdar@semnan.ac.ir

۳. استاد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران. رایانامه: naderpour@semnan.ac.ir

چکیده

بتن غلتکی نوعی بتن خشک با اسلامپ صفر است. این نوع بتن دارای دو کاربرد اصلی است: روسازی و سدها. با این حال، با توجه به مزایایی مانند کاهش هزینه، حرارت کم هیدراتاسیون، دوام و سرعت بالای اجرا، این بتن در ساخت فرودگاه ها، سایت های نظامی و نیروگاه های هسته ای به کار گرفته شده است. از آنجا که مطالعات محدودی در خصوص اثر الیاف غیر فولادی بر مشخصات بتن غلتکی انجام شده است، هدف این تحقیق ارزیابی اثر الیاف غیر فلزی بر زمان وی بی، مقاومت فشاری، مقاومت کششی دونیم شدن، مقاومت خمشی و طاق بتن غلتکی روسازی می باشد. بدین منظور، از یک طرح مینا با افزودن سه نوع الیاف شامل بارچپ، امباس و شیشه با درصدهای ۰/۱، ۰/۳ و ۰/۵ استفاده گردید که درصدهای پایین برای کنترل ترک های سطحی آبرفتگی و درصدهای بالاتر برای بهبود خواص مکانیکی بودند. نتایج نشان داد که افزودن الیاف غیر فولادی باعث کاهش یا افزایش جزئی تا ۵ درصد در مقاومت فشاری و کاهش جزئی در مدول الاستیسیته و مقاومت خمشی و افزایش تا ۲۰ درصدی مقاومت کششی بتن غلتکی گردید. همچنین الیاف، باعث کاهش کار آیی و افزایش زمان وی طرح مخلوط مینا شد. دو الیاف بارچپ و امباس در مقایسه با الیاف شیشه، رفتار نرم شدگی تغییر مکانی بیشتری بعد از ترک خوردگی از خود نشان دادند. میزان جذب انرژی نمونه ها، با افزایش درصد حجمی الیاف، افزایش یافت که این افزایش برای الیاف بارچپ از الیاف امباس بیشتر بود. بهترین رفتار پس از ترک خوردگی را الیاف بارچپ با درصد وزنی ۰/۵ از خود نشان داد.

اطلاعات مقاله

نوع مقاله: مقاله پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۸/۰۵

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۲/۰۳/۲۸

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۳/۲۹

کلیدواژه ها:

بتن غلتکی،
مشخصات مکانیکی،
الیاف غیر فولادی،
روسازی،
طاق.

استناد: عرب یارمحمدی، حسین؛ شربتدار، محمد کاظم؛ و نادرپور، حسین. (۱۴۰۲). بررسی آزمایشگاهی اثر الیاف غیر فولادی بر کار آیی و مشخصات مکانیکی و طاق بتن غلتکی روسازی، پژوهش های زیرساخت های عمرانی، ۹(۲)، ۱۷-۳۳.

<https://doi.org/10.22091/cer.2023.8714.1435>



۱- مقدمه

تأثیر عوامل مختلف بر خواص فیزیکی و مهندسی RCC انجام شده است که یکی از مهمترین آنها افزودن انواع الیاف به این نوع بتن بوده است [۴-۶].

انواع بسیاری از الیاف برای استفاده تجربی در دسترس هستند. الیاف مورد استفاده در بتن چهار نوع اصلی دارند که عبارتند از: الیاف مصنوعی، الیاف فولادی، الیاف شیشه و الیاف طبیعی. استفاده از الیاف به دلیل چندین اثر مثبت که باعث بهبود برخی از خواص RCC مانند مقاومت خمشی و کششی، دوام و ظرفیت انتقال بار می‌شود، ترجیح داده می‌شود. همچنین، تقویت RCC می‌تواند ضخامت دال روسازی را کاهش داده و طاقبت و کنترل ترک را فراهم کند. این بهبود خواص تحت تأثیر پارامترهای مختلف از جمله نوع، درصد حجمی، بافت سطحی، طول و استحکام کششی الیاف است [۷].

بسیاری از محققان اثرات متنوع افزودن الیاف را در خواص مهندسی RCC ارزیابی کرده‌اند. یلدیزل^۳ و همکاران، خواص مکانیکی و مقاومت سایشی RCC تقویت شده با الیاف شیشه را بررسی کردند. آنها دریافتند که افزودن الیاف شیشه، مقدار آب مورد نیاز برای مخلوط‌های RCC را افزایش می‌دهد و تنها تا حدودی بر مقاومت فشاری و خمشی تأثیر می‌گذارد [۸]. بنواداه^۴ و همکاران، خواص مکانیکی و فیزیکی RCC را با الیاف پلی پروپیلن (P.P)^۵ مورد مطالعه قرار دادند. نتایج آنها نشان داد که افزودن الیاف باعث کاهش چگالی و کارایی RCC می‌شود. همچنین، آنها به این نتیجه رسیدند که استفاده از الیاف P.P در RCC نتایج قابل قبولی از نظر مقاومت مکانیکی دارد [۹]. نوروزی و همکاران، اثر الیاف فولادی بازیافتی، سنگدانه PET و متاکائولین را بر روی خواص RCC بررسی کردند. آنها اثر الیاف فولادی بازیافتی را بر مقاومت فشاری و خمشی انجام دادند که به مقدار

بتن، به‌طور کلی، محصولی است که از سیمان، آب و سنگدانه‌ها ساخته می‌شود و گاهی اوقات یک ماده اضافی که به عنوان ماده افزودنی شناخته می‌شود، برای اصلاح برخی خواص بتن اضافه می‌شود [۱]. خواص مواد و پارامترهای اختلاط بر عملکرد بتن تأثیر می‌گذارد و لازم است برای بهبود ویژگی‌های تازه و سخت‌شده بتن در نظر گرفته شود [۲]. الیاف به عنوان افزودنی در مصالح ساختمانی به عنوان وسیله‌ای برای افزایش خواص آنها در حالت تازه و سخت شده استفاده می‌شود. حضور الیاف باعث بهبود انعطاف‌پذیری مخلوط‌ها و همچنین پایداری حجم می‌شود و از ایجاد ترک‌ها جلوگیری می‌کند [۳]. الیاف مختلف می‌توانند به واکنش‌های متفاوتی در رابطه با خواص مکانیکی یا رفتار دوام بتن منجر شوند.

بتن غلتکی (RCC)^۱ که نوعی بتن خشک با اسلامپ صفر است، دو کاربرد اصلی دارد: روسازی (RCCP)^۲ و سدها. با این حال، با توجه به مزایایی مانند کاهش هزینه، حرارت کم هیدراتاسیون، دوام و سرعت بالای اجرا، RCC به ویژه در ساخت فرودگاه‌ها، سایت‌های نظامی و نیروگاه‌های هسته‌ای به‌کار گرفته شده است. همچنین شایان ذکر است که RCC برخلاف بتن معمولی نیازی به قالب‌گیری و پرداخت سطحی ندارد. این مخلوط نسبتاً سفت از سنگدانه‌ها، خمیر سیمان و آب کم است که عموماً توسط ماشین‌آلات و تجهیزات روسازی آسفالت ریخته می‌شود. در فرآیند طراحی و ساخت RCC، پارامترهای متعددی بر خواص تازه و سخت‌شده آن تأثیر می‌گذارد. این پارامترها شامل تراکم محصول نهایی، مقدار آب، محتوای مواد سیمانی، مقدار مواد ریزتر از ۷۵ میکرومتر، درجه‌بندی و کیفیت سنگدانه‌ها و مواد افزودنی است. در طول سال‌ها، تحقیقات قابل توجهی برای بررسی

³ - Yildizel

⁴ - Benouadah

⁵ - Polypropylene

¹ - Roller Compacted Concrete

² - Roller Compacted Concrete Pavement

مخلوط‌های بتنی حاوی ترکیب پودر لاستیک ضایعاتی و الیاف‌های مصنوعی اقدام کردند [۱۵].

همچنین در مطالعه دیگر، اثرات الیاف مصنوعی و فولادی بر روی خواص مکانیکی RCC بررسی شده و نشان داده شد که الیاف مقاومت خمشی کاهش یافته اما مقاومت فشاری و همچنین طاقت خمشی افزایش می‌یابد [۱۶]. سوکنتاسوکول^۹ و همکاران، کاربرد الیاف فولادی در RCC را مورد مطالعه قرار دادند. نتایج آنها نشان داد که روسازی بتن غلتکی الیافی خواص خمشی بالاتری از جمله بار خمشی، طاقت خمشی و استحکام باقی‌مانده را دارد [۱۷]. همچنین لازم به ذکر است که نفوکلئوس^{۱۰} و همکاران، از الیاف فولادی از لاستیک زباله در RCC استفاده کردند. نتایج به دست آمده نشان داد که با افزایش درصد حجمی الیاف، مقدار آب افزایش و مقاومت فشاری کاهش می‌یابد [۱۸]. محققان اثرات کاربرد دو نوع الیاف فولاد و پلی‌پروپیلن با پوزولان‌ها را بر روی خواص RCC بررسی کردند [۱۹]. در پژوهشی دیگر، بررسی اثر قطر و درصد حجمی الیاف فولادی قلابدار بر خواص RCC پرداخته شد. بر مبنای نتایج محققان، نمودار نیرو- تغییرمکان و در نتیجه طاقت بهبود چشمگیری نشان داده شد [۲۰].

با وجود مطالعات قبلی برای بررسی اثر استفاده از الیاف بر خواص RCC، مطالعات محدودی در مورد تأثیر الیاف غیرفولادی بر خواص مهندسی RCC وجود دارد. هدف اصلی این تحقیق، برنامه آزمایشگاهی ارزیابی اثر نوع و درصد حجمی الیاف غیرفولادی بر خواص مهندسی RCC می‌باشد. برای این منظور، برای تعیین خواص مهندسی RCC، آزمایش‌های زمان Vebe، مدول الاستیسیته و همچنین مقاومت فشاری، مقاومت خمشی و مقاومت کششی دو نیم شدن انجام شد.

سنگدانه‌های PET در مخلوط بستگی دارد و مقاومت کششی دونیم‌شدن افزایش می‌یابد [۱۰]. پژوهشگران اثر الیاف ماکروسنتتیک، محتوای سیمان و مقدار آب را بر خواص مکانیکی RCC بررسی کردند. آنها از الیاف ماکرو مصنوعی پلی اتیلن از صفر تا ۰/۵ درصد حجمی استفاده کردند. نتایج به دست آمده آنها که توسط RSM آنالیز شد، نشان داد افزودن الیاف به RCC باعث افزایش زمان وی بی^۶ و انرژی مورد نیاز برای تراکم می‌شود. علاوه بر این، آنها دریافتند که افزودن الیاف به RCC به طور قابل توجهی بر استحکام فشاری تأثیر نمی‌گذارد، در حالی که الیاف ماکروسنتتیک پتانسیل بسیار مثبتی در بهبود مقاومت خمشی و باقی‌مانده RCC دارد [۱۱]. آشتیات^۷ و همکاران، کاربرد ضایعات سیمان سفید (WCBPD^۸) را به عنوان جایگزین جزئی از سیمان با افزودن الیاف پلی‌پروپیلن در RCC ارزیابی کردند. مدول الاستیسیته، سرعت پالس اولتراسونیک، مقاومت فشاری و خمشی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج آنها نشان داد که افزودن الیاف خواص مکانیکی و دوام مخلوط‌های RCC را با WCBPD افزایش می‌دهد [۱۲]. علاوه بر این، احمدی و همکاران، اثر الیاف پلی‌پروپیلن بر شکست و عملکرد مکانیکی RCC را بررسی کردند. آنها گزارش دادند که افزودن ۰/۴ درصد الیاف پلی‌پروپیلن به مخلوط باعث کاهش قوام آن شده و تأثیر معناداری بر مقاومت فشاری و خمشی RCC ندارد [۱۳]. روح الامینی و همکاران، خواص شکست RCC تقویت شده با الیاف هیبریدی را بررسی کردند. آنها نشان دادند که استحکام باقیمانده RCC با الیاف پلی‌پروپیلن و هیبریدی کمتر از الیاف فولادی با درصد حجمی مشابه است [۱۴]. محققان به بررسی آزمایشگاهی مقاومت‌های مکانیکی و سازه‌ای

^۶- Vebe time

^۷- Ashteyat

^۸- White cement bypass dust

^۹- Sukontasukkul

^{۱۰}- Neocleous

۲- برنامه آزمایشگاهی

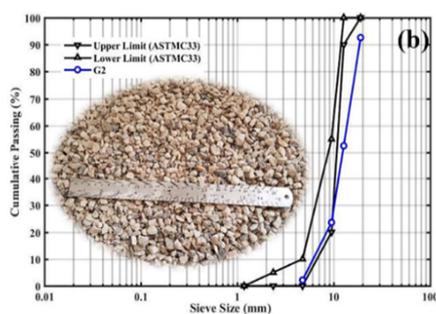
۲-۱- مواد، مصالح و آماده سازی نمونه ها

مواد مورد استفاده در این تحقیق، سیمان پرتلند نوع II، دو نوع سنگدانه درشت خرد شده، ماسه و آب می باشد. سیمان پرتلند نوع II محصول کارخانه سیمان شاهرود، دارای چگالی مخصوص ۳/۱۵ گرم بر سانتیمترمکعب و نرمی ۳۰۵۵ سانتیمترمربع بر گرم

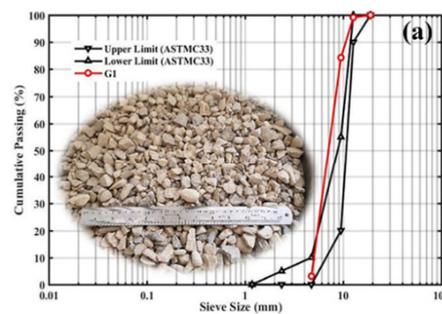
براساس استاندارد ASTM C150 می باشد [۲۱]. مشخصات سیمان مصرفی در جدول ۱ آورده شده است. دو نوع سنگدانه درشت خرد شده به ترتیب G1 و G2 با اندازه ۴/۷۵ تا ۱۲ میلیمتر و ۱۲ تا ۱۹ میلیمتر و ماسه ای با اندازه دانه در محدوده صفر تا ۴/۷۵ میلیمتر براساس ASTM C33 استفاده شدند، که نمودار منحنی دانه بندی و تصویر سنگدانه های مورد استفاده در شکل ۱ آمده است [۲۲].

جدول ۱- مشخصات سیمان مصرفی

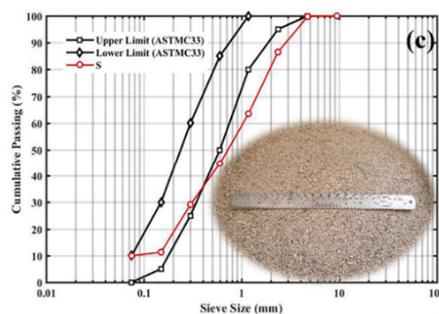
وزن مخصوص	سطح مخصوص بلین (cm ² /gr)	افت حرارتی (%)	انبساط اتوکلاو (%)	زمان گیرش (دقیقه)	
				اولیه	نهایی
۳/۱۵	۳۰۵۵	۲/۴۲	۰/۰۴۶	۱۴۵	۲۲۵



(ب)



(الف)



(پ)

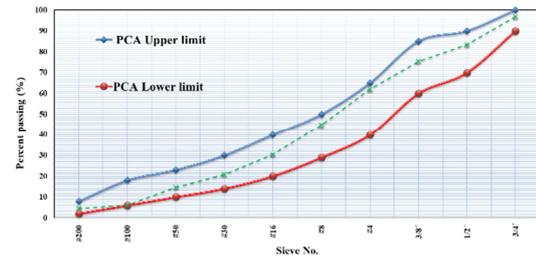
شکل ۱- منحنی دانه بندی سنگدانه ها

دانه بندی سنگدانه ها استفاده شده است [۲۳]. شکل ۲ منحنی دانه بندی ترکیب سنگدانه های مورد استفاده در طرح مخلوط مبنا بر مبنای استاندارد PCA را نشان می دهد. دو نوع الیاف پلی پروپیلن ماکرو مصنوعی با خواص هندسی متفاوت شامل بارچپ و امباس و یک الیاف میکرو شیشه جهت افزودن به RCC استفاده گردید. الیاف بارچپ و شیشه محصول کارخانه ایران

سنگدانه ها ۷۵ تا ۸۵ درصد از درصد حجمی RCC را تشکیل می دهند و انتخاب مناسب آن می تواند بر خواص تازه و سخت شده محصول نهایی تأثیر بگذارد. انواع استانداردها و دستورالعملها الزامات درجه بندی سنگدانه ها برای RCC را تعیین می کنند. در مطالعه حاضر از الزامات انجمن سیمان پرتلند (PCA¹¹) برای

11- Portland Cement Association

الیاف و الیاف امباس محصولی از کارخانه نانو نخ سیرجان هستند.



شکل ۲- منحنی دانه‌بندی ترکیب سنگدانه‌های طرح مبنا

جدول ۲- مشخصات الیاف مصرفی

نوع الیاف	چگالی (گرم بر سانتیمتر مکعب)	مدول الاستیسیته (مگاپاسکال)	مقاومت کششی (مگاپاسکال)	طول (میلیمتر)	قطر (میلیمتر)	جنس
امباس کورتا	۰/۹۱	۶۰۰۰	۴۵۰-۸۰۰	۴۰	۰/۴	پلی پروپیلن (کوپلیمر اصلاح شده)
بارچیپ	۰/۹۱	۱۲۰۰۰	۶۴۰	۴۸	۰/۶	پلی اولفین
شیشه	۲/۶۰	۷۲۰۰۰	۲۰۰۰	۲۵	۰/۰۲	شیشه



(ب)



(الف)



(پ)

شکل ۳- الیاف مصرفی

فشرده گردیدند [۲۴]. در شکل ۴ تصاویری از ساخت نمونه‌ها آمده است. پس از ۲۴ ساعت، قالب نمونه‌ها باز و به مدت ۲۸ روز در مخزن آب نگهداری شدند. مشخصات نمونه‌ها و حجم بتن مورد استفاده در جدول ۳ ارائه شده است.

نمونه‌ها در سه لایه با استفاده از میز ارتعاشی ریخته شدند که هر لایه با اضافه بار به منظور القای تنش 0.046 مگاپاسکال با جرم شفت فلزی $3/68$ کیلوگرم براساس ASTM C1176 برای نمونه‌های استوانه و یک منشور فلزی با جرم 17 کیلوگرم برای نمونه‌های منشوری

۲-۲- طرح مخلوط و روش های آزمایش

درصد حجمی از هر الیاف در کل حجم نمونه به میزان ۰/۱، ۰/۳ و ۰/۵ درصد استفاده گردید. طرحها با الیاف به صورت B-FRCC برای الیاف بارچپ، E-FRCC برای امباس و G-FRCC برای شیشه بود که درصد الیاف هر طرح در انتهای نام هریک آمده است.

طرح مخلوط مینا براساس مطالعه عرب یارمحمدی و همکاران در نظر گرفته شد [۴]. طرح اختلاط مخلوط مینا و مشخصات مکانیکی آن در جداول ۴ و ۵ آمده است. به منظور بررسی اثر نوع الیاف و درصد حجمی الیاف، سه



شکل ۴- نحوه ساخت نمونهها

جدول ۳- تعداد و مشخصات نمونهها

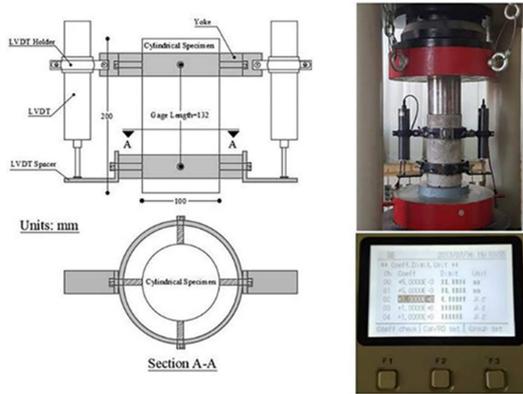
نام آزمایش	شکل قالب	تعداد	ابعاد (میلیمتر)	حجم ساخت (لیتر)
کارایی (زمان وی بی)	حجم ظرف دستگاه مطابق استاندارد ASTM C1170			۱۰
مقاومت فشاری و مدول الاستیسیته	استوانه‌ای	۳	۱۰۰×۲۰۰	۴/۸۰
مقاومت کششی دونیم شدن	استوانه‌ای	۳	۱۰۰×۲۰۰	۴/۸۰
مقاومت خمشی چهار نقطه ای	تیر منشوری	۳	۱۰۰×۱۰۰×۳۵۰	۱۰/۵۰
حجم بتن در هر اختلاط				
				۳۰

جدول ۴- مشخصات طرح مینا

نام طرح	نسبت آب به سیمان		درصد ترکیب سنگدانه ها		سیمان (کیلوگرم)	شن (کیلوگرم)		ماسه (کیلوگرم)
	آب	سیمان	شن	ماسه		G1	G2	
مینا	۰/۴۰		۴۰	۶۰	۳۵۰	۵۴۰/۸۴	۲۳۱/۷۹	۱۱۵۸/۹۳

جدول ۵- خصوصیات مکانیکی طرح مینا

نام طرح	زمان وی بی (ثانیه)	مقاومت فشاری (مگاپاسکال)	مدول الاستیسیته (گیگاپاسکال)	مقاومت خمشی (مگاپاسکال)	مقاومت کششی (مگاپاسکال)
مینا	۲۵	۳۰/۳۰	۲۷/۸۷	۴/۶۸	۳/۰۲



شکل ۷- چیدمان آزمایش مقاومت فشاری و مدول الاستیسیته

برای ارزیابی استحکام کششی، یک آزمایش کششی دونیم شدن براساس ASTM C496 انجام شد [۲۸]. همچنین برای تعیین استحکام خمشی، طاقت شکست و مقاومت‌های باقیمانده، تست خمش سه نقطه‌ای بر مبنای استاندارد ASTM C1609 انجام شد [۲۹].

آزمون خمش سه نقطه‌ای در حالت کنترل نیرو با نرخ ۰/۱۰ انجام شد. یک سیستم اکتساب داده با نرخ نمونه ۱ هرتز توسط دو مبدل جابه‌جایی متغیر خطی (LVDT^{۱۲}) برای ثبت نیرو و جابه‌جایی در طول تست‌های فشاری و مقاومت خمشی مورد استفاده قرار گرفت. تجهیزات آزمایش برای استحکام کششی و خمش سه نقطه‌ای در شکل ۸ نشان داده شده است.



شکل ۸- تصاویر آزمایش مقاومت کششی و خمشی

نحوه اختلاط مصالح در آزمایشگاه برای حجم ۳۰ لیتر (حجم مورد نیاز کل نمونه‌ها) در دو سری ساخت ۱۵ لیتری مطابق شکل ۵ انجام گردید.

سنگدانه	→	دقیقه ۳
	↓	
سیمان	→	دقیقه ۳
	↓	
آب	→	دقیقه ۳
	↓	
مخلوط	→	دقیقه ۳
	↓	
الیاف	→	دقیقه ۳
	↓	
مخلوط	→	دقیقه ۳

شکل ۵- نحوه ساخت بتن غلتکی

آزمون کارایی براساس استاندارد ASTM C1170 انجام شد [۲۵]. شکل ۶ تجهیزات تست زمان Vebe را نشان می‌دهد.



شکل ۶- تجهیزات تست زمان وی بی

تست‌های مقاومت فشاری و مدول الاستیسیته به ترتیب براساس ASTM C39 و ASTM C469 پس از ۲۸ روز انجام شد [۲۶ و ۲۷]. تجهیزات آزمون برای مقاومت فشاری و مدول الاستیسیته در شکل ۷ نشان داده شده است. این آزمایش با سرعت ۰/۱۰ میلیمتر در دقیقه انجام شد و مقدار متوسط برای محاسبه کرنش استفاده شد.

¹²- Linear Variable Displacement Transducers

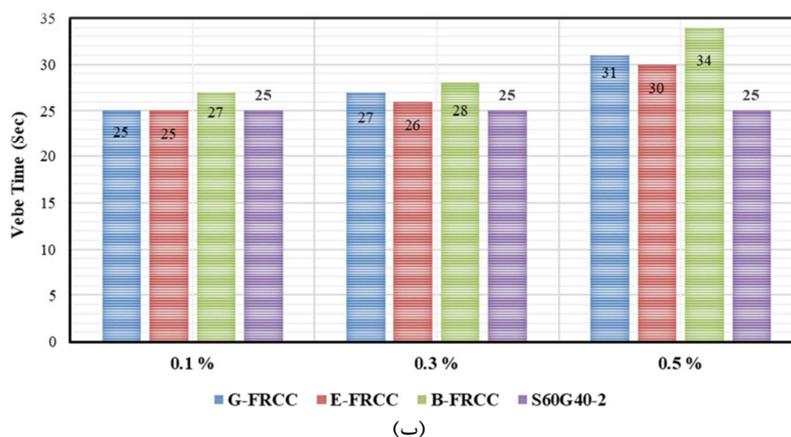
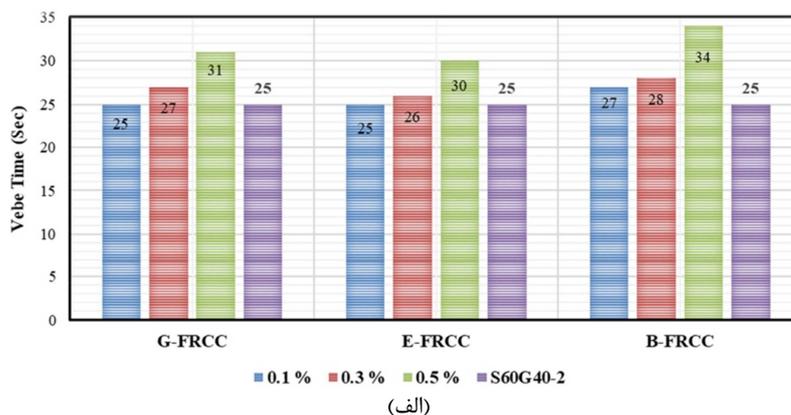
۳- تجزیه و تحلیل نتایج

همانطور که اشاره شد به منظور بررسی نوع و میزان الیاف غیر فولادی انتخاب شده بر مشخصات مکانیکی بتن غلتکی، آزمایش‌های زمان وی بی، مقاومت فشاری، مدول الاستیسیته، مقاومت خمشی و مقاومت کششی دو نیم شدن روی نمونه‌ها انجام گردید.

۳-۱- کارایی

بهترین محدوده برای زمان وی بی مخلوط روسازی RCC زمانی بین ۳۰ تا ۴۰ ثانیه است. زمان وی بی، بسیار بالا باعث کارکرد نامناسب غلتک و سختی پرداخت نهایی بتن خواهد شد. نتایج نشان داد که با اضافه شدن

الیاف به‌ویژه در درصد‌های بالاتر، میزان آب بیشتری جهت رسیدن به محدوده مناسب زمان وی بی لازم است در نتیجه اضافه شدن الیاف باعث کاهش کارایی و افزایش زمان وی بی مخلوط گردید. اثر الیاف بر زمان وی بی در شکل ۹ آمده است. برای این تأثیر منفی الیاف بر کارایی بتن غلتکی دو دلیل عمده می‌توان بیان نمود. اول اینکه الیاف در مخلوط تشکیل شبکه داده و از جدا شدن و جریان یافتن بتن جلوگیری می‌کند. از طرفی، مقدار قابل توجهی ملات سیمان به دلیل سطح ویژه بالای الیاف به الیاف می‌چسبد و باعث افزایش ویسکوزیته مخلوط بتن و در نهایت، کاهش کارایی می‌شود.



شکل ۹- اثر الیاف بر زمان وی بی، (الف) اثر نوع الیاف و (ب) اثر درصد الیاف

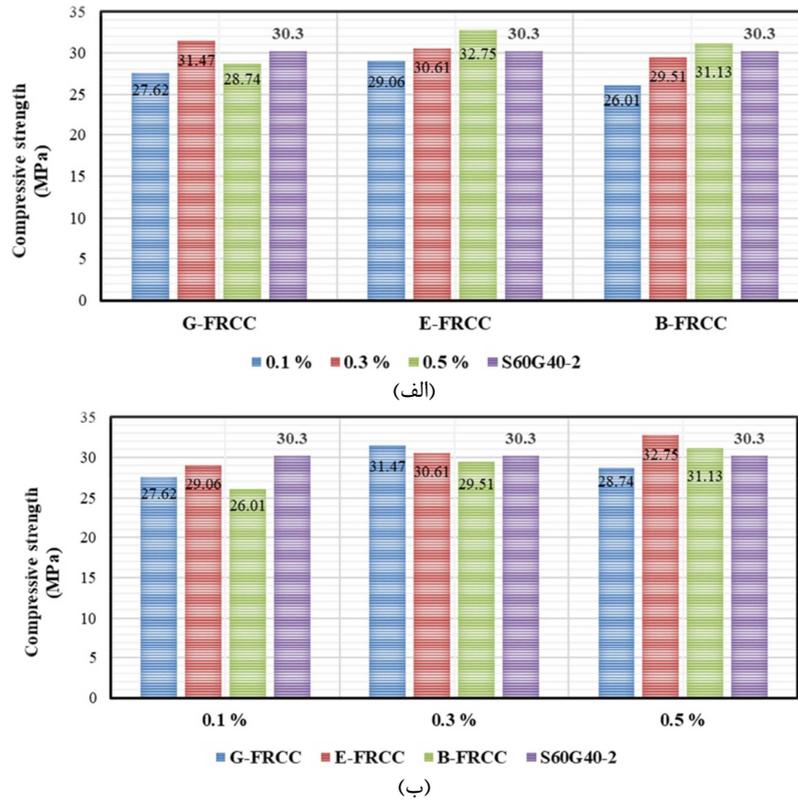
داد که با افزودن الیاف بارچیب زمان وی بی طرح در محدوده مجاز زمان وی بی روسازی قرار می‌گیرد.

۳-۲- مقاومت فشاری

نتایج نشان داد که میزان کارایی بتن غلتکی مستقل از نوع الیاف و وابسته به میزان آن در مخلوط بتن است. در بین الیاف این تحقیق، الیاف بارچیب بیشترین تأثیر را بر زمان وی بی بتن غلتکی گذاشت. نتایج نشان

فشاری کاهش و در برخی دیگر افزایش یافت. این نتایج در بررسی تحقیقات مختلف ارائه شده است [۱۱، ۳۰-۳۲].

در شکل ۱۰، اثر انواع و میزان الیاف بر مقاومت فشاری بتن غلتکی ارائه شده است. نتایج نشان داد که تغییر نوع و مقدار الیاف تأثیر معناداری بر مقاومت فشاری RCC ندارد. به طوری که در برخی از مخلوطها مقاومت



شکل ۱۰- اثر الیاف بر مقاومت فشاری، (الف) اثر نوع الیاف و (ب) اثر درصد الیاف

مگاپاسکال و ϵ_2 کرنش متناظر با تنش معادل با 0.4 مقاومت فشاری برحسب میلیمتر بر میلیمتر است:

$$E_c = \frac{S_2 - S_1}{\epsilon_2 - 0.00005} \quad (1)$$

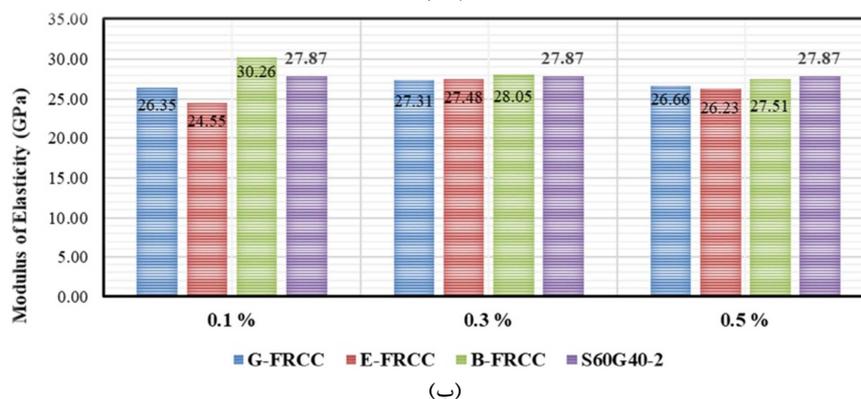
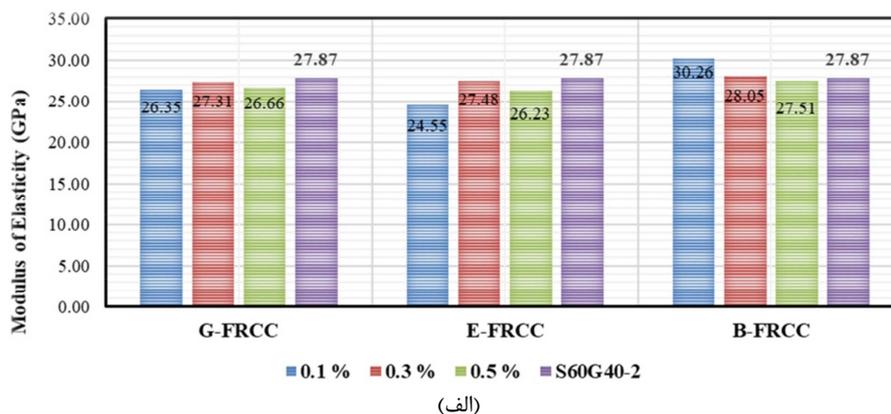
۳-۴- مقاومت کششی دو نیم شدن

مقاومت کششی یکی از مهمترین ویژگی‌های بتن محسوب می‌شود. برای تعیین این مقاومت، روش‌های مستقیم و غیرمستقیمی وجود دارد که انجام آزمایش کشش مستقیم به دلیل تمرکز تنش‌های محلی بسیار مشکل است. مقاومت کششی بتن با روش آزمایش خمش و دونیم شدن تعیین می‌شود. آزمایش دونیم شدن روشی ساده است که اغلب از آن برای اندازه‌گیری مقاومت کششی بتن استفاده می‌گردد.

۳-۳- مدول الاستیسیته

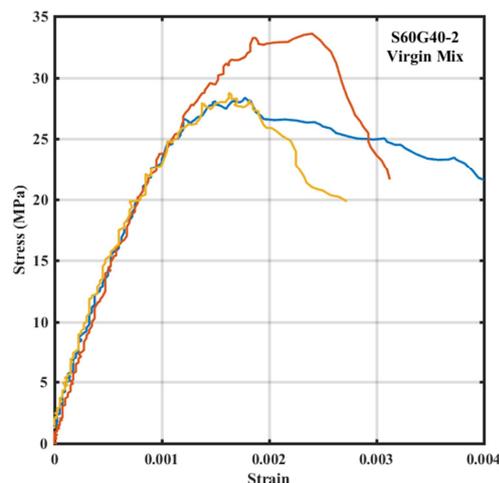
نتایج به‌دست آمده از اثر نوع و میزان الیاف بر مدول الاستیسیته در شکل ۱۱ نمایش داده شده است. بررسی نتایج مشخص نمود که افزودن الیاف به مخلوط بتن تأثیر معنی‌داری بر مدول الاستیسیته نداشته و نوسان در نتایج مشاهده گردید.

نمودار تنش- کرنش طرح مبنا در شکل ۱۲ آمده است. همچنین نمودارهای تنش- کرنش نمونه‌های الیافی با الیاف بارچیب در شکل ۱۳ ارائه شده است. مقدار مدول الاستیسیته از رابطه (۱) محاسبه گردید که در این رابطه، E_c مدول الاستیسیته نمونه برحسب مگاپاسکال، S_1 تنش متناظر با کرنش 0.00005 برحسب مگاپاسکال، S_2 تنش معادل با 0.4 مقاومت فشاری برحسب



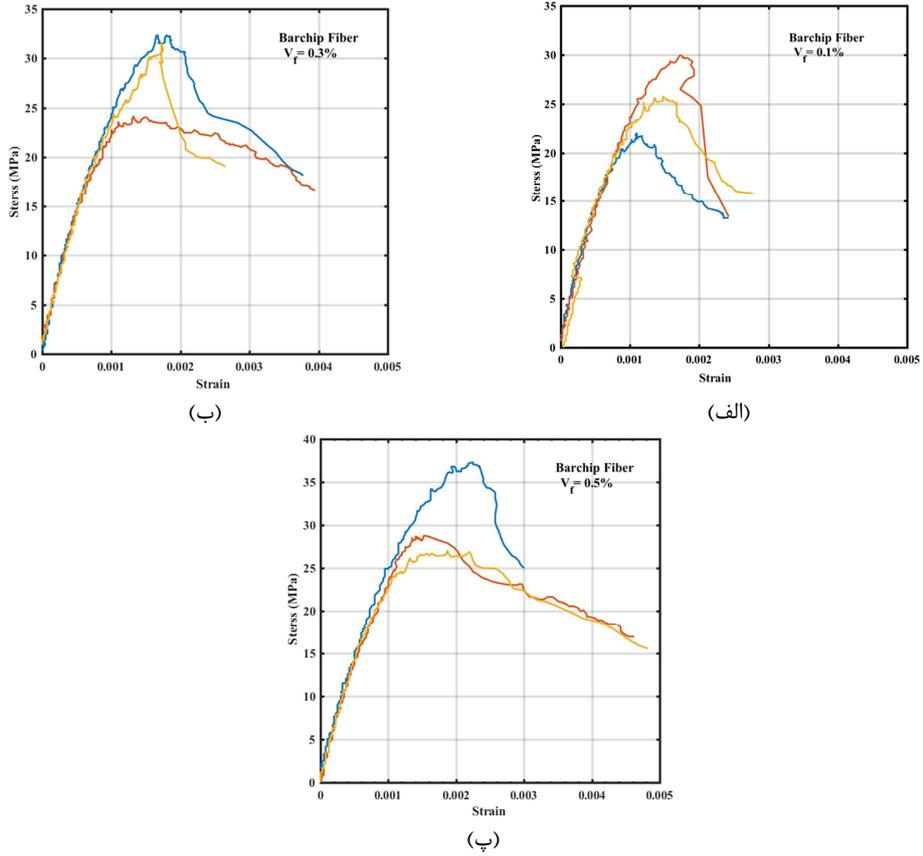
شکل ۱۱- اثر الیاف بر مدول الاستیسیته، (الف) اثر نوع الیاف و (ب) اثر درصد الیاف

جهت‌گیری الیاف در بتن می‌باشد که این موضوع به دلیل تأثیر تعداد الیاف در محل گسیختگی و جهت‌گیری آنها، نتایج آزمایش را تحت تأثیر قرار می‌دهد. در شکل ۱۴ تأثیر نوع و میزان الیاف مصرفی بر روی مقاومت کششی بتن آمده است. افزودن الیاف موجب افزایش مقاومت کششی طرح مبنا تا ۲۰٪ شده است و از طرفی با افزایش میزان الیاف در مخلوط مقاومت کششی افزایش یافته است، اما این افزایش‌ها به میزان قابل‌توجهی نبوده که دلیل آن را می‌توان در تأثیر منفی الیاف بر میزان تراکم بتن غلتکی که عامل تعیین‌کننده در خصوصیات بتن غلتکی می‌باشد، یافت. این نکته قابل ذکر است که انجام آزمایش مقاومت کششی دونیم شدن به صورت نیرو-کنترل صورت گرفته و اثر الیاف به خوبی قابل مشاهده نبود، چرا که با افت نیرو، آزمایش متوقف می‌گردد. به‌طور کلی اثر الیاف در بعد از ترک‌خوردگی مشخص و مشهود خواهد بود.

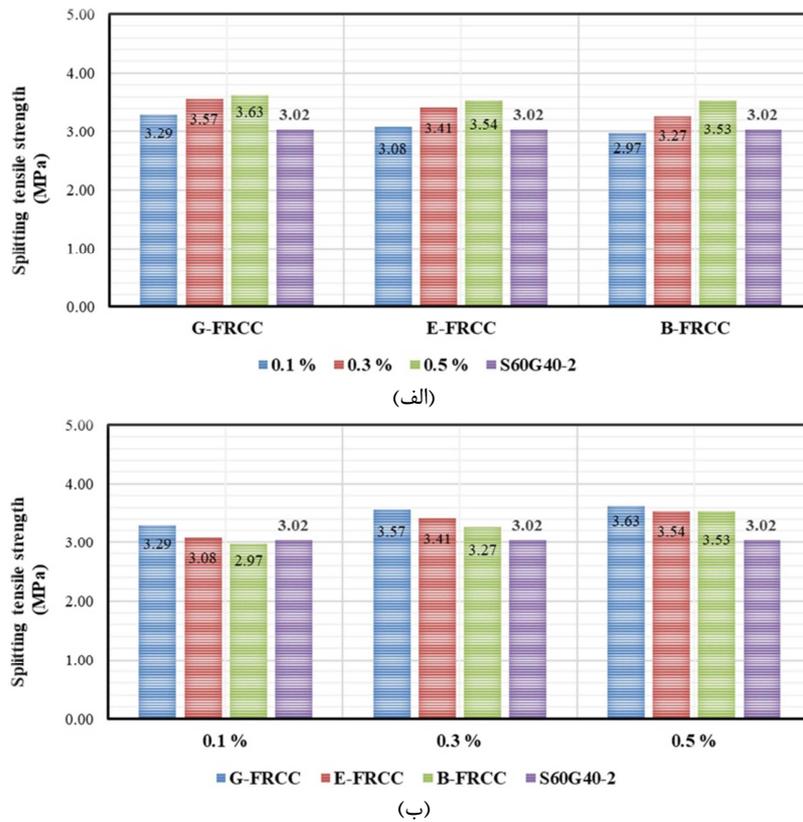


شکل ۱۲- نمودار تنش کرنش طرح مبنا

در بتن غلتکی الیافی مشخص نمودن مقاومت کششی با مشکلات بیشتری نسبت به بتن بدون الیاف همراه است زیرا که مصالح نه کامل ترد می‌باشند و نه ایزوتروپ. آزمایش فقط تا لحظه وقوع اولین ترک نتایج دقیقی از مشخصات نمونه را نشان می‌دهد چراکه بعد از ایجاد اولین ترک، نحوه توزیع تنش نامشخص است. غیر ایزوتروپ بودن بتن الیافی ناشی از توزیع نامشخص و نحوه



شکل ۱۳- نمودار تنش کرنش نمونه‌های الیافی بارچیپ، (الف) درصد حجمی ۰/۱، (ب) درصد حجمی ۰/۳ و (پ) درصد حجمی ۰/۵ درصد



شکل ۱۴- اثر الیاف بر مقاومت کششی، (الف) اثر نوع الیاف و (ب) اثر درصد الیاف

۳-۵- مقاومت خمشی و رفتار نرم‌شدگی تغییرمکانی

مقاومت خمشی نسبت به طرح مبنا گردید، در صورتی که در هر طرح با افزایش میزان الیاف، مقاومت خمشی افزایش نشان داد. همچنین بهترین رفتار پس از ترک‌خوردگی را الیاف بارچپ با درصد وزنی ۰/۵ از خود نشان داد در حالی که الیاف شیشه دارای شکست ترد و بدون رفتار بعد از ترک‌خوردگی بود.

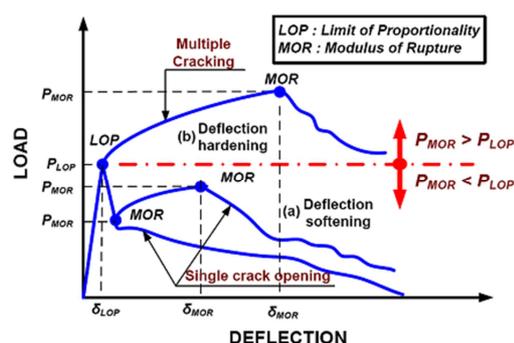
نمودارهای نیرو- تغییرمکان بهترین نمونه هریک از طرح‌های الیافی و مقایسه رفتار آنها در شکل ۱۸ آمده است.

۳-۶- طاقبت و جذب انرژی بتن‌های الیافی

بررسی تأثیر نوع و درصد حجمی الیاف بر تنش‌های خمشی (ظرفیت باربری)، جذب انرژی (طاقبت) و سایر پارامترهای رفتار نرم‌شدگی تغییرمکانی برای نمونه‌های با الیاف بارچپ و امباس در درصدهای مختلف انجام شده است. همانطور که در شکل‌ها قابل مشاهده است افزایش درصد الیاف در هر دو نوع الیاف بارچپ و امباس تأثیری بر میزان تنش در نقطه حد، تناسب نداشته و تغییرات قابل ملاحظه تنش خمشی بعد از این نقطه رخ داد. این مطلب بیانگر این است که الیاف در رفتار قبل از ترک‌خوردگی بتن غلتکی نداشته و بیشترین تأثیر آنها بعد از ایجاد ترک و از طریق پل‌زنی بین سطوح ترک مشاهده گردیده است.

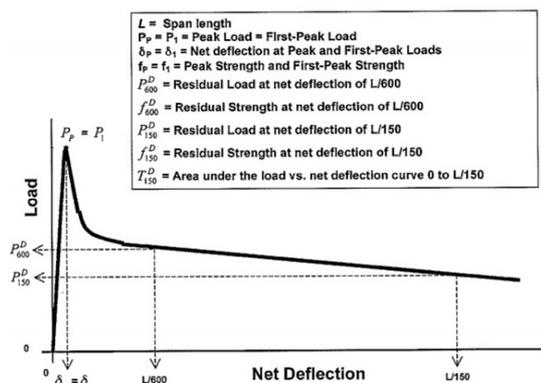
کاربرد مصالح با قابلیت جذب انرژی بالا می‌تواند سبب کاهش خطرات ناشی از بارهای دینامیکی شود، بنابراین مقایسه این کمیت در درک بهتر رفتار بتن غلتکی روسازی اهمیت خواهد داشت. سطح زیر منحنی نیرو- تغییرمکان تا نقطه‌ای مشخص، به‌عنوان میزان جذب انرژی تعریف می‌شود. همانطور که در شکل ۱۸ مشاهده می‌شود میزان جذب انرژی نمونه‌های با الیاف با افزایش درصد حجمی الیاف، افزایش یافته است و این مقادیر برای الیاف بارچپ از الیاف امباس بیشتر بوده است. بیشترین تأثیر افزایش درصد حجمی الیاف در نقطه $L/150$ مشاهده گردید.

رفتار بتن مسلح شده به الیاف را می‌توان به دو دسته نرم‌شدگی و سخت‌شدگی تغییرمکانی طبقه‌بندی نمود. در آزمایش خمش، مصالحی با رفتار سخت‌شدگی تغییرمکانی شناخته می‌شوند که بعد از ترک‌خوردگی، ظرفیت باربری بیشتری از خود نشان دهند. انواع رفتار بتن مسلح به الیاف در شکل ۱۵ آمده است.



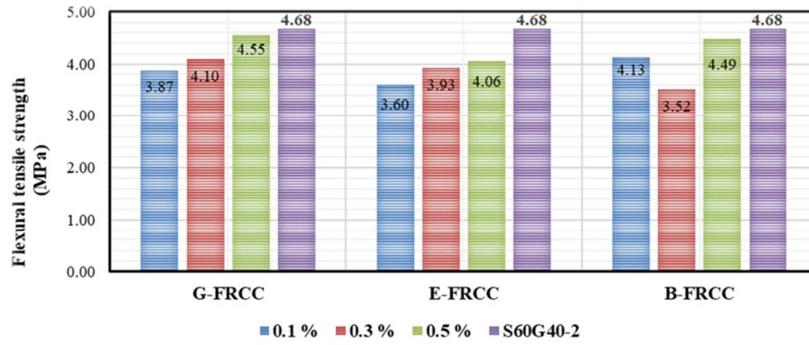
شکل ۱۵- نمودار نیرو- تغییرمکان بتن مسلح به الیاف [۳۳]

در این مطالعه که از الیاف غیر فولادی استفاده شده، رفتار سخت‌شدگی تغییرمکانی مشاهده نگردید. اول اینکه این رفتار عمدتاً در میزان الیاف بالا حاصل می‌گردد و دوماً در مطالعات گذشته که از این نوع الیاف استفاده شده است، رفتار سخت‌شدگی مشاهده نشده است. رفتار نرم‌شدگی تغییرمکانی و پارامترهای مختلف آن مطابق استاندارد ASTM C1609 در شکل ۱۶ آمده است.

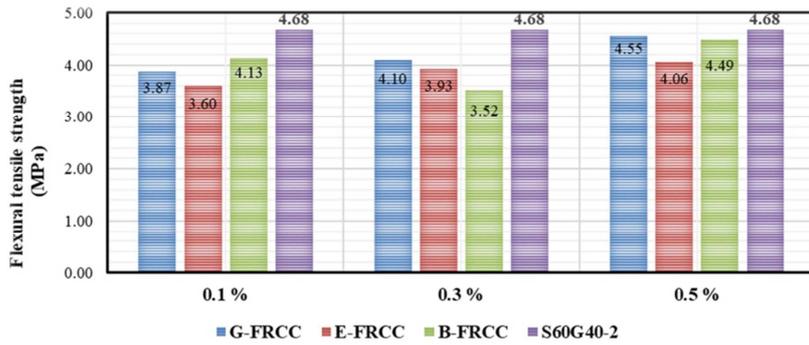


شکل ۱۶- رفتار نرم‌شدگی تغییرمکانی [۲۹]

نتایج و تأثیر میزان و نوع الیاف بر مقاومت خمشی بتن غلتکی در شکل ۱۷ آمده است. در اکثر نمونه‌ها، افزودن الیاف و افزایش میزان آن باعث کاهش جزئی

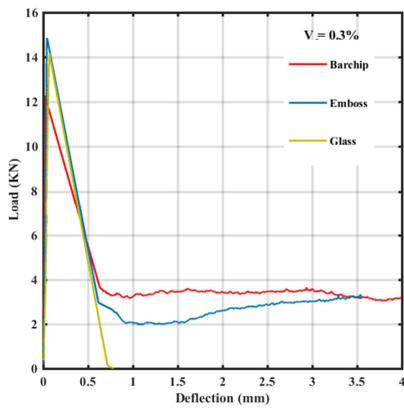


(الف)

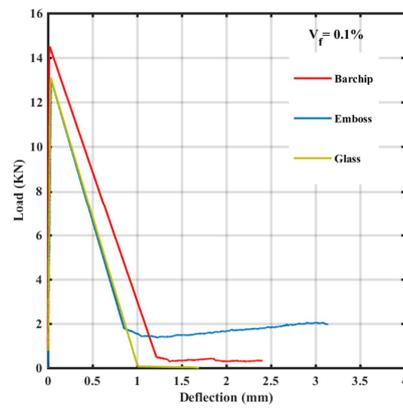


(ب)

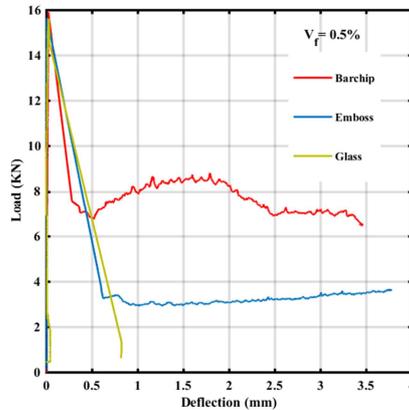
شکل ۱۷- اثر الیاف بر مقاومت خمشی، (الف) اثر نوع الیاف و (ب) اثر درصد الیاف



(ب)



(الف)

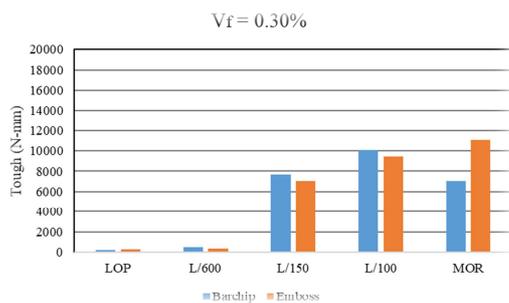


(پ)

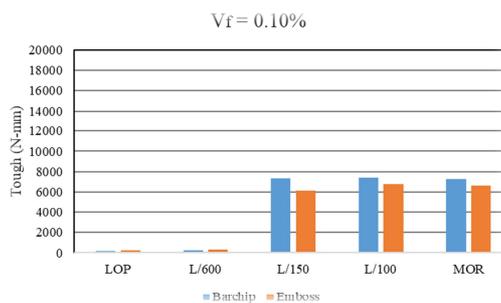
شکل ۱۸- نمودار نیرو- تغییرمکان نمونه‌ها، (الف) درصد حجمی ۰/۱، (ب) درصد حجمی ۰/۳ و (ج) درصد حجمی ۰/۵ درصد

همانطور که در اشکال قابل مشاهده است میزان جذب انرژی در هر دو نوع الیاف با افزایش درصد حجمی الیاف، افزایش داشته است و در درصد حجمی ۰/۱ درصد تفاوت چندانی بین مقادیر دو نوع الیاف مشاهده نگردید. با مقایسه نمودارهای فوق به وضوح قابل دریافت است که درصدهای حجمی الیاف و نوع آن در شکل پذیری بتن غلتکی روسازی تأثیر بسزایی دارند.

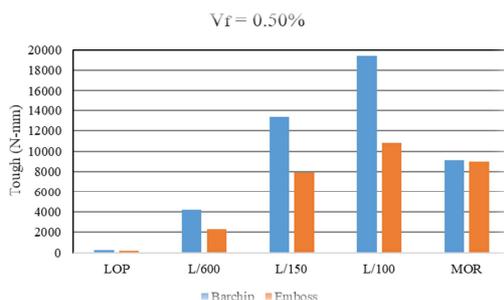
هرچه تیر بتواند تغییر مکان‌های بیشتری قبل از خرابی نهایی تحمل کند هم قابلیت تعمیر احتمالی وجود دارد و هم نشان از تأثیر مثبت الیاف‌ها بر این رفتار است و به همین دلیل ASTM C1609 در دو حالت L/600 برای آسیب‌های اولیه و L/150 برای سازه در آستانه خرابی نهایی را پیشنهاد می‌دهد. تأثیر درصد و نوع الیاف بر جذب انرژی، در شکل ۱۹ و ۲۰ قابل مشاهده است.



(ب)

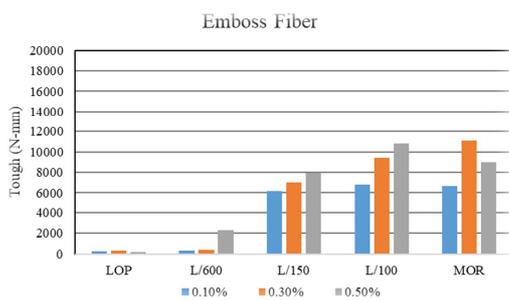


(الف)

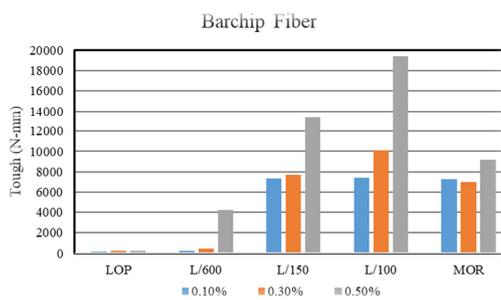


(پ)

شکل ۱۹- تأثیر درصد الیاف در جذب انرژی، (الف) درصد حجمی ۰/۱، (ب) درصد حجمی ۰/۳ و (ج) درصد حجمی ۰/۵ درصد



(ب)



(الف)

شکل ۲۰- تأثیر نوع الیاف در جذب انرژی، (الف) الیاف بارچیب و (ب) الیاف امباس

نوع و درصد الیاف‌های متفاوت می‌تواند بر خواص مقاومتی (مانند مقاومت‌های فشاری و کششی)، مدول الاستیسیته، همچنین شکل‌پذیری و طاقبت، و همچنین خواص عملکردی بتن‌ها مانند کارایی دارای تأثیر مثبت یا

۴- رابطه بین خواص بتن غلتکی، درصد و نوع الیاف

- ۱- نتایج آزمایشات نشان داد که افزودن الیاف غیرفولادی با درصدهای بسیار پائین دارای اثر خنثی داشت ولی درصدهای تا نیم درصد دارای اثر مثبت بر مقاومت فشاری بتن غلتکی داشت.
- ۲- اضافه شدن الیاف از ۰/۱ تا ۰/۵ درصد متناسب با حجم الیاف باعث کاهش کارایی و افزایش زمان وی طرح مخلوط مینا گردید و مراحل اجرایی را مشکل تر خواهد نمود.
- ۳- مقاومت کششی بتن‌های الیافی متناسب با حجم الیاف مصرفی تا ۲۰ درصد نسبت به بتن بدون الیاف افزایش داشت ولی اثر محسوسی بر مقاومت خمشی نداشت.
- ۴- دو الیاف بارچپ و امباس دارای رفتار مقاومتی بهتری بعد از ترک‌خوردگی نسبت به الیاف شیشه داشتند و بهترین رفتار پس از ترک‌خوردگی را الیاف بارچپ با درصد وزنی ۰/۵ نسبت به دو درصد حجمی دیگر از خود نشان داد.
- ۵- بیشترین تأثیر افزایش درصد حجمی الیاف در نقطه $L/150$ برای هر دو الیاف بارچپ و امباس با رفتار پس از ترک‌خوردگی مشاهده گردید.
- ۶- افزایش میزان درصد حجمی الیاف اضافه شده به بتن باعث رشد بیشتری در افزایش جذب انرژی نمونه‌ها شد و الیاف بارچپ نسبت به الیاف امباس دارای اثر بیشتری بودند.

منفی باشد. ضمناً در سازه‌هایی مانند روسازی بتنی که دارای سطح تماس زیاد با هوای آزاد است و خطر بروز ترک‌های سطحی حرارتی ناشی از آبرفتگی وجود دارد، نوع و مقدار الیاف می‌تواند دارای اثر مثبت در کنترل و کاهش فراوان این ترک‌ها داشته باشد. بنابراین استفاده از نوع و مقدار الیاف بستگی به انتظار ما از بتن مصرفی به‌همراه هزینه اقتصادی تمام شده طرح عمرانی اجرا شده می‌باشد. بنابراین تأمین همه انتظارات با اثر مثبت امکان‌پذیر نیست و کاهش یا افزایش الیاف می‌تواند دارای اثرات مثبت بر بعضی خواص و اثرات منفی بر خواص دیگر باشد و برعکس.

علت انتخاب نوع الیاف غیرفلزی با درصدهای محدود زیر نیم درصد برای نیل متوسط به خواص مورد انتظار با رویکرد اجرایی واقعی بود و با تأکید بر تأمین نسبی مقاومت‌ها و اثر منفی محدود بر کارایی و به‌خصوص کاهش قابل توجه ترک‌های سطحی بودند. گرچه افزایش درصد الیاف تا ۱ درصد می‌توانست اثرات مثبت بر مقاومت‌ها داشته باشد ولی قطعاً اثر منفی فراوان بر کارایی و هزینه تمام شده داشت.

۵- نتیجه‌گیری

براساس آزمایشاتی که در این تحقیق با افزودن سه نوع الیاف غیرفولادی بارچپ، امباس و شیشه با سه درصد متفاوت به RCC انجام شده است، نتایج زیر حاصل گردید:

مراجع

- [1] Alsadey, S. (2015). Effect of superplasticizer on fresh and hardened properties of concrete. *Journal of Agricultural Science and Engineering*, 1(2), 70-74.
- [2] Long, W. J., Lemieux, G., Hwang, S. D., & Khayat, K. H. (2012). Statistical models to predict fresh and hardened properties of self-consolidating concrete. *Materials and Structures*, 45(7), 1035-1052. doi: 10.1617/s11527-011-9815-9
- [3] Zhou, L., Zheng, Y., Yu, Y., Song, G., Huo, L., & Guo, Y. (2021). Experimental study of mechanical and fresh properties of HVFA-SCC with and without PP fibers. *Construction and Building Materials*, 267, 121010. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2020.121010
- [4] Arabymohammadi, H., Sharbatdar, M. K., & Naderpour, H. (2023). Experimental investigation of mix proportions effects on roller-compacted concrete properties using response surface methodology. *International Journal of Pavement Research and Technology*, 16, 1021-1046. doi: 10.1007/s42947-022-00177-8
- [5] Rahmani, E., Sharbatdar, M. K., & Beygi, M. (2020). A comprehensive investigation into the effect of water to cement ratios and cement contents on the physical and mechanical properties of Roller Compacted Con-

- crete Pavement (RCCP). *Construction and Building Materials*, 253, 119177. doi: **10.1016/j.conbuildmat.2020.119177**
- [6] Arabyarmohammadi, H., Sharbatdar, M., Naderpour, H. (2022). Mechanical properties evaluation of Roller Compacted Concrete Pavement using response surface methodology in terms of an experimental program. *Journal of Transportation Infrastructure Engineering*, 7(4), 75-98. doi: **10.22075/jtie.2021.23803.1540** [In Persian]
- [7] ACI 544.1 R-96. (1996). *State-of-the-Art Report on Fiber Reinforced Concrete*. Detroit: ACI Committee.
- [8] Yildizel, S., Timur, O., & Ozturk, A. (2018). Abrasion resistance and mechanical properties of waste-glass-fiber-reinforced roller-compacted concrete. *Mechanics of Composite Materials*, 54(2), 251-256. doi: **10.1007/s11029-018-9736-6**
- [9] Benouadah, A., Beddar, M., & Meddah, A. (2017). Physical and mechanical behaviour of a roller compacted concrete reinforced with polypropylene fiber. *Journal of Fundamental and Applied Sciences*, 9(2), 623-635. doi: **10.4314/jfas.v9i2.1**
- [10] Noroozi, R., Shafabakhsh, G., Kheyroddin, A., & Moghaddam, A. M. (2019). Investigating the effects of recycled PET particles, shredded recycled steel fibers and Metakaolin powder on the properties of RCCP. *Construction and Building Materials*, 224, 173-187. doi: **10.1016/j.conbuildmat.2019.07.012**
- [11] Rooholamini, H., Hassani, A., & Aliha, M. (2018). Evaluating the effect of macro-synthetic fibre on the mechanical properties of roller-compacted concrete pavement using response surface methodology. *Construction and Building Materials*, 159, 517-529. doi: **10.1016/j.conbuildmat.2017.11.002**
- [12] Ashteyat, A. M., Al Rjoub, Y. S., Murad, Y., & Asaad, S. (2022). Mechanical and durability behaviour of roller-compacted concrete containing white cement by pass dust and polypropylene fibre. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 26(1), 166-183. doi: **10.1080/19648189.2019.1652694**
- [13] Ahmadi, M., Shafabakhsh, G. A., & Hassani, A. (2021). Fracture and mechanical performance of two-lift concrete pavements made of roller compacted concrete and polypropylene fibers. *Construction and Building Materials*, 268, 121144. doi: **10.1016/j.conbuildmat.2020.121144**
- [14] Rooholamini, H., Hassani, A., & Aliha, M. (2018). Fracture properties of hybrid fibre-reinforced roller-compacted concrete in mode I with consideration of possible kinked crack. *Construction and Building Materials*, 187, 248-256. doi: **10.1016/j.conbuildmat.2018.07.177**
- [15] Noroozi, M., Sharbatdar, M. K. (2022) Experimental investigation the mechanical and structural strengths of concretes combined rubber wastes and fibers. *Sharif Journal of Civil Engineering*, 38.2(1.1), 35-46. doi: **10.24200/j30.2021.57356.2904** [In Persian]
- [16] LaHucik, J., Dahal, S., Roesler, J., & Amirkhanian, A. N. (2017). Mechanical properties of roller-compacted concrete with macro-fibers. *Construction and Building Materials*, 135, 440-446. doi: **10.1016/j.conbuildmat.2016.12.212**
- [17] Sukontasukkul, P., Chaisakulkiet, U., Jamsawang, P., Horpibulsuk, S., Jaturapitakkul, C., & Chindapasirt, P. (2019). Case investigation on application of steel fibers in roller compacted concrete pavement in Thailand. *Case Studies in Construction Materials*, 11, e00271. doi: **10.1016/j.cscm.2019.e00271**
- [18] Neocleous, K., Angelakopoulos, H., Pilakoutas, K., & Guadagnini, M. (2011). Fibre-reinforced roller-compacted concrete transport pavements. In *Proceedings of the institution of civil engineers-transport*, 164(2), 97-109. doi: **10.1680/tran.9.00043**
- [19] Madhkhani, M., Azizkhani, R., & Harchegani, M. T. (2012). Effects of pozzolans together with steel and polypropylene fibers on mechanical properties of RCC pavements. *Construction and Building Materials*, 26(1), 102-112. doi: **10.1016/j.conbuildmat.2011.05.009**
- [20] Paryad, P., Naderpour, H., & Sharbatdar, M. K. (2022). Assessing the effects of volume fraction and diameter of hooked-end steel fiber on Vebe time and mechanical properties of RCCP. *Civil Infrastructure Researches*, 8(1), 131-144. doi: **10.22091/cer.2022.7777.1353** [In Persian]
- [21] ASTM, C. (2012). *Standard specification for portland cement*. ASTM International, West Conshohocken, PA. 2012.
- [22] ASTM C33/C33M. (2003). *Standard specification for concrete aggregates*. ASTM International
- [23] PCA. (2010). *Guide for Roller-Compacted Concrete Pavements*. Portland Cement Association.
- [24] ASTM 1176/C1176 M-08. (2008). *Standard practice for making roller compacted concrete in cylinder molds using a vibrating table*. ASTM International, West Conshohocken, PA.
- [25] ASTM C1170. (1998). *Standard test method for determining consistency and density of roller compacted concrete using a vibrating table*. West Conshohocken: ASTM International.
- [26] ASTM C39/C39M-18. (2018). *Standard test method for compressive strength of cylindrical concrete specimens*. ASTM International, West Conshohocken, PA.
- [27] ASTM C469/C469M-14. (2014). *Standard test method for static modulus of elasticity and Poisson's ratio of concrete in compression*. ASTM International, West Conshohocken, PA.
- [28] ASTM C496/C496M-17. (2017). *Standard test method for splitting tensile strength of cylindrical concrete specimens*. ASTM International, West Conshohocken, PA4.

- [29] ASTM, C1609/C1609M-12. (2012). *Standard test method for flexural performance of fiber-reinforced concrete*. ASTM International, West Conshohocken, PA.
- [30] Hsie, M., Tu, C., & Song, P. S. (2008). Mechanical properties of polypropylene hybrid fiber-reinforced concrete. *Materials Science and Engineering: A*, 494(1-2), 153-157. doi: **10.1016/j.msea.2008.05.037**
- [31] De Oliveira, L. A. P., & Castro-Gomes, J. P. (2011). Physical and mechanical behavior of recycled PET fibre reinforced mortar. *Construction and Building Materials*, 25(4), 1712-1717. doi: **10.1016/j.conbuildmat.2010.11.044**
- [32] Fraternali, F., Ciancia, V., Chechile, R., Rizzano, G., Feo, L., & Incarnato, L. (2011). Experimental study of the thermo-mechanical properties of recycled PET fiber-reinforced concrete. *Composite structures*, 93(9), 2368-2374. doi: **10.1016/j.compstruct.2011.03.025**
- [33] Kim, D., Naaman, A. E., Tawil, S. E. (2008). Comparative flexural behavior of four fiber reinforced cementitious composites. *Cement & Concrete Composites*, 30, 917-928. doi: **10.1016/j.cemconcomp.2008.08.002**