



Research Note

Investigation of Parameters Affecting Bond Strength and Pull-Out Behavior of Polyethylene Terephthalate Ropes in Steel Fiber-Reinforced Cementitious Composites

Reza Akbarifar, Alireza Mortezaei* and Ali Babaei

Department of Civil Engineering, Semnan branch, Islamic Azad University, Semnan, Iran

* corresponding author: (al.mortezaei@iau.ac.ir)

Article Info

Article history:

Received: 29 June 2025

Revised: 29 October 2025

Accepted: 3 November 2025

Keywords:

Recycled pet rope,
fiber-reinforced cementitious
composites (FRCC),
pull-out test,
bond behavior,
steel fiber,
ductility,
sustainable reinforcement.

Abstract

This study investigates the bond behavior of braided ropes made from recycled polyethylene terephthalate (PET) as a potential alternative to conventional steel reinforcement in fiber-reinforced cementitious composites (FRCC). Pull-out tests were conducted according to RILEM RC6 standards on FRCC specimens containing different volume fractions of steel fibers, using steel rebars and PET ropes with equal diameters (14 mm). The experimental results revealed that the maximum pull-out force was approximately 30 kN for steel bars and 7.6 kN for PET ropes, indicating a 75% reduction in bond strength for PET compared to steel. However, the displacement corresponding to the peak load was about 23.5 mm for PET ropes and only 0.6 mm for steel bars, representing a 40-fold increase in ductility for PET.

In all experiments, PET ropes failed internally without being pulled out from the matrix, while steel bars exhibited bond-slip failure.

The inclusion of steel fibers in the matrix significantly enhanced the bond performance, especially in terms of energy absorption and post-peak ductility.

For instance, in specimens containing 1% steel fibers, the maximum pull-out load of the PET ropes reached 7.6 kN at a displacement of 9.3 mm, showing a clear improvement over fiberless samples.

The experimental observations were further analyzed by comparing the bond-slip responses of PET and steel reinforcements, which demonstrated that PET exhibits a gradual softening after peak load instead of a brittle bond loss. This characteristic suggests a more stable and energy-dissipating interfacial mechanism. In addition, the use of recycled PET not only provides a sustainable and eco-friendly reinforcement option but also contributes to reducing construction waste and CO₂ emissions. Such properties make PET ropes particularly suitable for structures requiring high ductility and seismic resilience. The findings of this study can serve as a reference for future modeling of PET-concrete interface behavior and for developing design guidelines for sustainable fiber-reinforced composites.

Funding: This research did not receive any specific grant from funding agencies in the public, commercial, or not-for-profit sectors.

Conflicts of Interest: The authors declare no conflict of interest.

Author Contributions: All authors contributed to the reported work for conceptualization, methodology, validation, writing-review and editing, and supervision.

To Cite this article:

Akbarifar, R., Mortezaei, A. and Babaei, A. 2026. Investigation of parameters affecting bond strength and pull-out behavior of polyethylene terephthalate ropes in steel fiber-reinforced cementitious composites, Sharif Civil Engineering Journal, 42(1), 117-126. <https://doi.org/10.24200/sjce.2025.67085.3436>



بررسی پارامترهای مؤثر در پیوستگی و رفتار بیرون کشیدگی طناب‌های پلی اتیلن ترفتالات از کامپوزیت‌های سیمانی مسلح الیافی فولادی

رضا اکبری فر، علیرضا مرتضایی* و علی بابایی

گروه مهندسی عمران، واحد سمنان، دانشگاه آزاد اسلامی، سمنان، ایران.

*نویسنده مسئول (al.mortezaei@iau.ac.ir)

چکیده

در پژوهش حاضر، رفتار پیوستگی طناب‌های بافته‌شده از پلی اتیلن ترفتالات (PET) بازیافتی به عنوان جایگزینی برای میلگرد فولادی در کامپوزیت‌های الیافی (FRCC) بررسی شده است. برای این منظور، بر روی نمونه‌های آزمایشگاهی FRCC با درصد‌های مختلف الیاف فولادی، آزمون‌های بیرون کشیدگی مطابق با استاندارد RILEM RC6 بر روی میلگرد فولادی و طناب PET با قطر یکسان انجام شده و نتایج نشان داده است که نیروی بیرون کشیدگی برای میلگرد، حدود ۳۰ کیلونیوتن و برای PET، حدود ۷/۶ کیلونیوتن بوده است، که بیانگر کاهش ۷۵ درصدی مقاومت چسبندگی PET است. با این حال، میزان جابجایی متناظر با بیشینه بار در PET حدود ۲۳/۵ میلی متر و در میلگرد فولادی، ۰/۶ میلی متر بوده است؛ که نشان دهنده ۴۰ برابری افزایش شکل پذیری PET در مقایسه با میلگرد است. در تمامی نمونه‌ها، PET دچار گسیختگی شده و از بتن خارج نشده است، در حالی که میلگردها با لغزش از بتن جدا شده‌اند. نتایج به دست آمده نشان داده است که با وجود مقاومت کمتر طناب PET در برابر کشش، رفتار پیوستگی آن به ویژه در نواحی با نیاز به شکل پذیری بالا، می تواند در طراحی های خاص استفاده شود.

اطلاعات مقاله

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۴/۰۸

تاریخ اصلاحیه: ۱۴۰۴/۰۸/۰۷

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۸/۱۲

واژگان کلیدی:

کامپوزیت سیمانی مسلح الیافی (FRCC)، پلی اتیلن ترفتالات (PET)، طناب پلیمری بازیافتی، رفتار بیرون کشیدگی، پیوستگی بتن و میلگرد.

۱. مقدمه

امروزه با توسعه روزافزون علم و تکنولوژی، نیاز به سازه‌هایی با عملکرد بهتر و مقاومت بالاتر در برابر بارهای مختلف، به ویژه در شرایط بارگذاری شدید، مانند: زلزله یا بارهای دینامیکی، به استفاده از مواد کامپوزیتی پیشرفته در صنعت ساخت و ساز به عنوان یک راهکار مؤثر توجه شده است. در این میان، استفاده از کامپوزیت‌های سیمانی مسلح شده با الیاف (FRCC)^۱ به دلیل بهبود رفتار مکانیکی، افزایش شکل پذیری، و کنترل ترک خوردگی جایگاه ویژه‌ای یافته‌اند.^[۱ و ۲]

یکی از چالش‌های مهم در این زمینه، بررسی پیوستگی بین مصالح تقویت کننده و ماتریس سیمانی است، که نقش تعیین کننده‌ای در عملکرد کلی سازه دارد.^[۳] در این راستا، استفاده از طناب‌های پلیمری بازیافتی مانند پلی اتیلن ترفتالات (PET)^۲ به عنوان جایگزینی برای میلگردهای فولادی سنتی، به دلیل مزایایی

همچون: وزن کم، مقاومت در برابر خوردگی، و قابلیت بازیافت بررسی شده است. با این حال، شناخت دقیق رفتار بیرون کشیدگی و مکانیزم‌های گسیختگی طناب‌های پلیمری بازیافتی در ماتریس‌های سیمانی همچنان نیازمند مطالعات بیشتری است.^[۴ و ۵]

به کامپوزیت‌های پایه سیمانی در سال‌های اخیر، توجه گسترده‌ای شده است. داسیلوا^۳ و همکاران (۲۰۲۵)،^[۱] در یک مرور جامع نشان داده‌اند که افزودن الیاف به ماتریس سیمانی، علاوه بر بهبود خواص مکانیکی، از قبیل مقاومت خمشی و کششی، باعث افزایش چقرمگی، کنترل ترک خوردگی، و دوام طولانی مدت سازه می شود.^[۶] طراحی بهینه ترکیب سیمان، مواد افزودنی معدنی (مثل خاکستر بادی یا میکروسیلیس) و نوع فیبر (فولادی، پلی پروپیلن، بازالت یا کربن) می تواند عملکرد نهایی کامپوزیت را در شرایط بارگذاری استاتیکی و دینامیکی به طور چشمگیری ارتقا بخشد. کامپوزیت‌های پایه سیمانی با داشتن خصوصیات منحصربه‌فرد خود، مانند: در دسترس بودن منابع

³ da Silva

¹ Fiber-Reinforced Cementitious Composites

² Poly Ethylene Terephthalate

استناد به این مقاله:

اکبری فر، رضا، مرتضایی، علیرضا و بابایی، علی، ۱۴۰۵. بررسی پارامترهای مؤثر در پیوستگی و رفتار بیرون کشیدگی طناب‌های پلی اتیلن ترفتالات از کامپوزیت‌های سیمانی مسلح الیافی فولادی. مهندسی عمران شریف، ۴۲(۱)، صص. ۱۱۷-۱۲۶. <https://doi.org/10.24200/j30.2025.67085.3436>



تقویت‌کننده‌ی بتن مؤثر بوده و آغشته‌سازی منقطع با اپوکسی به‌روزی سازه را تا ۵۰٪ ارتقاء داده است.

حج فروش و همکارانش (۲۰۲۰)^[۱۶] با استفاده از آزمون بیرون کشیدن میلگرد از داخل نمونه‌ی استوانه‌ای بتن حاوی ۱/۵٪ حجمی الیاف فولادی، مقاومت پیوستگی بین میلگرد و بتن را در نمونه‌های بتنی، که مدت ۲ دقیقه در معرض مستقیم میدان مغناطیسی قرار گرفته‌اند، را مطالعه کرده و دریافته‌اند که شکست ناشی از آزمون بیرون کشیدگی برای همه‌ی نمونه‌ها رخ داده است. علاوه بر این، مقاومت پیوستگی نمونه‌های مربوط به مربوط به میلگردهای شماره‌ی ۱۴ و ۲۰ به ترتیب حدود ۸۳ و ۵۱ درصد افزایش یافته است. در مطالعه‌ی مذکور بیان شده است که اعمال میدان مغناطیسی بر بتن تازه باعث افزایش مقاومت فشاری آن بیش از ۲۱٪ شده و مقاومت کششی و خمشی نمونه‌های بتنی به ترتیب تا ۹ و ۱۳ درصد افزایش یافته است، که این امر به دلیل بهبود تراکم بتن و کاهش منافذ است.

ولنگ^۲ و همکاران (۲۰۲۱)^[۱۷] رفتار بیرون کشیدگی میله‌های BFRP از کامپوزیت پایه سیمانی تقویت‌شده با الیاف بازالت را به‌صورت تجربی بررسی کرده و نتیجه گرفته‌اند که قطر میله نسبت به میزان الیاف، تأثیر بسیار کمی در مقاومت چسبندگی و لغزش میانگین داشته است.

لین و آسترگ^۳ (۲۰۲۱)^[۱۸] اندرکنش بین میلگردهای فولادی و کامپوزیت پایه سیمانی را با استفاده از الیاف هیبریدی متشکل از الیاف فولادی و PVA با طول‌ها و قطرهای مختلف مطالعه کرده و دریافته‌اند که بسته به میزان الیاف، انواع مختلف شکست شامل شکست لغزشی و رشد ترک در نمونه‌ها ایجاد می‌شود. ژائو و گیائو^۴ (۲۰۱۸)^[۱۹] رفتار چسبندگی میلگرد پوشش داده‌شده با اپوکسی و بتن توانمند الیافی را بررسی و یک مدل تحلیلی به‌منظور تخمین منحنی‌های نیرو - جابجایی ارائه کرده‌اند. خاک سفید و همکاران (۲۰۲۱)^[۲۰] رفتار چسبندگی بین میلگرد با بتن معمولی و بتن فوق توانمند الیافی را مطالعه کرده و با استفاده از آزمون بیرون کشیدگی، منحنی‌های نیرو - جابجایی را برای نمونه‌های مختلف استخراج کرده و به مطالعه‌ی تأثیر پارامترهای مختلف در نیروی بیرون کشیدگی پرداخته‌اند.

احمد و علی (۲۰۲۵)^[۲] رفتار بیرون کشیدگی و برشی میلگردهای پلاستیکی بازیافتی (HDPE) در بتن را برای ساخت مسکن بدون ملات با پیکربندی‌های مختلف قطر، محل قرارگیری، مخلوط بتن، و نوع میلگرد بررسی و ملاحظه کرده‌اند که میلگردهای آجدار عملکرد بهتری نسبت به میلگردهای بازیافتی در بیرون کشیدگی دارند. همچنین اشاره کرده‌اند که رفتار کرنشی بلندمدت میلگرد پلاستیکی بازیافتی باید در آینده برای پیامدهای واقعی در ساخت‌وساز در نظر گرفته شود.

اورهاگه^۵ و همکاران (۲۰۲۴)^[۳] رفتار پیوستگی الیاف کربن بازیافتی در بتن فوق توانمند را مطالعه کرده و نشان داده‌اند که الیاف پیرولیز شده تا ۱۵۰-۲۵۰ درصد، مقاومت برشی ظاهری بالاتری نسبت به الیاف بکر داشته‌اند، که اهمیت فرایند بازیافت در بهبود پیوستگی را برجسته می‌سازد. همچنین، بای^۶ و همکاران (۲۰۲۴)^[۵] عملکرد برشی تیرهای RC بدون خاموت تقویت‌شده با PET FRP را در دو حالت کاملاً پیچ و U شکل بررسی کرده و نشان داده‌اند

تولید آن در طبیعت، سازگار بودن در بسیاری از شرایط اقلیمی، و وزن نسبتاً پایین باعث شده است تا کامپوزیت‌های پایه سیمانی به‌عنوان یکی از مصالح اصلی مورد استفاده در صنعت ساختمان باشد.^[۷ و ۸] یکی از مهم‌ترین پیشرفت‌ها در تکنولوژی کامپوزیت‌های پایه سیمان، توسعه‌ی استفاده از انواع مختلف الیاف در آن است.^[۹ و ۱۰] در این میان، پیوستگی FRCC و آرماتور، نقش کلیدی را در رفتار اعضاء سازه‌ای در هنگام قرارگیری تحت اثر بارهای استاتیکی و دینامیکی ایفا می‌کند. لذا، با توجه به کمبود اطلاعات در خصوص رفتار چسبندگی میلگردهای در تماس با بتن‌های الیافی، بررسی مورد اخیر حائز اهمیت بسیاری بوده است. استفاده از الیاف در کامپوزیت سیمانی، موارد: شکل‌پذیری، مقاومت به ضربه، مقاومت خمشی، مقاومت کششی، و استحکام آن در برابر بارهای دینامیکی و گسیختگی نرم را افزایش می‌دهد.^[۱۱ و ۱۲] علاوه بر آن، استفاده از انواع مختلف الیاف، امکان گسیختگی زود هنگام و آسیب‌های پوسته‌پوسته شدن بتن را کاهش می‌دهد و از انتشار ترک جلوگیری می‌کند.

در سال‌های اخیر، پژوهش‌های متعددی به بررسی رفتار پیوستگی مصالح غیرفلزی مشابه FRP در ماتریس سیمانی پرداخته‌اند، تا با بهبود درگیری مکانیکی، چقرمگی و شکل‌پذیری نهایی سازه را ارتقا بخشند. تاکاساگو^۱ و همکاران (۲۰۲۳)^[۱۰] از میلگردهای بافته‌شده پلیمری (AFRP) در ماتریس FRCC تقویت‌شده با الیاف PVA استفاده کرده‌اند، تا رفتار پیوستگی و شکل‌پذیری کامپوزیت در زیر بارهای کششی - فشاری اندازه‌گیری شود. نتایج پژوهش ایشان نشان داده است که با افزایش درصد حجمی الیاف PVA، مقاومت پیوستگی بین میلگرد AFRP و بتن به‌طور قابل توجهی افزایش می‌یابد و الگوی ترک‌خوردگی نیز به ناحیه‌ی شکل‌پذیرتر منتقل می‌شود؛ بنابراین، استفاده از الیاف PVA علاوه بر افزایش چقرمگی، باعث بهبود درگیری مکانیکی الیاف بافته‌شده پلیمری در بتن می‌شود، که مبنای مناسبی برای طراحی FRCC های با مصالح بازیافتی همچون طناب PET فراهم می‌آورد. اسماعیلی و همکاران (۲۰۱۷)^[۱۳] با ارائه‌ی یک روش بافت جدید برای میلگردهای کربنی نشان داده‌اند که افزایش درگیری مکانیکی سطح بافته تا بیش از ۴۰٪ مقاومت پیوستگی را ارتقا می‌دهد. این امر اهمیت طراحی سطح طناب‌های PET را برجسته می‌سازد؛ به‌گونه‌ای که بهینه‌سازی الگوی بافت می‌تواند جلوی گسیختگی زودرس و کاهش مقاومت را بگیرد.

اکبری‌فر و همکاران (۲۰۲۴)^[۱۴] با موضوع ارزیابی پارامترهای مؤثر در رفتار پیوستگی بین میلگرد فولادی آجدار و کامپوزیت‌های سیمانی مسلح الیافی فولادی به روش آزمون بیرون کشیدگی و مدل‌سازی المان محدود نشان داده‌اند که افزودن الیاف فولادی، رفتار پیوستگی میلگرد با کامپوزیت را بهبود می‌بخشد و مانع از گسیختگی تدریجی بتن می‌شود. همچنین چقرمگی و ظرفیت جذب انرژی بتن با افزایش در صد الیاف فولادی تا ۲٪ افزایش می‌یابد، که در سازه‌های مقاوم در برابر زلزله بسیار حائز اهمیت است. نتایج به‌دست‌آمده از پژوهش اخیر، آثار قابل توجه الیاف فولادی، پارامترهای هندسی، و نوع مواد در رفتار چسبندگی و مقاومت پیوستگی را نشان می‌دهد. کمانی و همکاران (۲۰۱۹)^[۱۵] نیز آثار استفاده از الیاف در تقویت بتن را به‌صورت تجربی مطالعه کرده و دریافته‌اند که آغشته‌سازی جزئی اپوکسی در کارایی منسوج

⁴ Zhou & Qiao

⁵ Overhage

⁶ Bai

¹ Takasago

² Wang

³ Lin & Ostertag

میکروسیلیس با اندازه‌ی متوسط ذرات ۰/۵ میکرومتر با چگالی ۲۶۳۰ کیلوگرم بر مترمکعب، ماسه‌ی سیلیسی با دانه‌بندی قطر ۰/۲ تا ۰/۶ میلی‌متر، فوق‌روان‌کننده‌ی Structuro ۳۵۵ بر پایه‌ی پلی‌کربوکسیلات، آب، و الیاف فولادی تشکیل شده است.

نسبت‌های وزنی اجزاء تشکیل‌دهنده‌ی طرح اختلاط نسبت به سیمان به ترتیب شامل ۲/۰ برای خاکستر بادی، ۱/۰۰ برای ماسه‌ی سیلیسی، ۰/۰۷ برای میکروسیلیس، ۰/۰۴ برای فوق‌روان‌کننده، و ۰/۲۶ برای آب بوده است. خاکستر بادی کلاس F از منابع خارجی وارد و در مطالعات آزمایشگاهی استفاده شده است، هر چند دسترسی محدود آن ممکن است جنبه‌های عملی را تحت تأثیر قرار دهد، اما جایگزین‌هایی مانند پوزولان محلی می‌تواند در کاربردهای عملی بررسی شود.

برای ساخت کامپوزیت سیمانی الیافی، ابتدا مصالح خشک، شامل سیمان، خاکستر بادی، و میکروسیلیس در سرعت ۸۰ دور بر دقیقه و برای ۴ دقیقه مخلوط شده است. فوق‌روان‌کننده^۹ در آب حل و سپس به مخلوط اضافه و در سرعت ۱۳۰ دور بر دقیقه و به مدت ۱۰ دقیقه مخلوط شده است. نهایتاً، الیاف فولادی اضافه و در ۱۲۰ دور بر دقیقه به مدت ۴ دقیقه مخلوط شده‌اند. مقاومت فشاری کامپوزیت سیمانی بدون الیاف بر روی نمونه‌های مکعبی با ابعاد ۱۵۰ میلی‌متر در هر وجه و در سن ۲۸ روزه برابر ۷۲ مگاپاسکال به‌دست آمده است.

الیاف فولادی با قطر ۰/۶ و طول ۱۴ میلی‌متر بوده است، که در شکل ۱ مشاهده می‌شود. الیاف دارای مقاومت کششی ۲۴۰۰ مگاپاسکال و تنش تسلیم ۴۳۰ مگاپاسکال و نیز مدول یانگ و نسبت پواسون به ترتیب برابر ۲۰۸ گیگاپاسکال و ۰/۲۸ بوده است.

افزودن الیاف فولادی به بتن باعث افزایش ویسکوزیته و کاهش روانی آن می‌شود، زیرا الیاف مقاومت در برابر جریان را بالا می‌برد و ممکن است منجر به درهم‌تنیدگی یا تشکیل گره (balling) شود. برای حفظ کارایی مطلوب بتن، با افزایش درصد الیاف، باید مقدار فوق‌روان‌کننده به‌تدریج افزایش یابد تا روانی و گسترش‌پذیری بتن جبران شود.

۲.۲. طناب‌های پلی‌اتیلن ترفتالات (PET)

مدیریت زباله به‌ویژه زباله‌های پلاستیکی، یکی از چالش‌های بزرگ زیست‌محیطی در دنیای امروز است. مصرف گسترده‌ی محصولات پلاستیکی، از جمله بطری‌های نوشیدنی ساخته‌شده از پلی‌اتیلن ترفتالات (PET)، سهم



شکل ۱. میکروالیاف فولادی استفاده‌شده.

که استفاده از روش تمام‌پیچیده می‌تواند ظرفیت برشی و تغییرشکل را به ترتیب تا ۱۲۳ و ۴۲/۵ درصد افزایش دهد.

علاوه بر این، زنگ^۷ و همکاران (۲۰۲۵)،^[۶] رفتار پیوستگی میلگردهای ترموپلاستیک GFRP با بتن را با استفاده از شیوه‌ی نوآورانه‌ی سطحی بررسی کرده و نشان داده‌اند که روش مذکور، مقاومت پیوستگی را تا بیش از ۷/۶ مگاپاسکال در طول پیوند سه برابر قطر افزایش می‌دهد. همچنین درمان سطحی می‌تواند مقاومت پیوستگی را بیش از ۶/۷ مگاپاسکال افزایش دهد. ایشان اشاره کرده‌اند که میله‌های GFRP ترموپلاستیک مزایای متمایزی ارائه می‌دهند، که مهم‌ترین آن‌ها قابلیت بازیافت و توانایی تغییرشکل آن‌ها تحت گرما و نیروهای خارجی است.

پیوستگی میان مصالح تقویتی و ماتریس سیمانی، یکی از عوامل کلیدی در تعیین عملکرد نهایی سازه‌های بتن مسلح است. در حالی که رفتار بیرون‌کشیدگی میلگردهای فولادی در بتن به‌طور گسترده مطالعه شده است، درباره‌ی طناب‌های PET، به‌ویژه در ساختارهای FRCC، دانش محدودی وجود دارد. تفاوت در خواص مکانیکی دو ماده‌ی اخیر، از جمله انعطاف‌پذیری بالا، تنش تسلیم پایین، و نداشتن آج مکانیکی در طناب PET، سبب می‌شود تا مکانیزم‌های انتقال تنش، موده‌های شکست، و رفتار پیوستگی آن‌ها با بتن، تفاوت اساسی با میلگردهای فولادی داشته باشد. از سوی دیگر، تاکنون کمتر پژوهشی به مقایسه‌ی مستقیم عملکرد چسبندگی و مقاومت بیرون‌کشیدگی طناب PET و میلگرد فولادی در بستر کامپوزیت‌های سیمانی مسلح الیافی پرداخته است. به همین دلیل، بررسی دقیق رفتار بیرون‌کشیدگی طناب PET و تحلیل نتایج حاصل از آزمایش‌های تجربی می‌تواند به درک بهتر ویژگی‌های مصالح نوین ذکرشده کمک کند و زمینه‌ساز کاربرد گسترده‌تر آن در پروژه‌های عمرانی شود.

پژوهش حاضر، در پاسخ به خلأ علمی مذکور، به بررسی آزمایشگاهی و مقایسه‌ای رفتار بیرون‌کشیدگی طناب PET و میلگرد فولادی در بتن FRCC پرداخته و اثر الیاف فولادی در رفتار چسبندگی آن‌ها را نیز مطالعه کرده است. بر این اساس، در پژوهش حاضر برای اولین بار، طناب PET به‌عنوان جایگزینی برای میلگرد فولادی در بتن FRCC بررسی شده است. طناب PET به‌دلیل ویژگی‌های خاصی چون انعطاف‌پذیری بالا و مقاومت کششی مناسب، در مقایسه با میلگرد فولادی، رفتار متفاوتی در چسبندگی با بتن نشان داده است.

۲. آزمون‌های تجربی

۱.۲. مشخصات مصالح، طرح اختلاط، و مواد استفاده‌شده

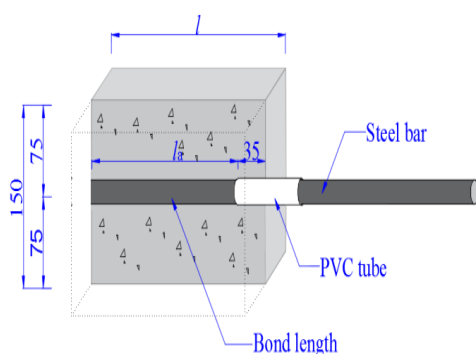
در بخش کنونی، به نحوه‌ی ساخت FRCC و همچنین مشخصات مواد استفاده‌شده پرداخته شده است. طرح اختلاط کامپوزیت پایه سیمانی توسعه داده‌شده در مطالعه‌ی چاوو^۸ و همکاران (۲۰۰۶)،^[۲۱] جهت بررسی رفتار بیرون‌کشیدگی میلگرد استفاده شده است.

برای اختلاط از سیمان پرتلند نوع III با مساحت سطح مخصوص ۳۴۱۳ سانتی‌مترمربع بر گرم استفاده شده است. همچنین از خاکستر بادی کلاس F با چگالی ۲۲۹۰ کیلوگرم بر مترمکعب و اندازه‌ی ذرات متوسط ۱۰ میکرومتر،

^۹ superplasticizer

^۷ Zeng

^۸ Chao



شکل ۳. مشخصات هندسی نمونه‌ی بیرون کشیدگی و نمونه‌ی ساخته‌شده.

(۱۹۸۳).^[۲۲] به جهت امکان مقایسه و تطبیق داده‌ها برای کشش مستقیم نمونه‌های طناب PET نیز از همین روش آزمایش استفاده شده و بخش مدفون طناب پلیمری در ناحیه‌ی میانی نمونه‌ی بتنی قرار گرفته است. براساس مطالعات کاروالهو^{۱۰} (۲۰۱۷)، برای جلوگیری از گسیختگی زودرس و شبیه‌سازی شرایط واقعی حضور میلگرد در بتن و حذف کردن آثار فشار موضعی سطح بارگذاری‌شده از دو غلاف PVC در بالا و پایین نمونه‌ها مطابق شکل ۳ استفاده شده است.^[۲۳] طول ناحیه‌ی چسبنده $l_a = 5d$ ، ابعاد نمونه‌ی بتنی برابر $150 \times 150 \text{ (mm}^2\text{)}$ ، و طول $l_a + 35$ انتخاب شده است، که طول لوله‌ی PVC برابر ۳۵ میلی‌متر بوده است.

به‌منظور انجام آزمون‌های تجربی، از دستگاه کشش یونیورسال با ظرفیت بیشینه‌ی نیروی ۲۰ کیلو نیوتن و نرخ جابجایی ۰/۲ میلی‌متر بر دقیقه استفاده شده است. این نرخ جابجایی براساس استاندارد RILEM برای مواد حساس به نرخ بارگذاری مانند طناب PET و FRCC انتخاب شده است. برای اندازه‌گیری جابجایی نسبی (slip) در آزمایش بیرون کشیدگی، از حسگر LVDT با دقت ۰/۰۱ میلی‌متر استفاده شده است. در چیدمان اخیر (شکل ۴)، LVDT به انتهای آزاد میلگرد یا طناب متصل بوده و با استفاده از یک گیره‌ی قابل تنظیم به فریم مستقل پیچ‌شده به بلوک بتنی فیکس شده است. اختلاف جابجایی‌های نسبی ثبت‌شده توسط LVDT، نشان‌دهنده‌ی لغزش بین میلگرد یا طناب و بتن است. درنهایت، آزمون‌های تجربی بر روی ۱۵ نمونه‌ی ساخته‌شده انجام شده است، که شامل ۳ تکرار برای هر سطح درصد الیاف (۰، ۰/۵، ۱، ۱/۵، و ۲ درصد) بوده است. از داده‌های ذکرشده، منحنی‌های نیرو-لغزش برای نمونه‌های FRCC با درصدهای مختلف الیاف به‌دست آمده است.



شکل ۲. نمونه‌ای از طناب بافته‌شده از پلی‌اتیلن ترفتالات.

قابل توجهی در انباشت زباله‌های پلاستیکی دارد. تجزیه‌ی طولانی‌مدت مواد مذکور در طبیعت، پژوهشگران را به جستجوی راهکارهای نوین برای بازسازی و استفاده‌ی مجدد از آن‌ها ترغیب کرده است؛ که یکی از راهکارهای مذکور، بازیافت و به‌کارگیری مجدد آن‌ها در پروژه‌های عمرانی است.

در این راستا، تبدیل بطری‌های پلاستیکی به طناب‌های PET به‌عنوان جایگزینی برای میلگردهای فولادی در سازه‌های بتن مسلح، توجه بسیاری از پژوهشگران را جلب کرده است. مهم‌ترین مزیت طناب‌های PET، افزایش شکل‌پذیری سازه است، که به سازه‌ها اجازه می‌دهد تحت بارهای مختلف، تغییرشکل بیشتری را بدون شکست تجربه کنند. طناب PET استفاده‌شده در مطالعه‌ی حاضر، دارای قطر ۱۴ میلی‌متر، مقاومت کششی حدود ۴۵۰ مگاپاسکال، مدول الاستیسیته‌ی ۳ گیگاپاسکال، چگالی ۱۳۸۰ کیلوگرم بر مترمکعب، و کشیدگی شکست ۳۰٪ بوده است.^[۴] در شکل ۲، نمونه‌ای از طناب بافته‌شده از پلی‌اتیلن ترفتالات مشاهده می‌شود.

۳.۲. مشخصات نمونه‌ها، آماده‌سازی نمونه‌ها، و نام‌گذاری

در پژوهش حاضر، برای دسترسی به خصوصیات استحکام میان فازی بین میلگرد و ماتریس سیمانی، آزمایش بیرون کشیدگی مرکزی ترتیب داده شده است. آزمون بیرون کشیدگی شامل خارج کردن میلگرد از داخل بتن است. نیروی بیرون کشیدگی از یک طرف و جابجایی نیز از انتهای دیگر میلگرد اندازه‌گیری شده است.

نمونه‌ها، شامل مکعب‌های 150×150 میلی‌متر با طناب یا میلگرد جای‌گذاری‌شده در مرکز بوده‌اند. آماده‌سازی، شامل اختلاط مواد، ریختن کامپوزیت سیمانی الیافی در قالب، و برهبر برای تراکم، و عمل‌آوری ۲۸ روزه در شرایط استاندارد (دما ۲۰ درجه‌ی سانتی‌گراد، رطوبت ۹۵٪) بوده است. نام‌گذاری نمونه‌ها براساس درصد الیاف تا ۲ درصد به این صورت انجام شده است:

FRCC-Pullout-0.0

FRCC-Pullout-0.5

FRCC-Pullout-1.0

FRCC-Pullout-1.5

FRCC-Pullout-2.0

۴.۲. روش آزمایش بیرون کشیدگی میلگرد و طناب پلیمری

در پژوهش حاضر، ساخت نمونه‌های لازم جهت آزمایش بیرون کشیدگی میلگرد از بتن براساس استاندارد RILEM-RC۶ انجام شده است



(الف)



(ب)

شکل ۶. (a) مسیر ترک و شکافته شدن بتن برای نمونه‌ی کامپوزیت سیمانی بدون الیاف؛ (b) خرابی از نوع بیرون کشیدگی برای نمونه‌ی کامپوزیت سیمانی دارای ۱٪ وزنی الیاف.

مختلف درصد الیاف (۰، ۰/۵، ۱، ۱/۵، ۲ درصد) ارائه شده است. نمودارهای اخیر، تأثیر استفاده از میکروالیاف فولادی در رفتار چسبندگی میلگرد با بتن را نشان می‌دهند؛ که با استفاده از آن‌ها می‌توان اطلاعات مفیدی در مورد تأثیر پارامترهای مختلف، از جمله بیشینه‌ی نیروی پیوستگی، لغزش متناظر با بیشینه‌ی نیروی پیوستگی، متوسط تنش پیوستگی، و مقدار جذب انرژی یا چقرمگی به دست آورد.

افزایش درصد الیاف فولادی باعث بهبود چسبندگی میلگرد به ماتریس بتن می‌شود، زیرا الیاف با تقویت شبکه‌ی بتن و توزیع یکنواخت‌تر تنش‌ها، مقاومت کششی و برشی بتن را افزایش می‌دهند. در میلگردهای فولادی آجدار، علاوه بر چسبندگی شیمیایی و پایداری اصطکاکی، چفت‌وبست مکانیکی بین بتن و آج‌ها نقش مهمی در بالابردن مقاومت پیوستگی ایفا می‌کنند. مکانیزم چسبندگی برشی که از طریق درگیری آج‌ها و کلیدهای بتنی بین آن‌ها نیرو را منتقل می‌کند، بیشترین تنش پیوستگی را ایجاد می‌کند.

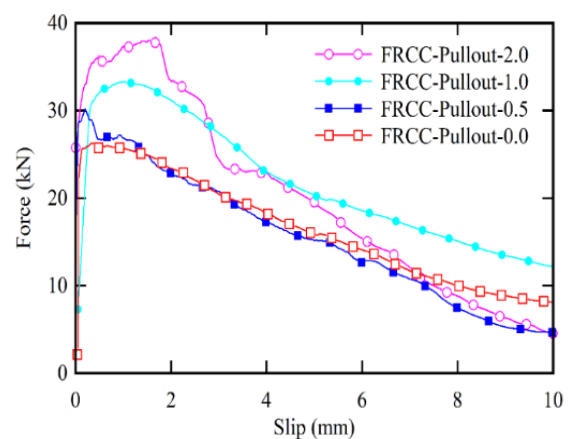
در شکل ۶، دو نوع شکست متفاوت مشاهده می‌شود:

شکل (a): نمونه‌های بدون الیاف با ترک طولی و شکافتگی بتن؛ شکل (b): نمونه‌های دارای ۱٪ وزنی الیاف با بیرون کشیدگی بدون شکافت عمده، که نشانگر کنترل ترک توسط الیاف است.

در ادامه، رفتار بیرون کشیدگی طناب PET بررسی شده است. در شکل‌های ۷ الی ۱۰، منحنی‌های نیرو-تغییرمکان و همچنین مود خرابی به ترتیب برای



شکل ۴. آزمایش بیرون کشیدگی میلگرد و نحوه‌ی قرارگیری حسگر جابجایی سنج.

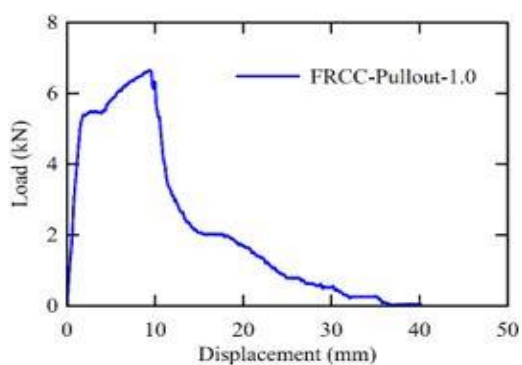


شکل ۵. تأثیر کسر حجمی الیاف فولادی در منحنی نیرو- لغزش به دست آمده از آزمون کشیدگی در میلگرد فولادی آجدار با قطر ۱۴ میلی‌متر.

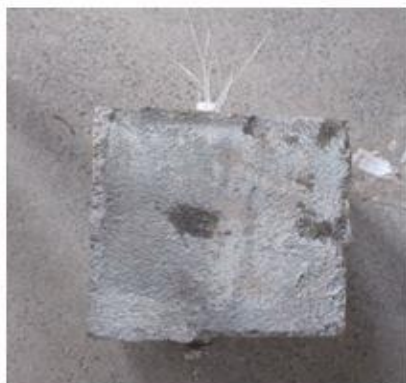
۳. نتایج

آزمون بیرون کشیدگی طناب بافته شده از پلی اتیلن ترفتالات و همچنین میلگرد فولادی بر روی ۱۵ نمونه‌ی آزمایشی حاوی طناب پت به قطرهای ۱۴ و ۱۵ حالت برای میلگرد با قطر ۱۴ ساخته شده در سن ۲۸ روزه انجام شده است (با ۳ تکرار برای هر حالت برای اطمینان از تکرارپذیری، ضریب تغییرات کمتر از ۱۰٪). نتایج آزمایش، توسط رایانه‌ی متصل به دستگاه، به صورت منحنی نیرو- لغزش ترسیم شده و اطلاعاتی از قبیل: نیروی بیشینه، جابجایی متناظر با نیروی بیشینه، جابجایی نهایی میلگرد، و نیروی متناظر با آن، که در پژوهش حاضر نیروی باقیمانده نامیده شده و سایر اطلاعات مربوط به آزمایش برای هر نمونه توسط دستگاه آزمون کشش ارائه شده است.

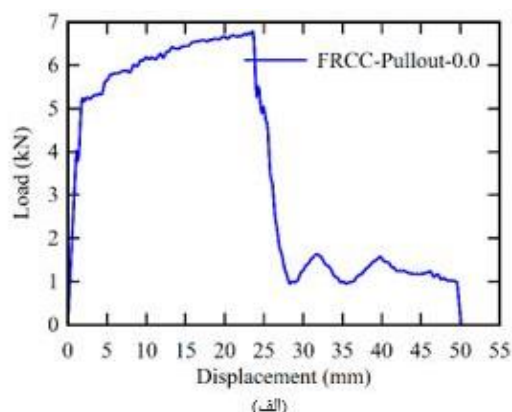
نمودارهای بار- تغییرمکان به دست آمده از آزمایش بیرون کشیدگی میلگرد فولادی آجدار برای نمونه‌های بتن FRCC بدون الیاف و بتن FRCC دارای میکرو الیاف فولادی در شکل ۵ برای میلگردهای با قطر ۱۴ میلی‌متر و مقادیر



(الف)



(ب)



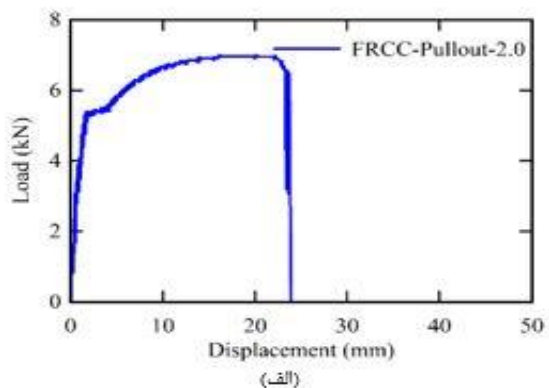
(الف)



(ب)

شکل ۷. (a) منحنی نیرو-جابجایی، و (b) مکانیزم خرابی برای بیرون کشیدگی طناب بافته‌شده از پلی‌اتیلن ترفتالات از بتن نمونه‌ی ۰/۰ FRCC-Pullout-

شکل ۹. (a) منحنی نیرو-جابجایی، و (b) مکانیزم خرابی برای بیرون کشیدگی طناب بافته‌شده از پلی‌اتیلن ترفتالات از بتن نمونه‌ی ۱/۰ FRCC-Pullout-

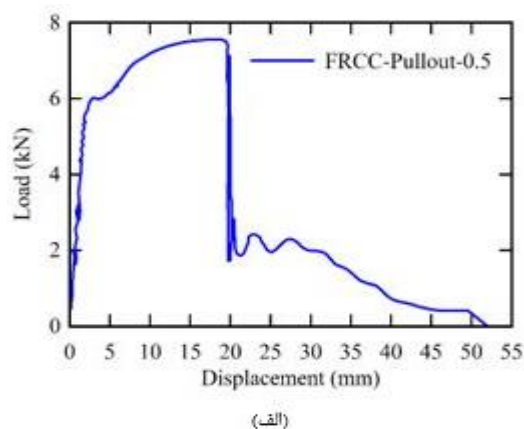


(الف)



(ب)

شکل ۱۰. (a) منحنی نیرو-جابجایی، و (b) مکانیزم خرابی برای بیرون کشیدگی طناب بافته‌شده PET از بتن نمونه‌ی ۲/۰ FRCC-Pullout



(الف)



(ب)

شکل ۸. (a) منحنی نیرو-جابجایی، و (b) مکانیزم خرابی برای بیرون کشیدگی طناب بافته‌شده از پلی‌اتیلن ترفتالات از بتن نمونه‌ی ۰/۵ FRCC-Pullout-

کوچک شدن سطح مقطع و افزایش بعد به دلیل سفت شدن ریزتارها در یکدیگر و درهم تنیدگی الیاف و سفت شدن طناب بوده است. بازیابی طناب PET پس از انجام آزمایش نمونه مذکور، نشان می دهد که نمونه از لبه بیرونی دچار پارگی شده است، که بیانگر تشکیل یک پیوستگی مناسب بین طناب با بتن و همچنین چسبندگی مناسب الیاف نیز است. بدیهی است با افزایش طول جایگذاری، میزان چسبندگی نمونه به بتن افزایش یافته است.

نتایج بیرون کشیدگی طناب بافته شده از پلی اتیلن ترفتالات از بتن نمونه ۱/۰- FRCC-Pullout، که در شکل ۹ ارائه شده است، نشان می دهد که در این حالت بیشینه نیرو برابر ۶/۷ کیلونیوتن در جابجایی ۹/۳ میلی متر است. پس از نیرو، کاهش تدریجی در نیروی تحمل شده توسط طناب مشاهده می شود که نشان از پاره شدن تدریجی رشته های طناب است. همان طور که مد خرابی بیرون کشیدگی نمونه مذکور در شکل ۹ (b) مشاهده می شود، نشان می دهد که پارگی طناب به صورت تدریجی و رشته به رشته است.

با مقایسه رفتار بیرون کشیدگی طناب بافته شده از پلی اتیلن ترفتالات با میلگرد فولادی (شکل ۱۰) مشاهده می شود که الیاف PET انعطاف پذیری بیشتر و تنش تسلیم کمتری نسبت به میلگردهای فولادی دارند. همچنین با مقایسه تنش چسبندگی به دست آمده با نتایج حاصل از طرح های ساخته شده با میلگرد فولادی و طناب PET، این نتیجه حاصل شده است که تنش ها در نمونه PET کاهش یافته اند، که به دلیل نیروی کمتر طناب PET نسبت به میلگرد فولادی نیز است.

همچنین، نتایج به دست آمده نشان می دهند که میزان نیروی بیشینه در طناب PET حدود ۴ برابر کمتر از میلگرد فولادی و مقدار جابجایی در نمونه PET بیش از ۴۰ برابر بیشتر از نمونه فولادی بوده است. همچنین الیاف PET انعطاف پذیری بیشتر و تنش تسلیم کمتری نسبت به میلگردهای فولادی دارند و با مقایسه تنش چسبندگی به دست آمده از روابط نظری با نتایج حاصل از طرح های ساخته شده با میلگرد فولادی و طناب PET، این نتیجه به دست آمده است که تنش ها در نمونه PET کاهش یافته اند.

۴. نتیجه گیری

۱- بیشینه نیروی بیرون کشیدگی در نمونه های دارای میلگرد فولادی به طور میانگین حدود ۳۰ کیلونیوتن و در نمونه های دارای طناب PET حدود ۷/۶ کیلونیوتن بوده است، که بیانگر کاهش قابل ملاحظه ای (حدود ۷۵٪) در مقاومت چسبندگی طناب PET نسبت به میلگرد فولادی است.

۲- مقدار جابجایی متناظر با نیروی پیک در طناب PET به طور میانگین بیش از ۲۳ میلی متر و در میلگرد فولادی کمتر از ۱ میلی متر گزارش شده است، که نمایانگر افزایش قابل توجه در شکل پذیری طناب PET است.

۳- بررسی نمودارهای نیرو-جابجایی نشان داد که رفتار چسبندگی طناب PET متشکل از سه ناحیه مشخص (سختی اولیه خطی، افزایش غیر خطی تا پیک، و افت نیرو پس از گسیختگی) است. برخلاف میلگردهای فولادی، که عمدتاً با لغزش و افت پیوستگی از ماتریس جدا شده اند، طناب های PET در هیچ یک از نمونه ها از بستر سیمانی خارج نشده و شکست همگی به صورت گسیختگی داخلی الیاف و بافت طناب رخ داده است؛ که نشانگر یک پیوستگی مکانیکی و اصطکاکی مؤثر میان رشته های طناب و خمیر سیمان است.

۴- از سوی دیگر، نقش الیاف فولادی در بهبود عملکرد نمونه ها به ویژه در حالت

بتن معمولی و بتن تقویت شده با ۵/۰، ۱۰/۰ و ۲ درصد الیاف فولادی مشاهده می شود. آزمون بیرون کشیدگی تا جابجایی حدود ۵۵ میلی متر میلگرد ادامه یافته است. با توجه به شکل عمومی منحنی، منحنی نیرو-جابجایی را می توان به سه ناحیه متمایز تقسیم بندی کرد:

ناحیه اول به صورت خطی و با سختی نسبتاً بالاست، که نشان می دهد جابجایی اولیه، مستلزم اعمال تغییرات نیروی بیشتری است. ناحیه دوم، محدوده قبل از رسیدن به نیروی اوج است، که پس از مرحله اول و به صورت تغییرات غیر خطی تا رسیدن به نیروی اوج ادامه دارد. ناحیه سوم، مربوط به بعد از نیروی پیک است، که در آن با افزایش جابجایی، مقدار نیرو کاهش می یابد.

در بررسی رفتار پیوستگی بین بتن FRCC و طناب بافته شده از پلی اتیلن ترفتالات به قطر ۱۴ میلی متر مشاهده شده است که طناب بافته شده از پلی اتیلن ترفتالات با طول درگیری ۸ سانتی متر با بتن FRCC، در هیچ یک از نمونه های بیرون کشیدگی از داخل بتن خارج نشده و در همه موارد، طناب دچار گسیختگی شده است. در هر چهار نمونه موجود با افزایش بارگذاری، جابجایی نیز افزایش یافته است؛ ولی نیروی مذکور نتوانسته است باعث استهلاک پیوستگی بتن و طناب بافته شده از پلی اتیلن ترفتالات شود و در نتیجه به جای لغزش و خروج طناب از داخل نمونه مکعبی، افزایش نیرو باعث گسیختگی طناب بافته شده از پلی اتیلن ترفتالات شده است.

طناب PET به عنوان یک جایگزین برای میلگرد فولادی، رفتار متفاوتی در چسبندگی و مقاومت کششی نشان داده است. طناب PET به دلیل انعطاف پذیری بیشتر و مقاومت کششی پایین تر نسبت به میلگرد فولادی، در مراحل اولیه بارگذاری، چسبندگی خوبی به ماتریس بتن ایجاد کرده است؛ اما در مراحل بارگذاری بالاتر، دچار گسیختگی سریع تر شده است. مشاهده های انجام شده به دلیل مقاومت کمتر طناب PET در برابر کشیدگی های زیاد و ناتوانی در تحمل بارهای بالاتر در مقایسه با میلگرد فولادی است. نمودار بار-تغییر مکان آزمایش بیرون کشیدگی طناب پلاستیکی از بتن بدون الیاف در شکل ۷ نشان می دهد که بیشینه بار تحمل شده برابر با ۶/۷ کیلونیوتن در تغییر مکان حدود ۲۳/۵ میلی متر بوده است. پس از رسیدن به نقطه اوج مذکور، بار به سرعت کاهش یافته و در حدود ۳۰ میلی متر تغییر مکان به مقدار ۱ کیلونیوتن رسیده است، که نشان دهنده شکست چسبندگی و اتمام پارگی طناب در بتن است.

در ادامه، نمودار، نوسان های کوچکی داشته است، که ناشی از گسیختگی تدریجی رشته های باقیمانده طناب بوده و در نهایت، در تغییر مکان حدود ۵۰ میلی متر بار به صفر کاهش یافته است، که نشان دهنده شکست کامل و پارگی طناب است. نتایج اخیر حاکی از مقاومت چسبندگی مطلوب اولیه طناب به بتن است، اما کاهش سریع بار پس از اوج، نشان دهنده گسیختگی سریع پس از لغزش اولیه است.

با توجه به اینکه طناب در نمونه شاهد دچار پارگی شده است، بنابراین در نمونه های دیگر نیز به طور حتم مود خرابی به صورت گسیختگی طناب خواهد بود، که نتایج تجربی نیز نتیجه مذکور را تأیید می کنند. با توجه به شکل ۸ مشاهده می شود که در نمونه با ۵/۰٪ الیاف فولادی نیرو تا مقدار ۶/۱ کیلونیوتن در جابجایی ۲/۴۰ میلی متر افزایش و سپس تا حدودی ثابت مانده و مجدداً افزایش یافته است. کاهش اولیه مربوط به کشیده شدن بافت طناب و

دارد، از جمله سازه‌های مقاوم در برابر زلزله یا نواحی غیرسازه‌ای با عملکرد شکل‌پذیر.

در مجموع، پژوهش حاضر نشان می‌دهد که استفاده از طناب‌های بازیافتی در بتن FRCC، علاوه بر مزایای زیست‌محیطی، پتانسیل مکانیکی قابل‌قبولی دارد و می‌تواند به‌عنوان یک گزینه‌ی مکمل یا جایگزین در طراحی‌های خاص مدنظر قرار گیرد. بررسی بیشتر در خصوص بهینه‌سازی سطح تماس، نحوه‌ی درهم‌تنیدگی، و هندسه‌ی سطحی طناب می‌تواند به افزایش عملکرد پیوستگی و کاربرد عملی این مصالح نوین منجر شود.

طناب PET، کاملاً مشهود است. افزایش درصد الیاف فولادی موجب افزایش نیروی پیک و پایداری منحنی نیرو-جابجایی در ناحیه‌ی پس از پیک شده است. در نمونه دارای ۱٪ وزنی الیاف، نیروی پیک طناب PET به مقدار ۷/۶ کیلونیوتن در جابجایی ۹/۳ میلی‌متر رسیده است، که نسبت به نمونه‌ی بدون الیاف، افزایش در مقاومت و پایداری شکست را نشان می‌دهد.

۵- تحلیل نهایی داده‌ها نشان می‌دهد که اگرچه مقاومت نهایی طناب PET کمتر از میلگرد فولادی است، اما قابلیت جذب انرژی بیشتر (چقرمگی)، شکل‌پذیری بالا، و رفتار تدریجی در شکست، می‌تواند آن را به گزینه‌ای مناسب برای سازه‌هایی تبدیل کند که در آن‌ها انعطاف‌پذیری و جذب انرژی اهمیت

References- منابع

1. da Silva Neto, J. T., Soares Junior, P. R. R., Reis, E. D., Maciel, P. S. S., Gomes, P. C. C., Gouveia, A. M. C. and Bezerra, A. C. S., 2025. Fiber-reinforced cementitious composites: recent advances and future perspectives on key properties for high-performance design. *Discover Civil Engineering*, 2(1), pp.1-20. <https://doi.org/10.1007/s44290-025-00209-9>
2. Ahmed, S. and Ali, M., 2025. Investigation on pullout and shear behavior of recycled plastic rebar-concrete connection for mortar-free housing. *Journal of Building Engineering*, 114, 114266. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2025.114266>.
3. Overhage, V., Heins, K., Kimm, M., Ryu, G., You, Y. J., Kim, H.-Y. and Gries, T., 2024. Investigation of pull-out and mechanical performance of fibre reinforced concrete with recycled carbon fibres. *Materials and Structures*, 57, 140. <https://doi.org/10.1617/s11527-024-02453-4>.
4. Jouyandeh, R. T., Hemmati, A. and Mortezaei, A., 2023. Using woven recycled plastic fibers in reinforced concrete beams. *Construction and Building Materials*, 404, 133262. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.133262>.
5. Bai, Y.-L., Tang, Z.-K. and Mei, S.-J., 2024. Experimental study on shear performance of PET FRP-strengthened RC beams without stirrups. *Case Studies in Construction Materials*, 20, e03272. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2024.e03272>.
6. Zeng, J.-J., Sun, H.-Q., Xia, J.-R., Zhao, S., Feng, Z., Zhao, B. and Zhou, J.-K., 2025. Bond behavior between concrete and thermoplastic GFRP bars with novel surface features. *Engineering Structures*, 343, 121161. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2025.121161>
7. Makul, N., 2021. *Principles of cement and concrete composites*. Springer Nature, Cham, Switzerland.
8. Gencel, O., Karadag, O., Oren, O. H. and Bilir, T., 2021. Steel slag and its applications in cement and concrete technology: A review. *Construction and Building Materials*, 283, pp.34-56. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.122783>.
9. Yuan, Z. and Jia, Y., 2021. Mechanical properties and microstructure of glass fiber and polypropylene fiber reinforced concrete: an experimental study. *Construction and Building Materials*, 266, pp.12-35. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121048>.
10. Takasago, S., Kanakubo, T., Kobayashi, H. and Sasaki, H., 2023. Bond and cracking characteristics of PVA-fiber-reinforced cementitious composite reinforced with braided AFRP bars. *Fibers*, 11(12), pp.107. <https://doi.org/10.3390/fib11120107>
11. Ashrafiyan, A., Berenjian, J. and Asghari Tilaki, F., 2020. Optimization of mixture proportions of self-compacted fiber reinforced concrete incorporating polypropylene using genetic and crow search algorithms. *Modares Civil Engineering Journal*, 20(3), pp.1-12 [In Persian]. <https://20.1001.1.24766763.1399.20.3.11.1>
12. Gholhaki, M., Pachideh, G. and Rezayfar, O., 2017. An experimental study on mechanical properties of concrete containing steel and polypropylene fibers at high temperatures. *Journal of Structural and Construction Engineering*, 4(3), pp.167-179 [In Persian]. <https://doi.org/10.22065/jsce.2017.77392.1072>
13. Esmaeili, J., Sharifi, I., Andalibi, K. and Kasaei, J., 2017. Effect of different matrix compositions and micro steel fibers on tensile behavior of textile

- reinforced concrete. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 246, 012031.
[doi:10.1088/1757-899X/246/1/012031](https://doi.org/10.1088/1757-899X/246/1/012031)
14. Akbarifar, R., Mortezaei, A. and Babaei, A., 2024. Meso-scale study of bond behavior between ribbed steel rebar and fiber-reinforced cementitious composite considering rebar rib geometry. *Periodica Polytechnica: Civil Engineering*, 68(4), pp.1350-1366.
<https://doi.org/10.3311/PPci.28772>
15. Kamani, R., Kamali Dolatabadi, M., Asghharian Jeddi, A. A. and Nasrollahzadeh, K., 2019. Increasing the efficiency of carbon fiber bundles in reinforcing fine grained concrete: An experimental study of flexural bearing capacity. *Journal of Science and Technology of Composites*, 6(2), pp.310-318 [In Persian].
[10.22068/jstc.2018.85673.1441](https://doi.org/10.22068/jstc.2018.85673.1441)
16. Hajforoush, M., Kheyroddin, A. and Rezaifar, O., 2020. The effect of magnetic field on bond strength between reinforcing steel bar and steel fiber reinforced concrete by means of pull-out test. *Concrete Research*, 13(4), pp.5-16 [In Persian].
<https://doi.org/10.22124/jcr.2020.17734.1448>
17. Wang, Y., Li, Z., Zhang, C., Wang, X., Li, J., Liang, Y. and Chu, S., 2021. Bond behavior of BFRP bars with basalt-fiber reinforced cement-based composite materials. *Structural Concrete*, 22(1), pp.154-167.
<https://doi.org/10.1002/suco.201900548>
18. Lin, A. and Ostertag, C. P., 2021. Interaction between high performance fiber reinforced cement-based composites and steel reinforcement. *Engineering Structures*, 247, pp.113-123.
<https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2021.113173>
19. Zhou, Z. and Qiao, P., 2018. Bond behavior of epoxy-coated rebar in ultra-high performance concrete. *Construction and Building Materials*, 182, pp.406-417.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.06.113>
20. Khaksefidi, S., Ghalehnovi, M. and de Brito, J., 2021. Bond behaviour of high-strength steel rebars in normal (NSC) and ultra-high performance concrete (UHPC). *Journal of Building Engineering*, 33, pp.34-57.
<https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2020.101592>
21. Chao, S.-H., Naaman, A. E. and Parra-Montesinos, G. J., 2006. Bond behavior of strand embedded in fiber reinforced cementitious composites. *Strain*, 50(2), pp.56-71.
<https://doi.org/10.1111/j.1475-1305.2008.00562.x>
22. RILEM-CEB-FIP-RC6, 1983. Recommendation RC 6: Bond test for reinforcement steel. 2. Pull-out test. Georgi Publishing Company, Paris, France.
23. Carvalho, E. P., Ferreira, E. G., Cunha, J. C. d., Rodrigues, C. S. and Maia, N. S., 2017. Experimental investigation of steel-concrete bond for thin reinforcing bars. *Latin American Journal of Solids and Structures*, 14(11), pp.1932-1951.
<https://doi.org/10.1590/1679-78254116>