

Experimental study of crack propagation in plain and reinforced ECC beams containing PVA fibers

Alanor Asadi¹, Bahram Navayi Neya^{2*}, Morteza Hosseinali Beygi³

1- PhD Candidate, Civil Engineering Dept., Babol Noshirvani University of Technology, Babol, Iran,

2- Professor, Civil Engineering Dept., Babol Noshirvani University of Technology, Babol, Iran

3- Assistance professor, Civil Engineering Dept., Babol, Iran

ABSTRACT

Nowadays, the use of concrete structures in the world has been widely applied due to the low cost of materials and their availability. Numerous weakness of concrete such as brittle behavior, low tensile strength and rapid expansion of cracks were used to use fibers in the concrete matrix and fabrication of engineered cementitious composites (ECC) to resolve the deficiencies that had typical concrete. Engineered cementitious composites with polyvinyl alcohol fibers (ECC-PVA) are a group of cementitious composites, which not only provide high ductility and tensile strength but also control the crack width. The strain-hardening behavior under tensile and flexural loads and the formation of multiple shallow cracks instead of deep and concentrated cracks are among the main advantages of these composites, leading to their widespread application. In this paper, eight ECC concrete beam specimens, including four specimens containing 2% and the other four containing 1.5% PVA fibers, were tested and their load-displacement and load-crack mouse opening displacement curves were obtained. The results indicated that the ECC specimens with 2% PVA fibers had lower load-carrying capacity, and greater displacement, crack mouth opening displacement, and ductility values compared with the ECC specimens with 1.5% PVA fibers. Moreover, increasing the percentage of PVA fibers had negligible effect on the flexural capacity of the beams.

ARTICLE INFO

Receive Date: 13 November 2021

Revise Date: 08 February 2022

Accept Date: 26 February 2022

Keywords:

Engineered cementitious composites
Polyvinyl alcohol (PVA) fibers
Cracking
Concrete beams
flexural capacity

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: <https://doi.org/10.22065/jsce.2022.313901.2637>

*Corresponding author: Bahram Navayi Neya

Email address: navayi@nit.ac.ir

مطالعه آزمایشگاهی رشد ترک در تیرهای بتنی ECC مسلح و غیرمسلح

اله نور اسدی^۱، بهرام نوایی نیا^{۲*}، مرتضی حسینعلی بیگی^۳

۱- دانشجوی دکتری عمران گرایش سازه، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، بابل، ایران

۲- استاد، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، بابل، ایران

۳- استادیار، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، بابل، ایران

چکیده

کامپوزیت‌های سیمانی با الیاف پلی‌وینیل الکل (ECC-PVA)، دسته‌ای از کامپوزیت‌های سیمانی‌ست که علاوه بر مقاومت کششی و شکل‌پذیری بالا، عرض ترک تحت کنترل است. رفتار کرنش-سخت‌شونده کامپوزیت‌ها، تحت اثر بارهای کششی و خمشی و بروز ترک خوردگی متعدد به جای ترک‌های عمیق و متمرکز، از مزایای مهم آن‌ها محسوب می‌شود، که منجر به استفاده روزافزون از آن شده است. در این مقاله، هشت نمونه تیر بتنی ECC (چهار نمونه با الیاف 2% و چهار نمونه با 1.5% الیاف PVA) مورد آزمایش قرار گرفته است و نمودارهای بار-جاب‌جایی، بار-بازشدگی دهانه و بازشدگی ترک-جاب‌جایی ترک بدست آورده شده است. برای تعیین میزان بازشدگی دهانه ترک از 4 عدد جاب‌جایی‌سنج (LVDT) در اطراف ترک اولیه‌ای که در تیر ایجاد شده بود، استفاده شد. با افزایش جاب‌جایی اعمال شده توسط دستگاه استاندارد با ظرفیت 500kN میزان بازشدگی ترک اولیه افزایش پیدا می‌کرد که این میزان توسط جاب‌جایی‌سنج‌ها به ثبت رسید. سپس در انتها با میانگین‌گیری از میزان بازشدگی ثبت شده توسط جاب‌جایی‌سنج‌ها میزان بازشدگی نهایی دهانه ترک به دست آمد. نتایج نشان می‌دهد، نمونه‌های ECC با الیاف 2% دارای ظرفیت باربری کمتر و جاب‌جایی بیشتر است و دهانه بازشدگی و شکل‌پذیری بیشتری نسبت به نمونه ECC با الیاف 1.5% دارند. همچنین افزایش درصد میزان الیاف PVA باعث افزایش ظرفیت خمشی تیرها به میزان 10 درصد شد.

کلمات کلیدی: کامپوزیت‌های سیمانی، الیاف پلی‌وینیل الکل PVA، ترک خوردگی، تیرهای بتنی، ظرفیت خمشی

شناسه دیجیتال:		سابقه مقاله:				
doi:	https://doi.org/10.22065/jsce.2022.313901.2637	چاپ	انتشار آنلاین	پذیرش	بازنگری	دریافت
	10.22065/jsce.2022.313901.2637	۱۴۰۱/۱۰/۳۰	۱۴۰۰/۱۲/۰۷	۱۴۰۰/۱۲/۰۷	۱۴۰۰/۱۱/۱۹	۱۴۰۰/۰۸/۲۲
			بهرام نوایی نیا		*نویسنده مسئول:	
			navayi@nit.ac.ir		پست الکترونیکی:	

۱- مقدمه

یکی از دلایل مهم شکست و انهدام سازه‌ها، گسترش ترک‌ها و نقص‌های اولیه موجود در آن‌ها می‌باشد. این ترک‌های اولیه ناشی از عوامل مختلف از قبیل معایب ساخت و تولید سازه می‌باشند. ترک‌ها در اندازه‌ها و شکل‌های مختلف در سازه ظاهر می‌گردند و تحت بارهای گوناگون رفتار متفاوتی خواهند داشت. بعضی از این ترک‌ها گسترش پیدا کرده و باعث شکست ناگهانی و فاجعه‌بار سازه‌ها می‌شوند. نمونه‌هایی از آن شامل پل‌ها، مخازن، مجاری تحت فشار، کشتی‌ها، هواپیما و ساختمان‌ها می‌باشند. مکانیک شکست علم بررسی نحوه ترک خوردن در اجسام، پاسخ سازه ترک خورده تحت بارهای وارده و خرابی سازه در نتیجه رشد و توسعه ترک اولیه می‌باشد. علم مکانیک شکست تنها به بررسی اثرات وجود ترک در سازه می‌پردازد و درباره نحوه ایجاد ترک اولیه صحبت نمی‌کند. حالت‌های خاص مکانیک شکست که با ایدئال‌سازی‌هایی که بر پایه نادیده گرفتن پلاستیسیته نوک ترک انجام می‌شود مکانیک شکست خطی ($LEFM^1$) نامیده می‌شود که اصول آن در سال ۱۹۲۰ میلادی توسط گریفیث^۲ با آزمایش بر روی فیبرهای شیشه معرفی شد [۱]. وی توانست تئوری مکانیک شکست را بر اساس یک تعادل ساده انرژی پایه‌گذاری کند. بر طبق این تئوری تعادلی بین کاهش انرژی پتانسیل در جسم تحت تنش در اثر گسترش ترک و افزایش انرژی سطح در اثر افزایش سطح ترک وجود دارد. این روش به درستی رابطه بین مقاومت و ابعاد ترک در شیشه را پیش‌بینی نمود. رویکرد گریفیث برای اولین بار توسط کاپالن [۲] در سال ۱۹۶۱ برای بتن به کار رفت. ایشان از مکانیک شکست خطی برای مدل‌سازی شرایط تنش‌های اطراف ترک در بتن استفاده کرد. بعدها رویکرد حل مسائل مکانیک شکست در حوزه مسائل غیرخطی و حتی الاستیک غیرخطی نیز پیشرفت کرده و هم‌اکنون بانام مکانیک شکست الاستو-پلاستیک^۳ در حال گسترش می‌باشد ($EPFM$).

از عمده ضعف‌های بتن می‌توان به رفتار ترد، مقاومت کششی پایین و گسترش سریع ترک‌ها اشاره کرد. رفتار شکنندگی به عنوان یک تنگنا، مانع عملکرد بهتر سازه از نظر ایمنی، دوام و پایداری، می‌شود. بسیاری از مشکلات مربوط به زوال زیرساخت‌ها و تاسیسات زیربنایی را می‌توان به عملکرد ضعیف بتن در برابر بارگذاری‌های خمشی یا کششی و رفتار نامطلوب در ناحیه پساترک، نسبت داد. در سال‌های اخیر تلاش‌های زیادی برای غلبه بر این مشکلات انجام گرفته است [۳ و ۴].

کامپوزیت‌های سیمانی مهندسی شده (ECC) نوع پیشرفته‌ای از کامپوزیت‌های سیمانی مسلح به الیاف توانمند هستند که دارای ظرفیت کرنش کششی بالا و رفتار کرنش سخت‌شونده (ترک‌خوردگی مویی متعدد قبل از تمرکز ترک و گسیختگی نهایی) است. ظرفیت کرنش کششی مواد ECC حاوی الیاف پلی‌اتیلن و یا الیاف پلی‌وینیل الکل (PVA) با بیشینه مقدار حجمی ۲٪ الیاف در محدوده ۳٪ تا ۵٪ گزارش شده است [۵ و ۶]. در کامپوزیت‌های سیمانی مسلح به الیاف، کرنش‌های بزرگ با توسعه پی‌درپی ترک‌های متعدد به جای افزایش مداوم دهانه باز شده یک ترک، رخ می‌دهند. چقرمگی بالا و عرض کنترل شده ترک (معمولاً زیر ۱۰۰ میکرون)، کامپوزیت‌های ECC را به یک مصالح ایده‌آل برای بهبود سرویس‌دهی و دوام تاسیسات زیرساختی، تبدیل کرده است. در سال‌های اخیر، زمینه‌های بکارگیری کامپوزیت‌های ECC افزایش یافته است. کامپوزیت‌های ECC به طور موفقیت‌آمیزی در تعمیر سدها، پوشش عرشه پل، تیرهای همبند ساختمان بلند مرتبه و دیگر عناصر سازه‌ای و سیستم‌ها، به کار برده شده است [۷ و ۸].

در طرح اختلاط کامپوزیت‌های سیمانی مهندسی شده از مقدار سیمان بیشتری (به طور متوسط دو تا سه برابر) نسبت به طرح اختلاط بتن معمولی استفاده می‌شود. افزایش سیمان مورد استفاده در کامپوزیت‌های ECC موجب کنترل مقدار کارایی برای توزیع هرچه بهتر الیاف در آن است و بیشتر از آن، برای بروز رفتار کرنش-سخت‌شونده و افزایش چقرمگی ماتریس در ناحیه پساترک ضروری است. در کامپوزیت‌های ECC از درشت‌دانه‌ها استفاده نشده است که حاصل آن مخلوطی با مقدار مواد سیمانی بالا در مقایسه با بتن معمولی است. در واقع، مواد ECC ترکیبی از خمیر سیمان یا ملات با ماسه ریز است که عیار سیمان آن، ۸۳۰ تا ۱۲۰۰ کیلوگرم در هر مترمکعب است [۹ و ۱۰].

برخی از خواص کامپوزیت‌های سیمانی با الیاف‌های مختلف، به وسیله پژوهش‌گران بررسی شده است. از اولین پژوهش‌های انجام شده روی ECC ، می‌توان به پژوهش Li و $Maalej$ [۱۱] در سال ۱۹۹۴ اشاره کرد. آن‌ها در مقایسه رفتار خمشی و کششی بین کامپوزیت ECC و

1 Linear Elastic Fracture Mechanics

2 Griffith

3 Elasto-Plastic Fracture

کامپوزیت‌های مسلح به الیاف فولادی/ پلی پروپیلن، نشان دادند که، کامپوزیت‌های ECC به طور قابل توجهی در بروز رفتار کرنش-سخت-شوند، ترک خوردگی متعدد و افزایش نقطه گسیختگی چقرمگی، برتری داشتند. Li و Wang [۷] اثر مقادیر بالای خاکستر بادی در کامپوزیت ECC را بررسی کردند، نتایج آن‌ها نشان داد که افزایش حجم به کارگیری خاکستر بادی، موجب کاهش پیوند و اصطکاک ناحیه انتقال میان سطحی بین الیاف PVA شده و مانع از رسیدن چقرمگی ماتریس به بیشترین ظرفیت کرنش کششی می‌شود. Sahmaran و همکاران [۱۲] تاثیر نوع سنگدانه و اندازه‌ی آن، بر شکل‌پذیری و خواص مکانیکی کامپوزیت‌های ECC تولید شده با ریزدانه سنگ آهک دولومیتی به همراه مقادیر بالای خاکستر بادی، رفتار کرنش-سخت‌شونده و شکل‌پذیری بالایی را نشان می‌دهد. همچنین تاثیر زیادی در کاهش سرعت انقباض خشک دارد.

مطالعات تجربی ECC در قسمت کششی تیر در اطراف آرماتور طولی تا حدودی هم ظرفیت خمشی [۱۳-۱۵] و هم شکل‌پذیری [۱۴] و [۱۵] تیر بتنی را بهبود بخشیده و به صورت چشمگیری، قبل از جاری شدن فولاد تقویت‌کننده، از عرض ترک کاسته است [۱۴]. جینگ‌مین کای و همکارانش [۱۶] یک مطالعه آزمایشگاهی روی رفتار مکانیکی ستون‌های فولادی لوله‌ای پر شده با کامپوزیت سیمانی تحت بار محوری را انجام دادند. نتایج مطالعه آن‌ها نشان داد که ستون‌های فولادی لوله‌ای محصور شده با کامپوزیت سیمانی، ظرفیت باربری بیشتر و همچنین رفتار شکل‌پذیرتری داشته‌اند. وان‌جی جی و همکارانش [۱۷] رفتار خمشی تیرهای کامپوزیت بتنی ECC تقویت شده با میلگردهای FRP^۴ را به صورت آزمایشگاهی بررسی نمودند. نتایج آزمایش آن‌ها نشان داد هنگامی که یک لایه بتنی در منطقه کشش با یک لایه ECC با همان ضخامت جایگزین شود، ظرفیت لنگر و سختی تیرهای بتنی بهبود می‌یابد و عرض ترک را می‌توان به خوبی کنترل کرد.

حسینی و همکاران [۱۸] رفتار لرزه‌ای اتصال‌های سه‌بعدی تیر-ستون حاوی ECC تحت خمش و پیچش دوطرفه را مورد ارزیابی قرار دادند. در این پژوهش اتصالات سه‌بعدی با ۶ درجه آزادی و شرایط مرزی واقع‌بینانه آزمایش شدند همچنین تاثیر حذف آرماتورهای برشی در چشمه اتصال نیز بررسی گردید. ابوحسین و همکاران [۱۹] به بررسی و ارزیابی رفتار ترک خوردگی اتصالات بتنی حاوی ECC با استفاده از تجزیه و تحلیل انتشار امواج صوتی پرداختند. در این پژوهش به وسیله آزمایش روش‌های مختلف ارزیابی ترک‌ها با استفاده از امواج صوتی، نقش مفید استفاده از HPRCC و ECC را بر بهبود خواص اتصالات بتنی تایید نمایند. خلیل‌زاده وحیدی و رضایی [۲۰] به مطالعه آزمایشگاهی اثر کامپوزیت‌های سیمانی مهندسی حاوی نانوالیاف کربن بر اتصال بتنی تیر-ستون پرداختند. نتایج آزمایشگاهی این پژوهش نشان داد که با استفاده از این مصالح توانمند، شکل‌پذیری و جذب انرژی این اتصالات به صورت موثری بهبود یافت و ترک‌ها ایجاد شده در چشمه اتصال به صورت یک شبکه متراکم از ریز ترک‌ها با عمق و عرض بسیار کم ظاهر گردید.

با توجه به ماهیت بتن که رفتار آن تا حدودی شبه‌ترد است، اغلب ترک‌ها در تیر بتنی تحت آزمایش سه‌نقطه‌ای به سرعت رشد کرده و تیر بتنی دچار شکست نهایی می‌شود. برای حل مشکل مذکور، پیشنهاد شده که به جای بتن معمولی از کامپوزیت سیمانی مهندسی شده استفاده شود. مصالح ECC بر اساس نظریه‌های میکرومکانیک و مکانیک شکست طراحی شده و رفتار سخت‌شوندگی کرنشی بعد از اولین ترک خوردگی در آن، شبیه فلز می‌باشد. کرنش نهایی کششی برای ECC در محدوده ۲-۷٪ بوده که ۲۰۰-۷۰۰ برابر مقدار مربوطه برای بتن معمولی می‌باشد، عرض ترک را نیز در ECC می‌توان به کمتر از ۶۰ μm محدود کرد [۲۱]. همچنین، کرنش نهایی فشاری برای ECC، دو برابر مقدار مربوطه برای بتن معمولی می‌باشد.

از آن‌جا که بیشتر تحقیقات انجام‌شده در مورد بتن ECC مربوط به بخش خاصی از خصوصیات رفتاری آن می‌باشد و کمتر به مواردی از جمله رشد و گسترش ترک پرداخته شده است، این مقاله به مطالعه رشد و گسترش ترک در تیرهای بتنی مسلح و غیرمسلح ECC می‌پردازد. در این مطالعه، ۴ نمونه تیر بتنی ECC با الیاف ۲٪ و ۴ نمونه تیر بتنی ECC با الیاف ۱.۵٪، تحت آزمایش خمش سه‌نقطه‌ای برای ارزیابی رشد ترک در آن‌ها، قرار گرفته‌اند. ظرفیت خمشی، نمودارهای بار-جابجایی و بار-بازشدگی دهانه ترک در تیرهای مورد بررسی با یکدیگر مقایسه و تاثیر درصد الیاف و نیز آرماتور طولی مورد بحث و بررسی قرار گرفته است.

⁴ Fiber reinforced polymer

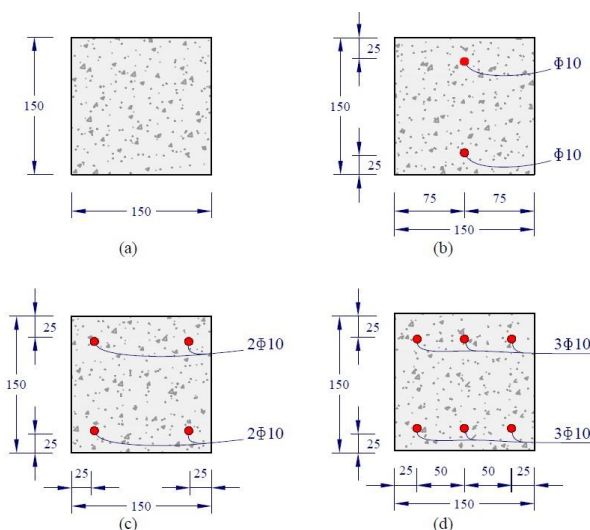
۲- برنامه آزمایشگاهی

به منظور بررسی رشد ترک در تیرهای بتنی ECC برنامه آزمایشگاهی به شرح زیر اجرا گردید.

۲-۱- نمونه‌های آزمایش

ساخت نمونه برای یک پژوهش آزمایشگاهی موضوع بسیار مهمی است. در آزمون‌های آزمایشگاهی چون قرائت‌ها در مرزهای نمونه انجام می‌گیرد، مسئله ساخت نمونه همگن جهت رسیدن به توزیع یکنواخت الیاف PVA در بتن بسیار اهمیت دارد و باید به این موضوع توجه کافی شود. بنابراین در این مطالعه برای تهیه و ساخت نمونه‌ها سعی گردیده دقت کافی صورت بپذیرد.

هشت نمونه تیر بتنی مسلح و غیرمسلح ECC با الیاف 2% و 1.5% در آزمایشگاه ساخته شدند که چهار نمونه با الیاف 2% که با B1 و B2 و B3 و B4 نامگذاری گردیدند. چهار نمونه باقی مانده که دارای الیاف 1.5% می‌باشند با B5 و B6 و B7 و B8 مشخص گردیده و برای ساخت کلیه نمونه‌های از طرح اختلاط M45 [۲۲] استفاده شده است. شکل 1 مشخصات هندسی نمونه‌ها و آرایش میلگردهای طولی را نشان می‌دهد. طول کلی و ابعاد مقطع تیر برای همه نمونه‌ها یکسان می‌باشد، همچنین قطر آرماتور طولی در همه نمونه‌های مسلح 10 میلی‌متر در نظر گرفته شده و پوشش بتن میلگردها نیز برای همه نمونه‌ها 25 میلی‌متر در نظر گرفته شده است. به منظور مطالعه رشد ترک‌ها در اثر شکست خمشی، استفاده از خاموت به دلیل افزایش مقاومت برشی نمونه‌ها صرف نظر شده است. جدول 1 ابعاد هندسی تیر بتنی مسلح و غیر مسلح و درصد الیاف مصرفی را در نمونه‌های مختلف را نشان می‌دهد.



شکل 1: مقطع تیرهای مورد آزمایش به همراه آرایش میلگردهای طولی برای نمونه‌های (a) بدون میلگرد، (b) دو میلگرد، (c) چهار میلگرد، (d) شش میلگرد (ابعاد بر حسب میلی‌متر)

جدول 1: مشخصات هندسی و درصد الیاف مصرفی نمونه‌ها

نمونه	ابعاد مقطع	طول تیر	تعداد میلگردهای کششی	تعداد میلگردهای فشاری	درصد الیاف
B1	15×15cm	110cm	بدون میلگرد	بدون میلگرد	2%
B2	15×15cm	110cm	f10	f10	2%
B3	15×15cm	110cm	2f10	2f10	2%
B4	15×15cm	110cm	3f10	3f10	2%
B5	15×15cm	110cm	بدون میلگرد	بدون میلگرد	1.5%
B6	15×15cm	110cm	f10	f10	1.5%
B7	15×15cm	110cm	2f10	2f10	1.5%

B8	15×15cm	110cm	3f10	3f10	1.5%
----	---------	-------	------	------	------

۲-۲- طرح اختلاط

طرح اختلاط تیرها بر اساس استاندارد M45 به صورت درصد حجمی، در جدول 2 نشان داده شده است. برای تهیه مخلوط بتنی ابتدا ماسه سیلیسی ریز، خاکستریادی و سیمان به صورت خشک به مدت 2 دقیقه باهم مخلوط شده است. سپس 90 درصد محلول آب و فوق روان کننده جهت انجام عمل هیدراسیون بتن به مخلوط اضافه گردید و به مدت 2 دقیقه مخلوط کاملاً ترکیب می شود. حدود 10 درصد از آب باقیمانده برای شستشوی مصالح خشک باقیمانده در اطراف تیغه های مخلوط کن بکار گرفته می شود. در ادامه مخلوط کن به مدت 5 دقیقه جهت رسیدن به یک مخلوط بتنی همگن روی دور بالا تنظیم شده است. در آخر الیاف PVA پس از مجزا کردن با دست، به آرامی و به صورت تدریجی به ترکیب بتن در حال مخلوط شدن در مدت زمان کوتاه اضافه شد.

چالش های اصلی در ساخت بتن ECC عدم توزیع یکنواخت الیاف PVA در مخلوط بتن می باشد. پراکندگی یکنواخت الیاف، خواص کامپوزیت و پایداری آن را افزایش می دهد. یکی از روش های افزایش یکنواختی الیاف، کنترل ویسکوزیته پلاستیک ملات ECC است. بنابراین هرچه ویسکوزیته ملات بالاتر باشد، نیروی برشی بیشتری در فرآیند (اختلاط) تولید می شود و در نتیجه آن رشته های الیاف در مخلوط پراکنده تر می شوند. در ساخت بتن ECC از محلول VMA که با افزایش ویسکوزیته سبب یکنواختی الیاف در مخلوط می شود استفاده شده است. لذا این محلول را به مقدار 0.04% وزن سیمان به بتن اضافه گردید. به منظور روانی ترکیبات ECC و عدم چسپندگی ذرات در حین مخلوط کردن مصالح، عامل کاهنده ی آب (پلی کربوکسیلیک) با نسبت 1.5% از وزن ملات و VMA، به ترکیب اضافه شده است. مشخصات فیزیکی مصالح ECC در جدول 3 آمده است.

جدول 2: نسبت های اختلاط مصالح (بر اساس حجم)

طرح اختلاط	سیمان	خاکستریادی	ماسه	آب	فوق روان کننده	الیاف برحسب حجم %
M45	1.0	1.2	0.8	0.56	0.012	0.02

جدول 3: مشخصات فیزیکی مصالح ECC

مصالح	جرم مخصوص (gr/cm^3)	مشخصات مکانیکی	اندازه
سیمان	3.2	-	مانده روی الک 45: 14.28%
ماسه نرمی	2.2	سختی موهر: 7	مدول نرمی: 2.04
خاکستر بادی	2.6	-	مانده روی الک 45: 10.12%
الیاف PVA	1.3	مقاومت کششی: 1620MPa مدول الاستیک: 43GPa	طول: 6mm

۳- مشخصه های مدل مصالح

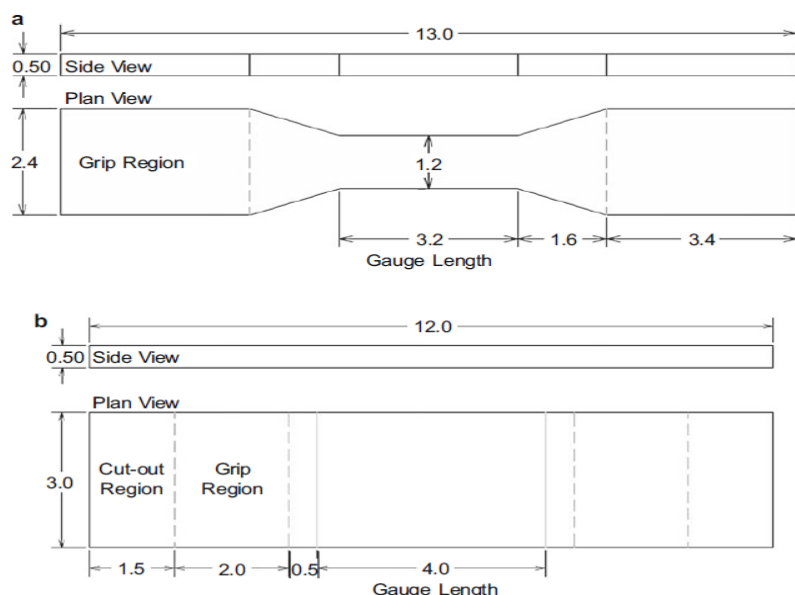
به منظور تعیین خواص مکانیکی بتن مورد استفاده در تیرها، نمونه های مختلفی به شرح زیر تحت آزمایش قرار گرفتند:

۱- شش نمونه استوانه‌ای ECC با درصد الیاف 1.5% و 2% مطابق استاندارد ASTM C192 [۲۳] تحت آزمایش فشار تک‌محوری قرار گرفته است (شکل 2). برای تعیین مقاومت فشاری بتن ECC از نمونه‌هایی با ابعاد 10×20cm استفاده شده است. نمودار تنش- کرنش نمونه استوانه‌ای تحت تنش فشاری در شکل 4 را نشان می‌دهد. مقاومت فشاری متوسط 28 روزه برای ECC با درصد الیاف 1.5% و 2% برابر 32Mpa است.

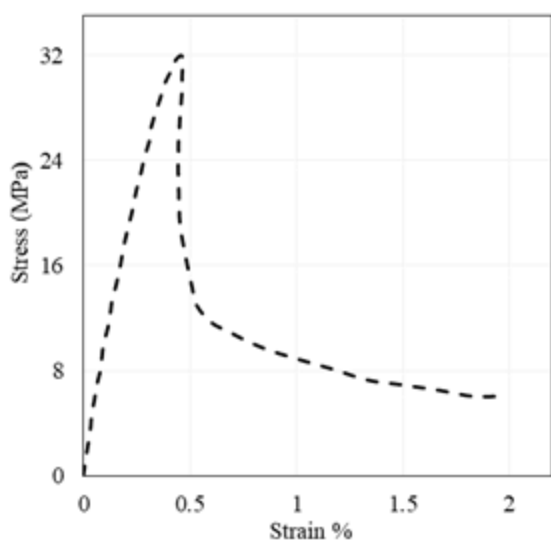
۲- تعداد 4 نمونه بتنی ECC تحت کشش تک‌محوری با استفاده از نمونه‌های استخوان سگی مطابق شکل 3 آزمایش شده است. نمودار تنش-کرنش آزمایش کششی نمونه استخوان سگ در شکل 5 نشان می‌دهد، مقاومت کششی ECC از 4MPa تجاوز کرده و کرنش کششی آن در حالت سخت‌شوندگی کرنشی به 2.5% می‌رسد.



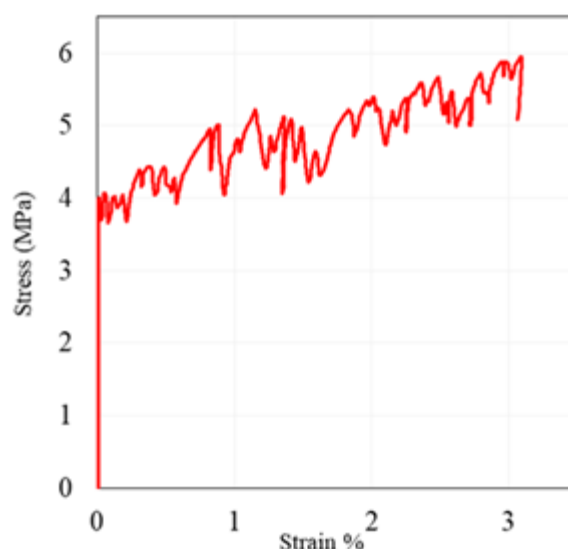
شکل 2: شش نمونه استوانه‌ای ECC با درصد الیاف 1.5% و 2% مطابق استاندارد ASTM C192 [۲۳]



شکل 3: نمونه‌های استخوان سگ جهت انجام آزمایش کشش تک‌محوری [۲۱]



شکل 4: نمودار تنش - کرنش بتن ECC در حالت فشاری



شکل 5: نمودار تنش - کرنش بتن ECC در حالت کششی

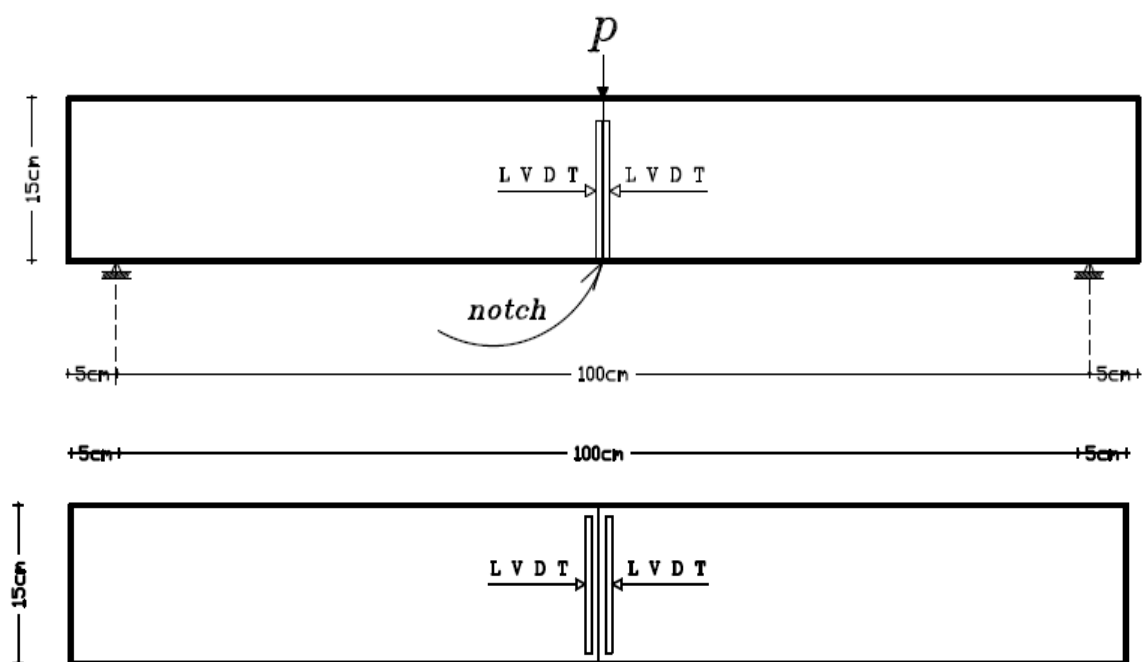
۴- آماده‌سازی نمونه‌ها

ابتدا بدنه داخلی قالب‌های ساخته شده از جنس PVC روغن کاری شده است، سپس متناسب با ابعاد هندسی تیرهای بتنی قالب مونتاژ می‌شود. در ناحیه انتهایی تارهای کششی در وسط دهانه تیرها یک شکاف به ابعاد عرض 3mm و عمق 8mm و طول 150mm و در کل عرض تیر ایجاد گردید. میلگردهای طولی در داخل قالب‌ها با اسپیسر کار گذاشته می‌شوند، سپس اقدام به پر کردن قالب‌ها با بتن تازه می‌شود. به منظور دستیابی به یک بتن یکنواخت و همچنین خارج کردن هوای محبوس بتن از ارتعاش دهنده استفاده شده است. نمونه‌ها مطابق با الزامات ASTM C192 [۲۳]، پس از 24 ساعت عمل‌آوری، بلافاصله پس از خروج از قالب در حوضچه‌های آب آهک اشباع با دمای استاندارد تا روز آزمون قرار گرفتند.

۵- ابزار و پیکربندی آزمایش‌ها

در همه آزمایش‌های مربوط به تیر بتنی از یک دستگاه استاندارد با ظرفیت 500kN استفاده شده است. پس از تنظیم دستگاه به‌میزان 5mm جابه‌جایی در هردقیقه، اولین تیر بتنی ECC تحت آزمایش قرار گرفت. به‌منظور ارزیابی رشد ترک در تیرهای بتنی از تعداد 4 عدد جابه‌جایی سنج^۵ استفاده شده است (شکل 6). برای رسم نمودار بار-بازشدگی دهانه شکاف تعداد 2 حسگر جابه‌جایی سنج در امتداد طول تیرهای بتنی ECC نصب شدند. جابه‌جایی سنج‌ها در دو طرف شکاف ایجاد شده قبلی در تیرها نصب گردیدند (شکل 6). زمانی که دستگاه شروع به اعمال جابه‌جایی کرد، جابه‌جایی سنج‌ها شروع به ثبت داده‌ها کردند. علاوه بر این، 2 عدد جابه‌جایی سنج نیز در قسمت تحتانی تیر در وسط آن جهت ثبت میزان بازشدگی شکاف ایجاد شده قبلی در وسط تیر نصب شدند. تعداد 8 عدد تیر بتنی ECC با این دستگاه آزمایش مورد بررسی قرار گرفتند. پیکربندی آزمایش در شکل 7 نشان داده شده است.

⁵LVDT



شکل 6: موقعیت جابه‌جایی سنج در اطراف ترک. نما از کنار و زیر تیر مورد آزمایش



شکل 7: نحوه قراگیری نمونه‌ها در دستگاه اعمال بار جک

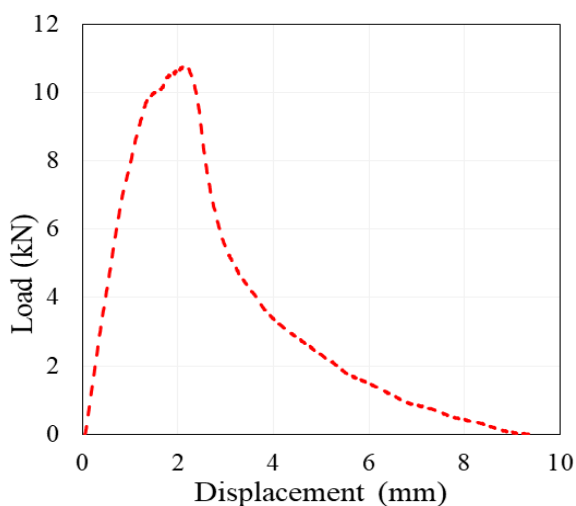
۶- نتایج و بحث

۶-۱- نمودار بار- جابه‌جایی نمونه‌ها

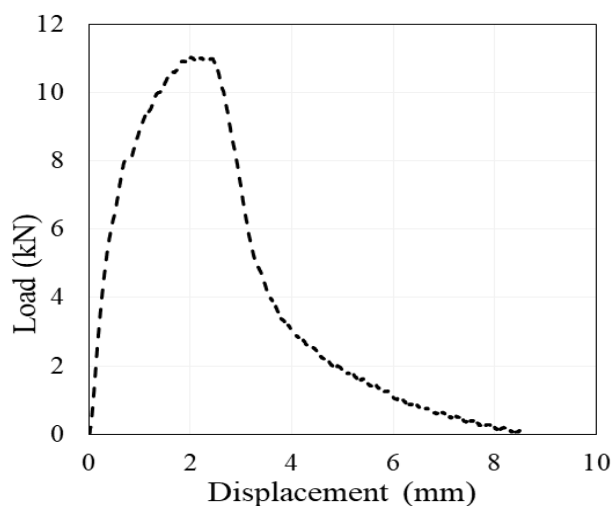
فرآیند رشد ترک در تیرها را می‌توان به سه مرحله تقسیم کرد. مرحله اول با جوانه‌زنی ترک و ظهور ترک‌های بسیار ریز شروع می‌شود. در مرحله دوم با افزایش جابه‌جایی اعمال‌شده بر تیرهای بتنی ECC که قبلاً یک شکاف مصنوعی در آن‌ها ایجاد شده است، ترک‌ها از قسمت شکاف ایجاد شده قبلی شروع به رشد کردند. در مرحله آخر، از ناحیه شکاف ایجادشده قبلی ترک رشد قابل توجهی داشته و مدام دهانه شکاف بزرگ می‌شود (شکل ۸). گرچه در انتهای مرحله آخر ترک یا ترک‌های بزرگی در نمونه‌ها رخ داد، اما مصالح تیر ECC دچار خرابی کلی نشده و تیرها توانستند تا پایان آزمایش انسجام خود را حفظ کنند. اشکال ۹-۱۶ نمودارهای بار- جابه‌جایی تیرهای B1 تا B8 را نشان می‌دهند.



شکل ۸: راستای رشد ترک در دهانه وسط تیر

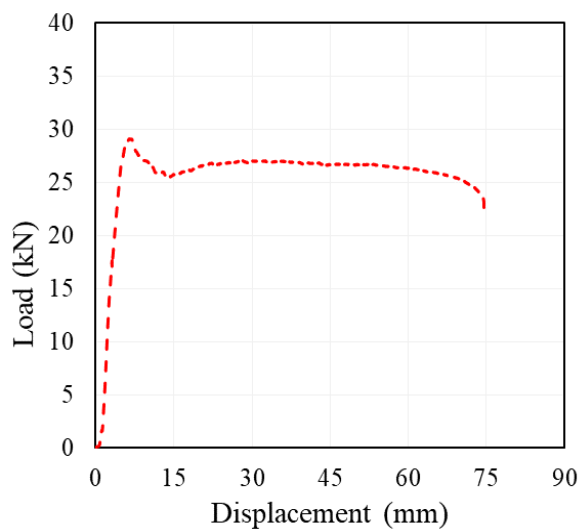


شکل ۹: نمودار بار- جابه‌جایی تیر بتنی غیر مسلح با الیاف ۲٪ (B1)

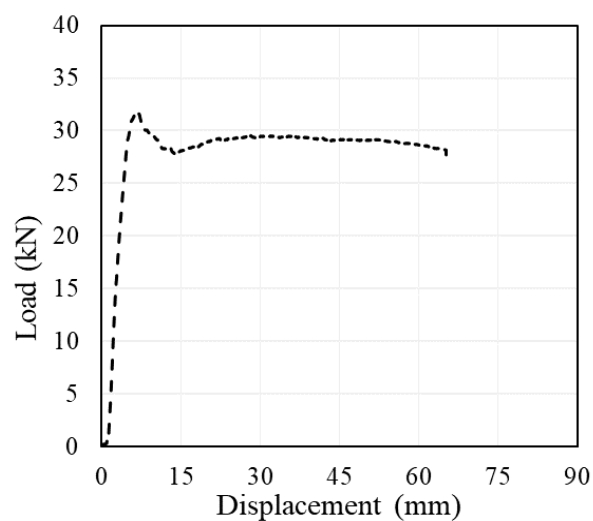


شکل ۱۰: نمودار بار- جابه‌جایی تیر بتنی غیر مسلح با الیاف

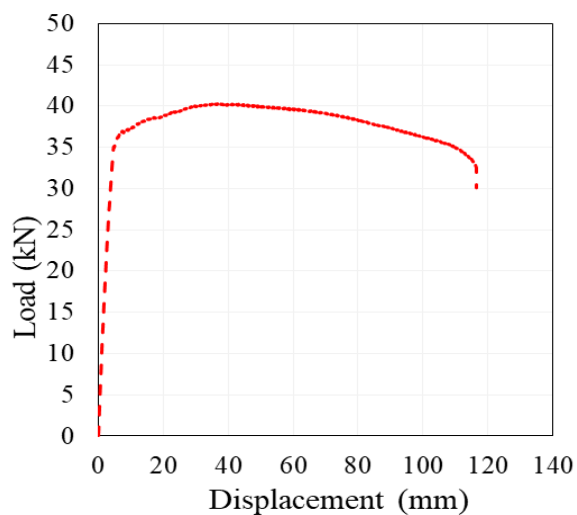
۱.۵٪ (B5)



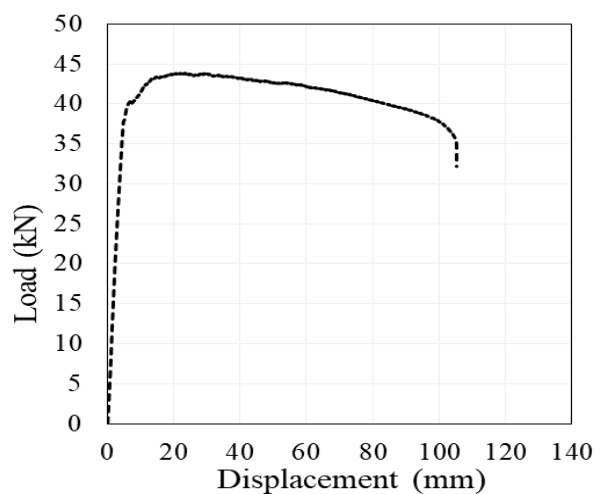
شکل 11: بار - جابه‌جایی تیر بتنی مسلح با الیاف 2% (B2)



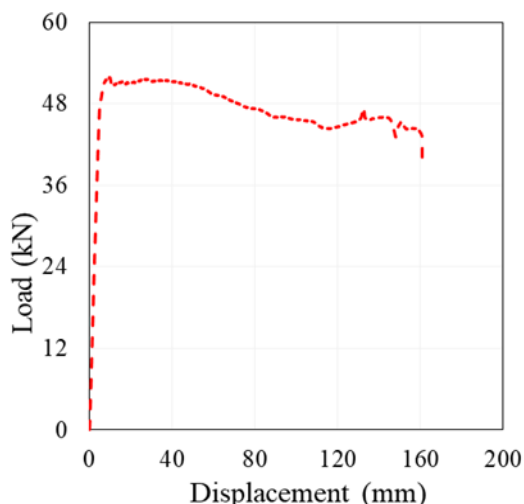
شکل 12: نمودار بار - جابه‌جایی تیر بتنی مسلح با الیاف 1.5% (B6)



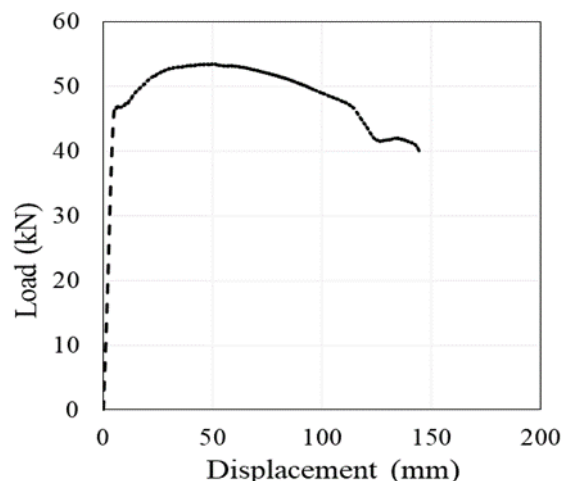
شکل 13: نمودار بار - جابه‌جایی تیر بتنی مسلح با الیاف 2% (B3)



شکل 14: نمودار بار - جابه‌جایی تیر بتنی مسلح با الیاف 1.5% (B7)



شکل 15: نمودار بار-جابجایی تیر بتنی مسلح با الیاف 2% (B4)



شکل 16: نمودار بار-جابجایی تیر بتنی مسلح با الیاف 1.5% (B8)

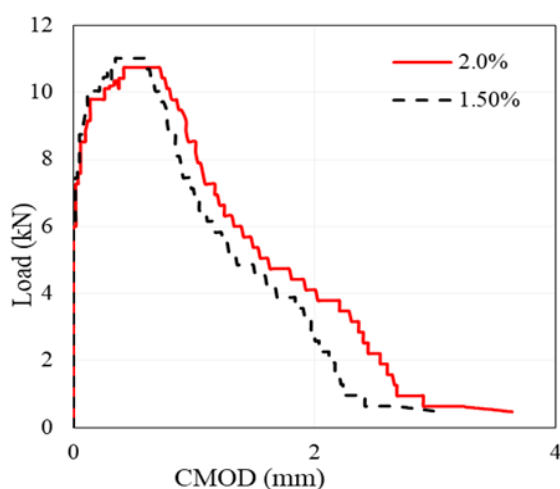
نمودار بار-جابجایی تیر B1 (شکل 9) نشان می‌دهد که در اثر بار اعمالی به تیر بتنی به میزان 4.8kN اولین ترک‌ها ایجاد شده است، درحالی‌که در تیر B5 (شکل 10) اولین ترک در اعمال بار به میزان 4.92kN ایجاد شد. این مرحله همان مرحله جوانه‌زنی و ظهور ترک‌های بسیار ریز است که در تیر بتنی ایجاد می‌شود. سختی اولیه تیر B5 در جابه‌جایی 2.72 میلی‌متر 20% بیشتر از تیر بتنی B1 بوده و مقاومت تسلیم آن نیز به مقدار 5.2% بیشتر از تیر B1 می‌باشد. سختی اولیه تیرهای B6، B7 و B8 به ترتیب 18%، 17% و 17.5% بیشتر از تیرهای B2، B3 و B4 بودند. همچنین در تیرهای بتنی B2 (شکل 11)، B3 (شکل 13) و B4 (شکل 15) به ترتیب در اعمال بار 21.5، 13.6 و 36 کیلونیوتن اولین ترک‌ها ایجاد شدند. با این حال، برای تیرهای بتنی B6 (شکل 12)، B7 (شکل 14) و B8 (شکل 16) مقادیر اعمال بار به اندازه 13.6، 22 و 37.1 کیلونیوتن باعث ایجاد اولین ترک شدند. پس از بررسی مشخص گردید که دلیل اختلاف ناچیز اعمال بار تا رشد اولین ترک در تیرهای بتنی مربوط به مقدار الیاف مصرفی در بتن بوده، به طوری که این مقدار اختلاف در تیرهای B1 و B5 به 2.5% رسید. برای تیرهای B2 و B6 این اختلاف بار به اندازه 3.8% بود. این مقدار برای تیرهای B3 و B7 2.33% رسید و در نهایت برای تیرهای B4 و B8 اختلاف بار به اندازه 3.05% رسید.

۷- نمودار بار-بازشدگی دهانه ترک نمونه‌ها

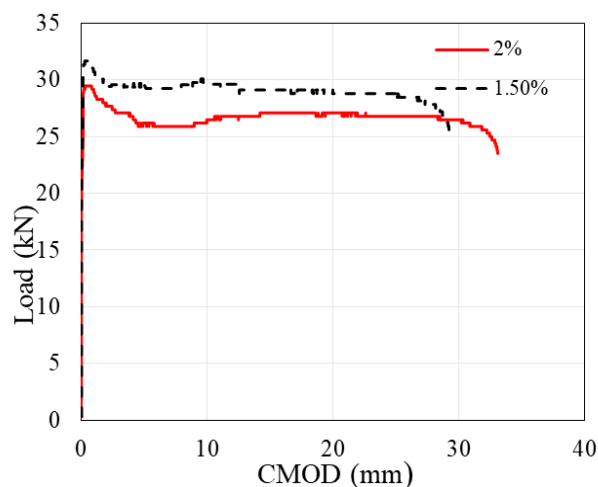
بازشدگی دهانه ترک ($CMOD^6$) یکی از پارامترهای مهم تحلیل و طراحی مکانیک شکست تیرهای بتنی است، که این مقدار را می‌توان به روش‌های مختلف تحلیلی و عددی مکانیک شکست خطی و همچنین به صورت مستقیم محاسبه نمود. در این مطالعه از روش مستقیم برای رسم نمودار بار-بازشدگی دهانه ترک استفاده شده است. برای این منظور در اطراف شکاف مصنوعی ایجاد شده در تیرهای بتنی 2 عدد جابه‌جایی سنج استفاده شده است (شکل 6). عملکرد آن‌ها به این صورت بود که با افزایش بار متناظر با جابه‌جایی میزان بازشدگی دهانه ترک نیز ثبت گردید. در اشکال 17، 18 و 19 نمودارهای بار-بازشدگی دهانه ترک در محل شکاف برای درصدهای مختلف الیاف نمایش داده شده است. در همه نمودارها رشد بازشدگی دهانه ترک را می‌توان به دو بخش تقسیم کرد. قسمت اول نمودار، رفتار خطی نمونه است که تقریباً تا حداکثر باری که تیر بتنی تحمل می‌کند، ادامه دارد. در قسمت دوم نمودار، رفتار رشد بازشدگی دهانه ترک تغییر می‌کند، در واقع

⁶ Crack Mouth Opening Displacement

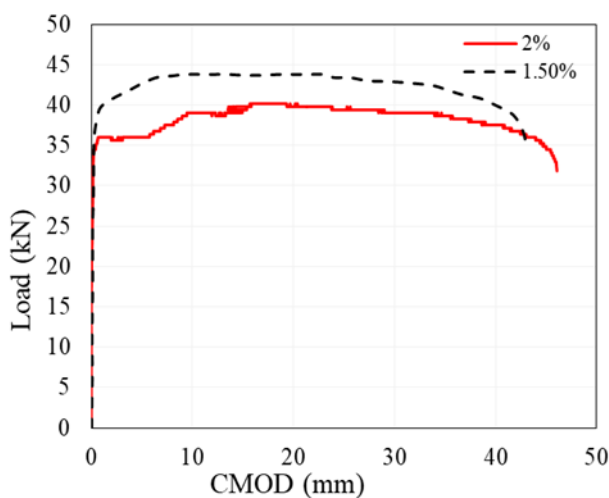
در این حالت تیر بتنی بار بیشتری تحمل نمی‌کند. رفتار رشد بازشدگی دهانه ترک در کل غیرخطی است اما می‌توان دو قسمت نمودار را با دو خط با تقریب خوبی معادل نمود.



شکل 17: مقایسه نمودار بار-بازشدگی دهانه ترک تیرهای بتنی (B1) و (B5)



شکل 18: مقایسه نمودار بار-بازشدگی دهانه ترک تیرهای بتنی (B2) و (B6)

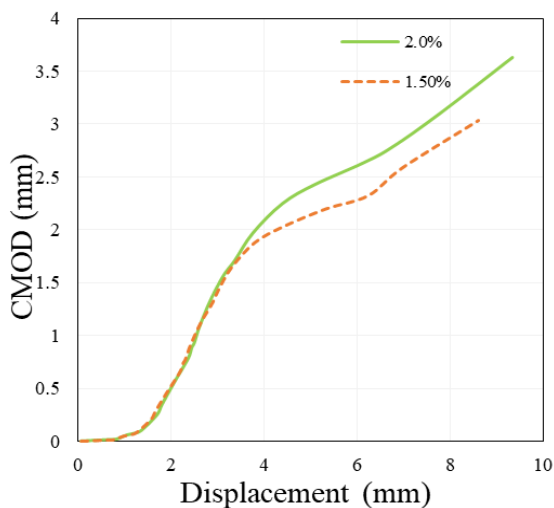


شکل 19: مقایسه نمودار بار-بازشدگی دهانه ترک تیرهای بتنی (B3) و (B7)

برای نمونه‌های بتنی غیرمسلح B1 و B5 میزان بازشدگی دهانه ترک متناظر با بار نهایی به ترتیب 3.63 و 3.03 میلی‌متر می‌باشد (شکل 17). برای نمونه‌های B2 و B6 میزان بازشدگی دهانه ترک متناظر با بار نهایی به ترتیب 33.13 و 29.32 میلی‌متر می‌باشد (شکل 18). همچنین میزان بازشدگی دهانه ترک متناظر با بار نهایی برای نمونه‌های B3 و B7 به ترتیب 46 و 43 میلی‌متر می‌باشد (شکل 19). از آن‌جایی که درصد آرماتور طولی به کار رفته در تیرهای بتنی مسلح متفاوت بود، مشاهده گردید که تیر بتنی B3 با 1.39 درصد آرماتور طولی نسبت به تیر بتنی B2 با 0.69 درصد آرماتور طولی، مقدار بازشدگی دهانه ترک دارای افزایشی به اندازه 38.84 درصد می‌باشد. برای تیر بتنی B4 به دلیل افزایش تعداد آرماتور طولی مشاهده گردید که ترک‌های متعدد بزرگی در طول تیر ایجاد شد که این امر باعث عدم ثبت دقیق داده‌های مربوط به بازشدگی دهانه ترک گردید. به این لحاظ نمودار بار-بازشدگی دهانه ترک برای تیر بتنی B4 رسم نشده است.

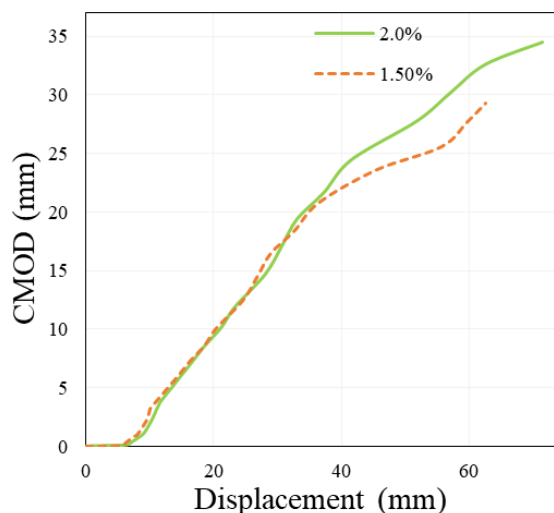
۸- نمودار بازشدگی دهانه ترک-جابه‌جایی نمونه‌ها

مقایسه منحنی‌های بازشدگی دهانه ترک-جابه‌جایی بین تیرهای بتنی ECC با درصد‌های الیاف 1.5 و 2 در اشکال 20-23 نشان داده شده است. شکل 20 مقایسه بین تیرهای بتنی B1 و B5 را نشان می‌دهد. نتایج تجربی نشان داد که تیر بتنی B1 دارای بازشدگی دهانه ترک به میزان 19% و جابه‌جایی به میزان 8.1% بیشتر از نمونه B5 است. همچنین تیر بتنی B2 دارای بازشدگی دهانه ترک به میزان 13% و جابه‌جایی نهایی به اندازه 13.5% بیشتر از نمونه B6 بود (شکل 21). مقدار افزایش بازشدگی دهانه ترک و افزایش جابه‌جایی نهایی برای نمونه B3 نسبت به نمونه B7 به ترتیب 6.9% و 10.5% بود (شکل 22).



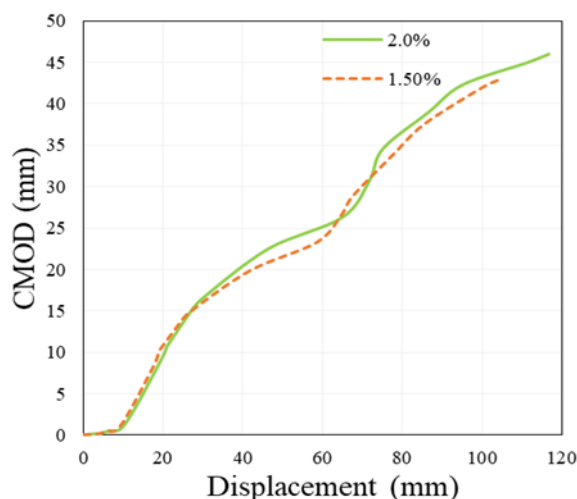
شکل 20: مقایسه نمودار بازشدگی دهانه ترک-جابه‌جایی تیرهای

بتنی (B1) و (B5)



شکل 21: مقایسه نمودار بازشدگی دهانه ترک-جابه‌جایی تیرهای

بتنی (B2) و (B6)

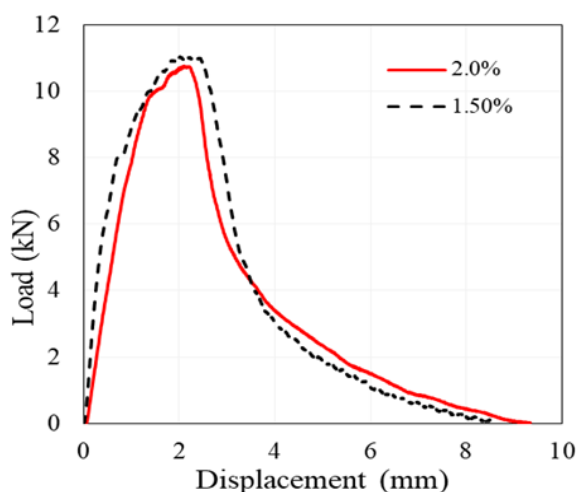


شکل 22: مقایسه نمودار بازشدگی دهانه ترک-جابه‌جایی تیرهای بتنی (B3) و (B7)

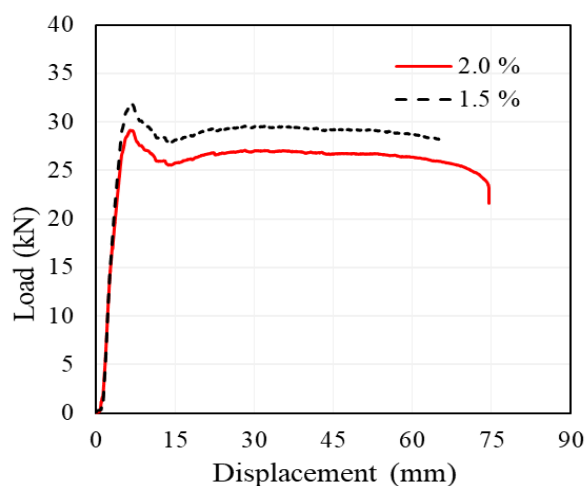
دلیل افزایش قابل توجه بازشدگی دهانه ترک و جابه‌جایی نهایی در تیرهای بتنی (B1)، (B2) و (B3) نسبت به تیرهای (B5)، (B6) و (B7) استفاده از الیاف PVA به میزان 2% می‌باشد. وجود الیاف با درصد بالاتر در طرح اختلاط نمونه‌ها باعث می‌شود که بتن شکل‌پذیرتر و جابه‌جایی بیشتری را متحمل شود. نکته قابل توجه این است که استفاده از الیاف بیشتر از 2% علاوه بر تحمیل هزینه‌های زیاد، ممکن است باعث ضعف کارایی و ایجاد مشکل در فرآیند ترکیب مصالح شود.

۹- مقایسه تیرهای بتنی ECC

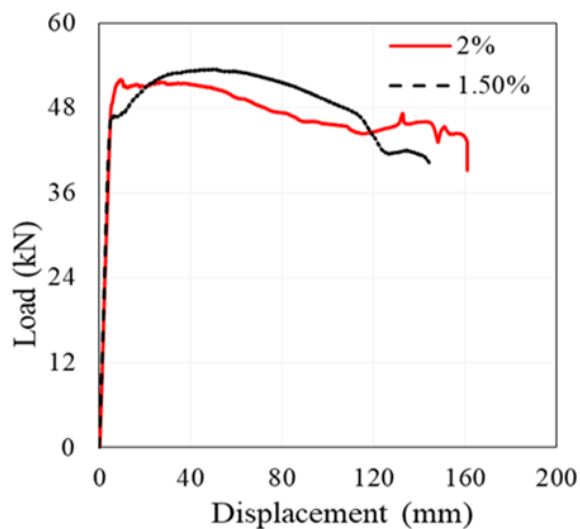
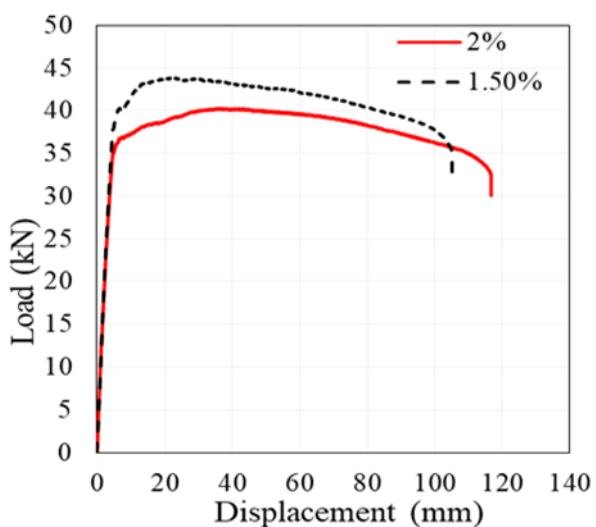
شکل‌های 23-26 مقایسه نمودار بار- جابه‌جایی برای تیرهای بتنی ECC با درصدهای الیاف 1.5 و 2 را نشان می‌دهند. برای نمونه‌های بتنی غیر مسلح B1 و B5 جابه‌جایی متناظر با بار نهایی به ترتیب 9.3 و 8.6 میلی‌متر می‌باشد، بنابراین افزایش درصد الیاف PVA از 1.5% به 2% مقدار جابه‌جایی نهایی 11.6 درصد افزایش می‌دهد. مقدار جابه‌جایی نهایی برای نمونه‌های مسلح B2 و B6 به ترتیب 74 تا 65.2 میلی‌متر ثبت شده است. بنابراین افزایش درصد الیاف PVA از 1.5% به 2% مقدار جابه‌جایی نهایی تیر بتنی مسلح را 13.4 درصد افزایش می‌دهد. همچنین افزایش درصد الیاف از 1.5% (نمونه B3 و B7) به 2% (نمونه B4 و B8) جابه‌جایی نهایی را به ترتیب 10.5 و 11.1 درصد افزایش می‌دهد.



شکل 23: مقایسه نمودار بار- جابه‌جایی تیرهای بتنی (B1) و (B5)



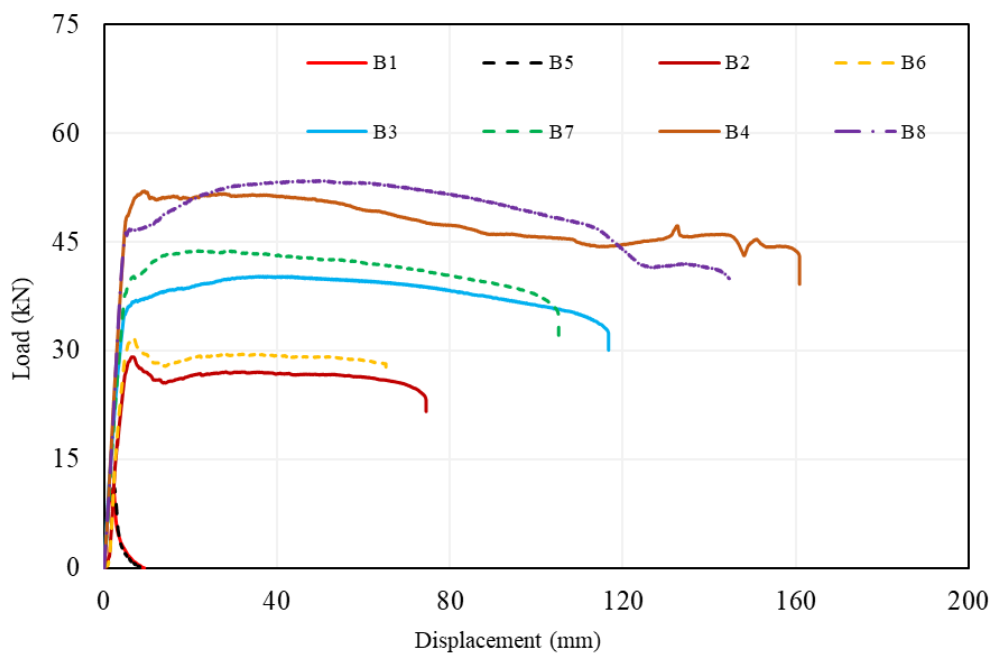
شکل 24: مقایسه نمودار بار- جابه‌جایی تیرهای بتنی (B2) و (B6)



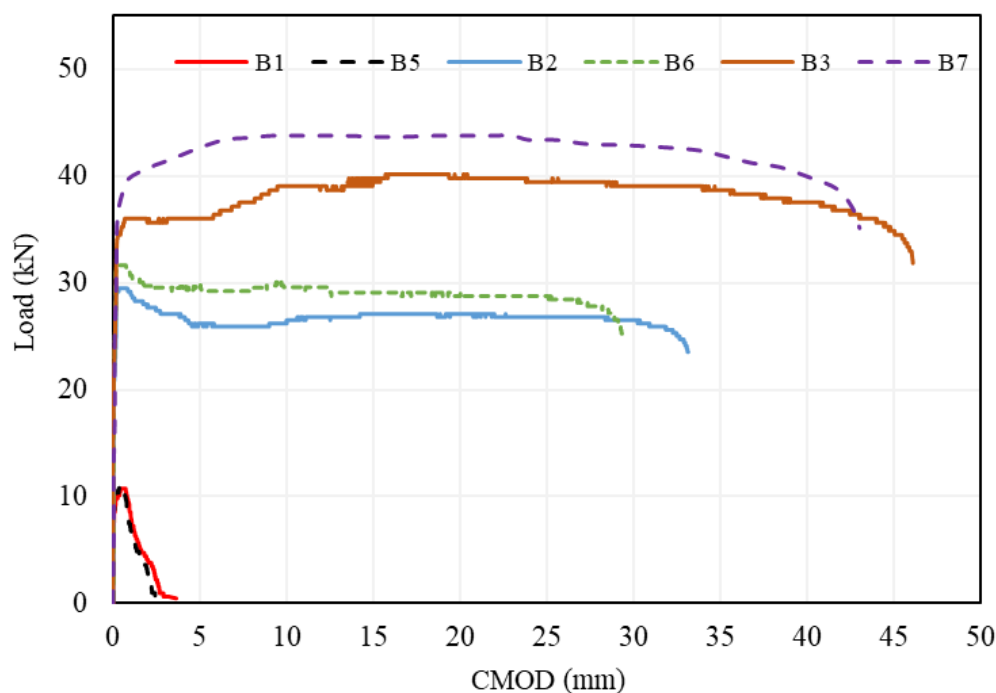
شکل 25: مقایسه نمودار بار-جابہ جایی تیرهای بتنی (B3) و (B7)

شکل 26: مقایسه نمودار بار-جابہ جایی تیرهای بتنی (B4) و

(B8)



شکل 27: مقایسه نمودار بار-جابہ جایی کلیه نمونه‌های آزمایش



شکل 28: مقایسه نمودار بار- بازشدگی دهانه ترک 6 نمونه آزمایش

مقدار بار نهایی برای نمونه‌های B1 و B5 (شکل 23) به ترتیب 10.75 و 11.012 کیلونیوتن می‌باشد. بنابراین افزایش درصد الیاف PVA از 1.5% به 2% مقدار بار نهایی 2.43 درصد کاهش می‌دهد. مقدار بار نهایی برای نمونه‌های B2 و B6 (شکل 24) به ترتیب 29.116 و 31.66 کیلونیوتن ثبت شده است. برای نمونه‌های مذکور افزایش درصد الیاف PVA از 1.5% به 2% مقدار بار نهایی 8.7 درصد کاهش می‌دهد. همچنین افزایش درصد الیاف از 1.5% (نمونه B3 و B7) (شکل 25) به 2% (نمونه B4 و B8) (شکل 26) بار نهایی را به ترتیب 8.9 و 3.7 درصد کاهش می‌دهد. نتایج حاصل از نمودارهای بار- جابه‌جایی تیرهای بتنی در جدول 4 نشان داده شده است.

شکل 27 مقایسه نمودار بار- جابه‌جایی تیرهای (B1)، (B2)، (B3)، (B4)، (B5)، (B6)، (B7) و (B8) را نشان می‌دهد. افزودن الیاف به بتن بر رفتار شکل‌پذیری، میزان جذب انرژی، مقاومت پس از ترک‌خوردگی و مقاومت کششی بتن اثرگذار بوده و از گسترش ترک جلوگیری می‌کند. از دیگر مزایای افزودن الیاف به بتن می‌توان به افزایش طاقت آن اشاره نمود. طاقت عبارت است از مقدار انرژی که نمونه بتنی در اثر نیروهای ضربه‌ای می‌تواند قبل از گسیختگی کامل تحمل نماید. طاقت از سطح زیر نمودار بار- تغییرشکل در آزمایش خمش یا فشار به دست می‌آید و با ضریبی به نام ضریب طاقت بتن مشخص می‌شود. با مقایسه سطح زیر نمودار بار- جابه‌جایی تیرهای بتنی، مشاهده شد که تیر (B2) نسبت به تیر (B6) دارای سطح زیر نمودار بیشتری بوده و دارای طاقت‌پذیری بالاتری بود. در سایر تیرها نیز مشاهده گردید که تیرهایی با درصد الیاف بالاتر نسبت به تیرهایی با درصد الیاف کمتر دارای طاقت‌پذیری بیشتری بودند. استفاده از الیاف به میزان 2% و 1.5% تاثیر زیادی در سختی الاستیک تیرها نداشت. مطابق شکل 24 سختی تیرهای مذکور تقریباً در یک محدوده قرار داشتند و اختلاف آن‌ها بسیار ناچیز بود. مقاومت تیرهای بتنی که تنها درصد الیاف آن‌ها باهم متفاوت بود، اختلاف زیادی باهم نداشتند.

شکل 28 مقایسه نمودار بار- بازشدگی دهانه ترک تیرهای (B1)، (B2)، (B3)، (B5)، (B6) و (B7) را نشان می‌دهد. نتایج نشان داد که با افزایش میزان الیاف از 1.5% به 2% درصد، مقدار بار نهایی اندکی کاهش یافته، اما بازشدگی نهایی دهانه ترک در تیرهایی با الیاف 2% به مراتب بیشتر از تیرهای بود که در آن‌ها از الیاف 1.5% استفاده شده بود. نتایج حاصل از نمودارهای بار- بازشدگی دهانه ترک تیرهای بتنی در جدول 4 نشان داده شده است.

جدول 4: مقایسه نتایج حاصل از نمودارهای بار- جابه‌جایی تیرهای بتنی با الیاف 2% نسبت به تیرهای با الیاف 1.5%

نمونه	بار نهایی (kN)	جابه‌جایی نهایی (mm)	درصد افزایش جابه‌جایی نهایی		درصد افزایش بازشدگی نهایی دهانه ترک
			کاهش بار نهایی	جابه‌جایی نهایی	
B1	10.75	9.3	2.43%	11.6%	19.8%
B2	29.116	74.5	8.7%	13.4%	13%
B3	40.18	110.61	8.9%	10.5%	6.97%
B4	51.317	160.8	3.7%	11.1%	-

۱۰- نتیجه‌گیری

در این مقاله، رشد ترک در تیرهای بتنی ECC در دو حالت مسلح و غیرمسلح مورد بررسی قرار گرفت. در مجموع تعداد هشت نمونه تیر بتنی ECC، شامل چهار نمونه تیر بتنی مسلح و غیرمسلح ECC با الیاف 2% و چهار نمونه تیر بتنی مسلح و غیرمسلح ECC با الیاف 1.5% مورد آزمایش و بررسی قرار گرفتند. به منظور ارزیابی رشد ترک در تیرهای بتنی و تعیین میزان بازشدگی دهانه ترک از تعداد 4 عدد جابه‌جایی سنج استفاده شد. برای اندازه‌گیری میزان بازشدگی دهانه ترک تعداد 2 عدد جابه‌جایی سنج به صورت افقی در راستای طول تیر نصب شدند. پس از انجام آزمایش‌ها و بررسی نمودارها، نتایج مهم را می‌توان به صورت زیر نوشت:

- نتایج آزمایشگاهی نشان داد که در نمونه‌های بتنی B1 و B5 جابه‌جایی متناظر با بار نهایی به ترتیب 9.3 و 8.6 میلی‌متر می‌باشد، بنابراین افزایش درصد الیاف PVA از 1.5% به 2% مقدار جابه‌جایی نهایی 11.6 درصد افزایش می‌دهد.
- مقدار جابه‌جایی نهایی برای نمونه‌های مسلح B2 و B6 به ترتیب 74 و 65.2 میلی‌متر ثبت شده است. بنابراین افزایش درصد الیاف PVA از 1.5% به 2% مقدار جابه‌جایی نهایی تیر بتنی مسلح را 13.4 درصد افزایش داد. همچنین افزایش درصد الیاف از 1.5% (نمونه B3 و B7) به 2% (نمونه B4 و B8) جابه‌جایی نهایی را به ترتیب 10.5 و 11.1 درصد افزایش داد.
- ظرفیت بار نهایی برای نمونه‌های B1 و B5 به ترتیب 10.75 و 11.012 کیلونیوتن می‌باشد. بنابراین افزایش درصد الیاف PVA از 1.5% به 2% مقدار بار نهایی 2.43 درصد کاهش می‌دهد.
- ظرفیت بار نهایی برای نمونه‌های B2 و B6 به ترتیب 29.116 و 31.66 کیلونیوتن ثبت شده است. برای نمونه‌های مذکور افزایش درصد الیاف PVA از 1.5% به 2% مقدار بار نهایی 8.9 درصد کاهش می‌دهد. همچنین افزایش درصد الیاف از 1.5% (نمونه B3 و B7) به 2% (نمونه B4 و B8) بار نهایی را به ترتیب 8.9 و 3.7 درصد کاهش می‌دهد. دلیل این امر که مقادیر بار نهایی در تیرهایی با الیاف 1.5% بیشتر از تیرهای با الیاف 2% بود، این است که بتن ساخته شده با الیاف 1.5% با توجه به این که درصد الیاف کمتری دارد، تراکم الیاف در بتن کمتر شده و بتن یکپارچه‌تر می‌شود.
- برای نمونه‌های B2 و B3 میزان بازشدگی دهانه ترک متناظر با بار نهایی به ترتیب 33.13 و 46 میلی‌متر می‌باشد. از آنجایی که درصد آرماتور طولی به کار رفته در تیرهای بتنی مسلح متفاوت بود، مشاهده گردید که تیر بتنی B3 با 1.39 درصد آرماتور طولی نسبت به تیر بتنی B2 با 0.69 درصد آرماتور طولی، مقدار بازشدگی دهانه ترک دارای افزایشی به اندازه 38.84 درصد می‌باشد.
- در تیرهای بتنی ECC مسلح که از سه عدد میلگرد فشاری و سه عدد میلگرد کششی استفاده شده بود، به دلیل درصد نسبتاً بالای میلگرد رشد ترک دیگر مختص به ناحیه‌ای که قبلاً ایجاد شده بود، نبود و در نواحی دیگری از تیر بتنی رشد ترک به صورت ترک-های نسبتاً عریض مشاهده گردید.
- در تمامی تیرهای بتنی ECC در انتهای بارگذاری، بتن خرد نشده و تنها ریزترک‌ها و ترک‌های عریض‌تر مشاهده گردید. این یکی از ویژگی‌های بسیار خوب این نوع بتن می‌باشد.

مراجع

- [1] Griffith, A. A., "The phenomena of rupture and flow in solids philosophical transaction", Royal Society of London, No. 22, (1920). PP. 163-198.
- [2] Kaplan M.E., "Crack Propagation and the Fracture Concrete", ACI Journal, Vol.58, No5, 1961, pp. 591-610.

- [3] Bencardino F, Rizzuti L, Spadea G, Swamy RN. Implications of test methodology on post-cracking and fracture behaviour of steel fibre reinforced concrete. *Composites Part B: Engineering*. 46 (2013) 31-38.
- [4] Barros JA, Cunha VM, Ribeiro AF, Antunes JA. Post-cracking behaviour of steel fibre reinforced concrete. *Materials and Structures*. 38 (1) (2005) 47-56.
- [5] Li VC, Wu C, Wang S, Ogawa A, Saito T. Interface tailoring for strain-hardening polyvinyl alcohol-engineered cementitious composite (PVA-ECC). *Materials Journal*. 99 (5) (2002) 463-472.
- [6] Yang EH, Sahmaran M, YINGZI Y, Li VC. Rheological control in production of engineered cementitious composites. *ACI Materials Journal*. 106 (4) (2009) 357-366.
- [7] Wang S, Li VC. Engineered cementitious composites with high-volume fly ash. *ACI Materials Journal*. 104 (3) (2007) 233-241.
- [8] Ranade R, Zhang J, Lynch JP, Li VC. Influence of micro-cracking on the composite resistivity of engineered cementitious composites. *Cement and Concrete Research*. 58 (2014) 1-2.
- [9] Yıldırım G, Sahmaran M, Al-Emam MK, Hameed RK, Al-Najjar Y, Lachemi M. Effects of Compressive Strength, Autogenous Shrinkage, and Testing Methods on Bond Behavior of High-Early-Strength Engineered Cementitious Composites. *ACI Materials Journal*. 112(3) (2015).
- [10] Zhang Q, Li VC. Development of durable spray-applied fire-resistive Engineered Cementitious Composites (SFR-ECC). *Cement and Concrete Composites*. 60 (2015) 10-16.
- [11] Maalej M, Li VC. Flexural/tensile-strength ratio in engineered cementitious composites. *Journal of Materials in Civil Engineering*. 6(4) (1994) 13-28.
- [12] Şahmaran M, Lachemi M, Hossain KM, Ranade R, Li VC. Influence of aggregate type and size on ductility and mechanical properties of engineered cementitious composites. *ACI Materials Journal*. 106(3) (2009) 308-16.
- [13] Shamsheer Bahadur Singh, Madappa V.R. Sivasubramanian, Flexural response of ECC strengthened reinforced concrete beams, *Indian Concr. J.* 87 (7) (2013) 35–44.
- [14] Wang Nan, Xu Shi-lang, Flexural response of reinforced concrete beams strengthened with post-poured ultra high toughness cementitious composites layer, *J. Cent. South Univ.* 18 (3) (2011) 932–939.
- [15] Mykolas Daugevicius, Juozas Valivonis, Tomas Skuturna, Vladimir Popov, RC Beams strengthened with HPFRCC: experimental and numerical results, *J. Civ. Eng. Manage.* 22 (2) (2016) 254–270.
- [16] Jingming Cai, Jinlong Pan, Xiaopeng Li., Behavior of ECC-encased CFST columns under axial compression *Engineering Structures* 171 (2018) 1-9
- [17] Ge, W., Ashour, A.F., Cao, D., Lu, W., Gao, P., Yu, J., Ji, X., Cai, C., Experimental study on flexural behavior of ECC-concrete composite beams reinforced with FRP bars, *Composite Structures*. 263 (17) (2018) 131-139
- [18] Hosseini, F. Gencturk, B. Aryan, H. Cadaval, G. "Seismic behavior of 3-D ECC beam-column connections subjected to bidirectional bending and torsion" *Engineering Structures Vol 172*, pp751-763, 2018
- [19] Abouhussien, A. Hassan, A. Ismail, M. AbdelAleem, B. "Evaluating the cracking behavior of ECC beam-column connections under cyclic loading by acoustic emission analysis" *Construction and Building Materials Vol. 215*, pp. 958-968, 2019
- [20] Kalilzadeh Vahidi, E. and Rezaei, M., 2021. Experimental study of the effect of engineering cementitious composites containing carbon nanofibers on concrete-beam-column joint. *Journal of Structural and Construction Engineering*, 8(Special Issue 2), doi: 10.22065/jsce.2020.217538.2061
- [21] Li VC, Wang S, Wu C. Tensile strain-hardening behavior of polyvinyl alcohol engineered cementitious composite (PVA-ECC). *ACI Mater.* 98(6) (2001) 483-92.
- [22] Lepech, M.D., Li, V.C.: Large scale processing of engineered cementitious composites. *ACI Mater. J.* 105 (4) (2008) 358–366
- [23] A. C192, Standard Practice for Making and Curing Concrete Test Specimens in the Laboratory, (2016) ASTM C192/C192M-15