

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

رضا اکبری فر^۱، علیرضا مرتضایی^{۲*}، علی بابایی^۳

۱- دانشجوی دکتری سازه، گروه مهندسی عمران، واحد سمنان، دانشگاه آزاد اسلامی، سمنان، ایران

۲- استاد، گروه مهندسی عمران، واحد سمنان، دانشگاه آزاد اسلامی، سمنان، ایران

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

پست الکترونیکی نویسندگان:

۱- r.akbarifar@gmail.com

۲- al.mortezaei@iau.ac.ir

۳- ali.babaei967@gmail.com

چکیده:

در این تحقیق، رفتار پیوستگی طناب‌های بافته‌شده از پلی اتیلن ترفتالات (PET) بازیافتی به‌عنوان جایگزینی برای میلگرد فولادی در کامپوزیت‌های الیافی (FRCC) مورد بررسی قرار گرفته است. برای این منظور، بر روی نمونه‌های آزمایشگاهی FRCC با درصدهای مختلف الیاف فولادی تست‌های بیرون کشیدگی مطابق با استاندارد RILEM RC6 بر روی میلگرد فولادی و طناب PET با قطر یکسان انجام شد. نتایج نشان داد نیروی بیرون کشیدگی برای میلگرد حدود ۳۰ کیلونیوتن و برای PET حدود ۷.۶ کیلونیوتن است که بیانگر کاهش ۷۵ درصدی مقاومت چسبندگی PET است. با این حال، میزان جابه‌جایی متناظر با حداکثر بار در PET حدود ۲۳.۵ میلی‌متر و در میلگرد فولادی ۰.۶ میلی‌متر بود که نشان‌دهنده ۴۰ برابر افزایش شکل‌پذیری PET در مقایسه با میلگرد است. در تمامی نمونه‌ها، PET دچار گسیختگی شده و از بتن خارج نشد، در حالی که میلگردها با لغزش از بتن جدا شدند. این نتایج نشان داد که با وجود مقاومت کمتر طناب PET در برابر کشش، رفتار پیوستگی آن به‌ویژه در نواحی با نیاز به شکل‌پذیری بالا، می‌تواند در طراحی‌های خاص مورد استفاده قرار گیرد.

واژگان کلیدی:

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

* علیرضا مرتضایی، استاد، گروه مهندسی عمران، واحد سمنان، دانشگاه آزاد اسلامی، سمنان، ایران
ایمیل: al.mortezaei@iau.ac.ir (نویسنده مسئول مقاله)

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

Reza Akbarifar¹, Alireza Mortezaei², Ali Babaei³

1- Ph.D Candidate, Department of Civil Engineering, Semnan branch, Islamic Azad University, Semnan, Iran.

2- Professor, Department of Civil Engineering, Semnan branch, Islamic Azad University, Semnan, Iran.

3- Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Semnan branch, Islamic Azad University, Semnan, Iran.

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.

Keywords:

Recycled PET rope; Fiber-reinforced cementitious composites (FRCC); Pull-out test; Bond behavior; Steel fiber; Ductility; Sustainable reinforcement

۱- مقدمه و تاریخچه تحقیقات

امروزه با توسعه روزافزون علم و تکنولوژی، نیاز به سازه‌هایی با عملکرد بهتر و مقاومت بالاتر در برابر بارهای مختلف، به‌ویژه در شرایط بارگذاری شدید؛ مانند زلزله یا بارهای دینامیکی، استفاده از مواد کامپوزیتی پیشرفته در صنعت ساخت‌وساز به‌عنوان یک راهکار مؤثر مورد توجه قرار گرفته است. در این میان، استفاده از کامپوزیت‌های سیمانی مسلح شده با الیاف (FRCC) به دلیل بهبود رفتار مکانیکی، افزایش شکل‌پذیری و کنترل ترک‌خوردگی، جایگاه ویژه‌ای یافته‌اند. [۲ و ۱]

یکی از چالش‌های مهم در این زمینه، بررسی پیوستگی بین مصالح تقویت‌کننده و ماتریس سیمانی است که نقش تعیین‌کننده‌ای در عملکرد کلی سازه دارد. [۳] در این راستا، استفاده از طناب‌های پلیمری بازیافتی مانند پلی‌اتیلن ترفتالات (PET) به‌عنوان جایگزینی برای میلگردهای فولادی سنتی، به دلیل مزایایی همچون وزن کم، مقاومت در برابر خوردگی و قابلیت بازیافت، مورد بررسی قرار گرفته است. با این حال، شناخت دقیق رفتار بیرون کشیدگی و مکانیزم‌های گسیختگی این طناب‌ها در ماتریس‌های سیمانی همچنان نیازمند تحقیقات بیشتری می‌باشد. [۵ و ۴]

کامپوزیت‌های پایه سیمانی در سال‌های اخیر مورد توجه گسترده‌ای قرار گرفته‌اند. داسیلوا و همکاران [۱] در سال ۲۰۲۵ در یک مرور جامع نشان دادند که افزودن الیاف به ماتریس سیمانی، علاوه بر بهبود خواص مکانیکی از قبیل مقاومت خمشی و کششی، باعث افزایش چقرمگی، کنترل ترک‌خوردگی و دوام طولانی‌مدت سازه می‌شود. [۶] طراحی بهینه ترکیب سیمان، مواد افزودنی معدنی (مثل خاکستر بادی یا میکروسیلیس) و نوع فیبر (فولادی، پلی‌پروپیلن، بازلت یا کربن) می‌تواند 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 تولید آن در طبیعت، سازگار بودن در بسیاری از شرایط اقلیمی و وزن نسبتاً پایین، باعث شده است تا این ماده به‌عنوان یکی از مصالح اصلی مورد استفاده در صنعت ساختمان باشد. [۸ و ۷]

تکنولوژی کامپوزیت‌های پایه سیمان، توسعه استفاده از انواع مختلف الیاف در آن است. [۹ و ۱۰] در این میان، پیوستگی^۲ FRCC و آرماتور، نقش کلیدی را در رفتار اعضا سازه‌ای در هنگام قرارگیری تحت اثر بارهای استاتیکی و دینامیکی ایفا می‌کند. از این رو باتوجه به کمبود اطلاعات در خصوص رفتار چسبندگی میلگردهای در تماس با بتن‌های الیافی بررسی این مورد از اهمیت زیادی برخوردار هست. استفاده از الیاف در کامپوزیت سیمانی، 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 زودهنگام و آسیب‌های پوسته‌پوسته شدن بتن را کاهش داده 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 دهند. در مطالعه تاکاساگو و همکاران در سال ۲۰۲۳ [۱۰] از میلگردهای بافته‌شده ی پلیمری (AFRP) در ماتریس FRCC تقویت‌شده با الیاف PVA استفاده شد تا رفتار پیوستگی و شکل‌پذیری کامپوزیت در زیر بارهای کششی-فشاری اندازه‌گیری شود. نتایج این تحقیق نشان داد که با افزایش درصد حجمی الیاف PVA، مقاومت پیوستگی بین میلگرد AFRP و بتن به طور قابل توجهی افزایش می‌یابد و الگوی ترک‌خوردگی نیز به ناحیه 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 [۱۳] در سال ۲۰۱۷ با ارائه یک روش بافت جدید برای میلگردهای کربنی، نشان دادند که افزایش درگیری مکانیکی سطح بافته تا بیش از ۴۰٪ مقاومت پیوستگی را ارتقا می‌دهد. این امر اهمیت طراحی سطح طناب‌های PET را برجسته می‌کند؛ به‌گونه‌ای که بهینه‌سازی الگوی بافت می‌تواند جلوی گسیختگی زودرس و کاهش مقاومت را بگیرد.

^۲ Fiber reinforced cement composite (FRCC)

در مطالعه ی اکبری فر و همکاران در سال ۲۰۲۴ [۱۴] با موضوع ارزیابی پارامترهای مؤثر بر رفتار پیوستگی بین میلگرد فولادی آجدار و کامپوزیت های سیمانی مسلح الیافی فولادی به روش تست بیرون کشیدگی و مدل سازی المان محدود نشان داده شد، افزودن الیاف فولادی رفتار پیوستگی میلگرد با کامپوزیت را بهبود بخشیده و مانع از گسیختگی ترد بتن می شود. هم چنین چقرمگی و ظرفیت جذب انرژی بتن با افزایش در صد الیاف فولادی تا دو درصد افزایش می یابد که در سازه های مقاوم در برابر زلزله بسیار حائز اهمیت است. نتایج به دست آمده از این پژوهش، تأثیرات قابل توجه الیاف فولادی، پارامترهای هندسی و نوع مواد بر رفتار چسبندگی و مقاومت پیوستگی را نشان می دهد.

تأثیرات استفاده از الیاف در تقویت بتن توسط کمانی و همکاران (۲۰۱۹)، [۱۵] نیز به صورت تجربی مطالعه شده است. نتایج نشان می دهد که آغشته سازی جزئی اپوکسی در کارایی منسوج تقویت کننده بتن مؤثر بوده و آغشته سازی منقطع با اپوکسی بهروری سازه را تا ۵۰٪ ارتقاء داده است.

حج فروش و همکارانش (۲۰۲۰)، [۱۶] با استفاده از آزمون بیرون کشیدن میلگرد از داخل نمونه استولنه ای بتن حاوی ۱/۵ درصد حجمی الیاف فولادی، مقاومت پیوستگی بین میلگرد و بتن را در نمونه های بتنی که مدت ۲ دقیقه در معرض مستقیم میدان مغناطیسی قرار گرفتند، را مطالعه کردند. نتایج این مطالعه نشان داد که شکست ناشی از تست بیرون کشیدگی برای همه نمونه ها رخ داده است. علاوه بر این، مقاومت پیوستگی نمونه های مربوط به مربوط به میلگردهای شماره ۱۴ و ۲۰ به ترتیب حدود ۸۳ و ۵۱ درصد افزایش یافته است. در این مطالعه بیان شد اعمال میدان مغناطیسی بر بتن تازه باعث افزایش مقاومت فشاری آن بیش از ۲۱ درصد شده و مقاومت کششی و خمشی نمونه های بتنی به ترتیب تا ۹ و ۱۳ درصد افزایش یافته است که این امر به دلیل بهبود تراکم بتن و کاهش منافذ است.

وانگ و همکاران در سال ۲۰۲۱ [۱۷] رفتار بیرون کشیدگی میله های BFRP از کامپوزیت پایه سیمانی تقویت شده با الیاف بازالت را به صورت تجربی بررسی کردند. نتایج مطالعه آن ها نشان می دهد که قطر میله نسبت به میزان الیاف، تأثیر بسیار کمی بر مقاومت چسبندگی و لغزش میانگین دارد.

لین و آسترگ (۲۰۲۱)، [۱۸] اندرکنش بین میلگردهای فولادی و کامپوزیت پایه سیمانی را مطالعه کردند. در مطالعه آن ها الیاف هیبریدی متشکل از الیاف فولادی و PVA با طول ها و قطرهای مختلف است. نتایج مطالعه آن ها نشان می دهد که بسته به میزان الیاف، انواع مختلف شکست شامل شکست لغزشی و رشد ترک در نمونه ها ایجاد می شود. ژائو و گیائو (۲۰۱۸)، [۱۹] رفتار چسبندگی میلگرد پوشش داده شده با اپوکسی و بتن توانمند الیافی را بررسی کردند و مدل تحلیلی را به منظور تخمین منحنی های نیرو - جابه جایی ارائه کردند. رفتار چسبندگی بین میلگرد با بتن معمولی و بتن فوق توانمند الیافی توسط خاک سفید و همکاران (۲۰۲۱)، [۲۰] مورد مطالعه قرار گرفته است. آن ها با استفاده از تست بیرون کشیدگی، منحنی های نیرو - جابه جایی را برای نمونه های مختلف استخراج کرده و به مطالعه تأثیر پارامترهای مختلف بر روی نیروی بیرون کشیدگی پرداختند.

در تحقیقات احمد و علی (۲۰۲۵)، [۲] رفتار بیرون کشیدگی و برشی میلگردهای پلاستیکی بازیافتی (HDPE) در بتن را برای ساخت مسکن بدون ملات با پیکربندی های مختلف قطر، محل قرارگیری، مخلوط بتن و نوع میلگرد بررسی کردند. نتایج نشان داد که میلگردهای آجدار عملکرد بهتری نسبت به میلگردهای بازیافتی در بیرون کشیدگی دارند. در این مطالعه اشاره شده است که رفتار کرنشی بلندمدت میلگرد پلاستیکی بازیافتی باید در آینده برای پیامدهای واقعی در ساخت و ساز در نظر گرفته شود.

هم چنین، اورهاگه و همکاران (۲۰۲۴)، [۳] رفتار پیوستگی الیاف کربن بازیافتی در بتن فوق توانمند را مطالعه کردند و نشان دادند که الیاف پیرولیز شده تا ۱۵۰-۲۵۰ درصد مقاومت برشی ظاهری بالاتری نسبت به الیاف بکر دارند که اهمیت فرایند بازیافت در بهبود پیوستگی را برجسته می کند.

در مطالعه دیگری، لی بای و همکاران (۲۰۲۴)، [۵] عملکرد برشی تیرهای RC بدون خاموت تقویت شده با PET FRP را در دو حالت کاملاً پیچ و U شکل بررسی کردند و نشان دادند که استفاده از روش تمام پیچیده می تواند ظرفیت برشی و تغییر شکل را به ترتیب تا ۱۲۳٪ و ۴۲.۵٪ افزایش دهد.

علاوه بر این، جی زنگ و همکاران (۲۰۲۵)، [۶] رفتار پیوستگی میلگردهای ترموپلاستیک GFRP با بتن را با استفاده از تکنیک

نوآورانه سطحی بررسی کردند و نشان دادند که این روش مقاومت پیوستگی را تا بیش از ۷۶٪ مگاپاسکال در طول پیوند سه برابر قطر افزایش می‌دهد. است هم چنین درمان سطحی می‌تواند مقاومت پیوستگی را بیش از ۶۷٪ مگاپاسکال افزایش دهد. در این مطالعه اشاره شد میله‌های GFRP ترموپلاستیک مزایای متمایزی ارائه می‌دهند که مهمترین آنها قابلیت بازیافت و توانایی تغییر شکل آنها تحت گرما و نیروهای خارجی می‌باشد.

پیوستگی میان مصالح تقویتی و ماتریس سیمانی، یکی از عوامل کلیدی در تعیین عملکرد نهایی سازه‌های بتن مسلح است. درحالی‌که رفتار بیرون کشیدگی میلگردهای فولادی در بتن به طور گسترده مورد مطالعه قرار گرفته، درباره طناب‌های PET، به‌ویژه در ساختارهای FRCC، دانش محدودی وجود دارد. تفاوت در خواص مکانیکی این دو ماده، از جمله انعطاف‌پذیری بالا، تنش تسلیم پایین و عدم داشتن آج مکانیکی در طناب PET، سبب می‌شود تا مکانیزم‌های انتقال تنش، مودهای شکست و رفتار پیوستگی آنها با بتن تفاوت اساسی با میلگردهای فولادی داشته باشد. از سوی دیگر، تاکنون کمتر پژوهشی به مقایسه مستقیم عملکرد چسبندگی و مقاومت بیرون کشیدگی طناب PET و میلگرد فولادی در بستر کامپوزیت‌های سیمانی مسلح الیافی پرداخته است. به همین دلیل، بررسی دقیق رفتار بیرون کشیدگی طناب PET و تحلیل نتایج حاصل از آزمایش‌های تجربی می‌تواند به درک بهتر ویژگی‌های این مصالح نوین کمک کرده و زمینه‌ساز کاربرد گسترده‌تر آن در پروژه‌های عمرانی گردد.

این تحقیق در پاسخ به این خلأ علمی، به بررسی آزمایشگاهی و مقایسه‌ای رفتار بیرون کشیدگی طناب PET و میلگرد فولادی در بتن FRCC پرداخته و اثر الیاف فولادی بر رفتار چسبندگی آنها را نیز مورد مطالعه قرار داده است. براین اساس، در این تحقیق برای اولین بار، طناب PET به‌عنوان جایگزینی برای میلگرد فولادی در بتن FRCC مورد بررسی قرار گرفته است. طناب PET به دلیل ویژگی‌های خاصی چون انعطاف‌پذیری بالا و مقاومت کششی مناسب، در مقایسه با میلگرد فولادی رفتار متفاوتی در چسبندگی با بتن نشان داده است.

۲- تست های تجربی

۲-۱ مشخصات مصالح، طرح اختلاط و مواد مورد استفاده

در این بخش، نحوه ساخت FRCC و هم چنین مشخصات مواد مورد استفاده بیان می‌شود. طرح اختلاط کامپوزیت پایه سیمانی توسعه داده شده در مطالعه چاوو و همکاران (۲۰۰۶)، [۲۱] جهت بررسی رفتار بیرون کشیدگی میلگرد مورد استفاده قرار گرفته است. جهت اختلاط از سیمان پرتلند نوع III با مساحت سطح مخصوص ۳۴۱۳ سانتی‌متر مربع بر گرم استفاده شده‌است. هم چنین از خاکستر بادی کلاس F با چگالی ۲۲۹۰ کیلوگرم بر متر مکعب و اندازه ذرات متوسط ۱۰ میکرومتر، میکروسیلیس با اندازه متوسط ذرات ۰/۵ میکرومتر با چگالی ۲۶۳۰ کیلوگرم بر متر مکعب، ماسه سیلیسی با دانه بندی قطر ۰/۲ تا ۰/۶ میلیمتر، فوق‌روان‌کننده Structuro355 بر پایه پلی‌کربوکسیلات، آب و الیاف فولادی تشکیل شده است.

نسبت‌های وزنی اجزای تشکیل‌دهنده طرح اختلاط نسبت به سیمان به ترتیب شامل ۰/۲ برای خاکستر بادی، ۱/۰۰ برای ماسه سیلیسی، ۰/۰۷ برای میکروسیلیس، ۰/۰۴ برای فوق‌روان‌کننده و ۰/۲۶ برای آب بوده است. خاکستر بادی کلاس F از منابع خارجی وارد شده و در تحقیقات آزمایشگاهی مورد استفاده قرار گرفته است، هرچند دسترسی محدود آن ممکن است جنبه‌های عملی را تحت تأثیر قرار دهد، اما جایگزین‌هایی مانند پوزولان محلی می‌تولند 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^۳ در آب حل شده و سپس به مخلوط اضافه گردید و در سرعت ۱۳۰ دور بر دقیقه و به مدت ۱۰ دقیقه اختلاط داده شد. نهایتاً، الیاف فولادی اضافه شده و در ۱۲۰ دور بر دقیقه به مدت ۴ دقیقه مخلوط شد. 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 به دست آمده است.

^۳ superplasticizer

تحت بارهای مختلف، تغییر شکل بیشتری را بدون شکست تجربه کنند. طناب PET مورد استفاده در این مطالعه دارای قطر ۱۴ میلی‌متر، مقاومت کششی حدود ۴۵۰ مگاپاسکال، مدول الاستیسیته ۳ گیگاپاسکال، چگالی ۱۳۸۰ کیلوگرم بر مترمکعب و کشیدگی شکست ۳۰ درصد است، [۴] در شکل (۲) نمونه‌ای از طناب بافته شده از پلی‌اتیلن ترفتالات نشان داده شده است. در شکل (۲) نمونه‌ای از طناب بافته شده از پلی‌اتیلن ترفتالات نشان داده شده است.



شکل ۲: نمونه‌ای از طناب بافته شده از پلی‌اتیلن ترفتالات

۲-۳ مشخصات نمونه‌ها، آماده‌سازی نمونه‌ها و نام‌گذاری

در این تحقیق برای دسترسی به خصوصیات استحکام میان فازی بین میلگرد و ماتریس سیمانی، آزمایش بیرون کشیدگی مرکزی ترتیب داده شد. تست بیرون کشیدگی شامل خارج کردن میلگرد از داخل بتن می‌باشد. نیروی بیرون کشیدگی از یک طرف و جابه‌جایی نیز از انتهای دیگر میلگرد اندازه‌گیری می‌شود. نمونه‌ها شامل مکعب‌های ۱۵۰×۱۵۰ میلی‌متر با طناب یا میلگرد جای‌گذاری شدن در مرکز هستند. آماده‌سازی شامل اختلاط مواد، ریختن کامپوزیت سیمانی الیافی در قالب، ویریه برای تراکم و عمل‌آوری ۲۸ روزه در شرایط استاندارد (دما ۲۰ درجه سانتی‌گراد، رطوبت ۹۵ درصد) است. نام‌گذاری نمونه‌ها بر اساس درصد الیاف ۰ تا ۲ درصد به صورت زیر انجام شد.

FRCC-Pullout-0.0
FRCC-Pullout-0.5
FRCC-Pullout-1.0
FRCC-Pullout-1.5
FRCC-Pullout-2.0

الیاف فولادی دارای قطر ۰.۶ میلی‌متر و طول ۱۴ میلی‌متر بوده که در شکل (۱) نشان داده شده است. الیاف دارای مقاومت کششی ۲۴۰۰ مگاپاسکال و تنش تسلیم ۴۳۰ مگاپاسکال می‌باشند. مدول یانگ و نسبت پواسون الیاف به ترتیب برابر ۲۰۸ گیگاپاسکال و ۰.۲۸ می‌باشد.

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



شکل ۱: میکرو الیاف فولادی مورد استفاده

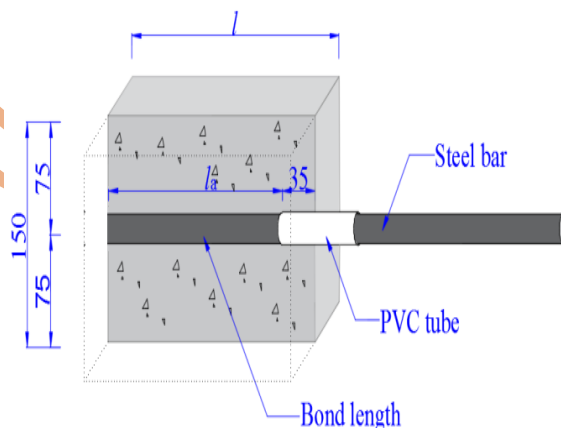
۲-۲ طناب‌های پلی‌اتیلن ترفتالات (PET)

مدیریت زباله به‌ویژه زباله‌های پلاستیکی، یکی از چالش‌های بزرگ زیست‌محیطی در دنیای امروز است. مصرف گسترده محصولات پلاستیکی، از جمله بطری‌های نوشیدنی ساخته شده از پلی‌اتیلن ترفتالات (PET)، سهم قابل توجهی در انباشت زباله‌های پلاستیکی دارد. تجزیه طولانی مدت این مواد در طبیعت، پژوهشگران را به جستجوی راهکارهای نوین برای بازسازی و استفاده مجدد از آن‌ها ترغیب کرده است. یکی از این راهکارها، بازیافت و به‌کارگیری مجدد این مواد 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 محققین را جلب کرده است. مهم‌ترین مزیت این طناب‌ها، افزایش شکل‌پذیری سازه است که به سازه‌ها اجازه می‌دهد

۴-۲ روش آزمایش بیرون کشیدگی میلگرد و طناب پلیمری

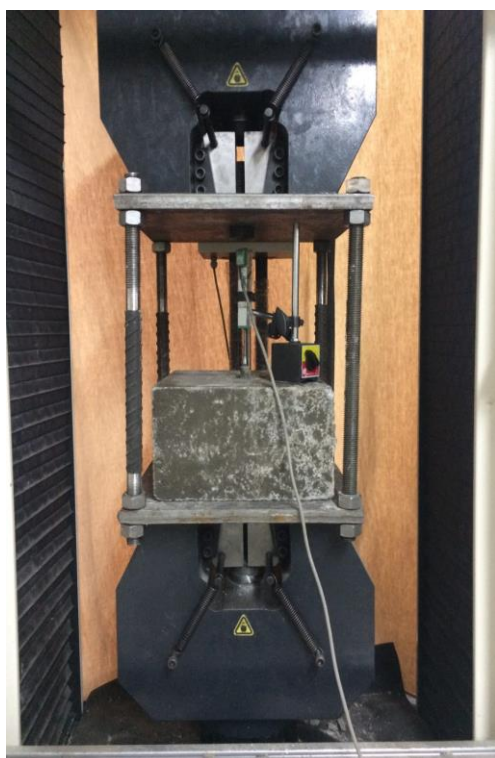
در تحقیق حاضر ساخت نمونه‌های لازم جهت آزمایش بیرون کشیدگی میلگرد از بتن بر اساس استاندارد RILEM-RC6 انجام پذیرفته است (۱۹۸۳)، [۲۲] به جهت امکان مقایسه و تطبیق داده‌ها برای کشش مستقیم نمونه‌های طناب پت نیز از همین روش آزمایش استفاده شده است و بخش مدفون طناب پلیمری در ناحیه میانی نمونه بتنی قرار گرفته است. بر اساس مطالعات کاروالهو برای جلوگیری از گسیختگی زودرس و شبیه‌سازی شرایط واقعی حضور میلگرد در بتن و حذف کردن اثرات فشار موضعی سطح بارگذاری شده از دو غلاف پی‌وی‌سی در بالا و پایین نمونه‌ها مطابق شکل (۳) استفاده شده است. [۲۳] طول ناحیه چسبنده $l_a = 5d$ ، ابعاد نمونه بتنی برابر $150 \text{ mm} \times 150 \text{ mm}$ و طول $l_a + 35$ انتخاب شده که طول لوله PVC برابر ۳۵ میلیمتر می‌باشد.



شکل ۳: مشخصات هندسی نمونه بیرون کشیدگی و نمونه ساخته شده

به منظور انجام تست‌های تجربی، از دستگاه کشش یونیورسال با ظرفیت حداکثر نیروی ۲۰ کیلو نیوتن و نرخ جابه‌جایی ۰.۲ میلی‌متر بر دقیقه استفاده شده است. این نرخ جابه‌جایی بر اساس استاندارد RILEM برای مواد حساس به نرخ بارگذاری مانند طناب PET و FRCC انتخاب شده است. برای اندازه‌گیری جابه‌جایی نسبی (slip) در آزمایش بیرون کشیدگی، از سنسور LVDT با دقت ۰.۰۱ میلی‌متر بهره گرفته شده است. در این چیدمان، LVDT به انتهای آزاد میلگرد یا طناب متصل است و با استفاده از یک گیره قابل تنظیم به فریم مستقل پیچ شده به بلوک بتنی فیکس شده است. اختلاف جابه‌جایی‌های نسبی ثبت شده توسط LVDT، نشان‌دهنده لغزش بین میلگرد یا طناب و بتن است.

چیدمان کامل آزمایش در شکل (۴) ارائه شده است. در نهایت، تست‌های تجربی بر روی ۱۵ نمونه ساخته شده انجام شد که شامل ۳ تکرار برای هر سطح درصد الیاف (۰، ۰.۵، ۱، ۱.۵، و ۲ درصد) بود. از این داده‌ها، منحنی‌های نیرو - لغزش برای نمونه‌های FRCC با درصدهای مختلف الیاف به دست آمد.



شکل ۴: آزمایش بیرون کشیدگی میلگرد و نحوه قرارگیری سنسور جابه‌جایی سنج

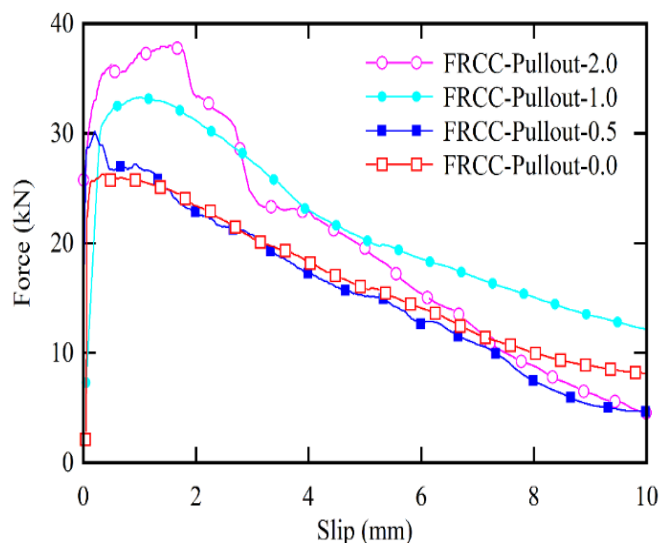
۳- نتایج

آزمون بیرون کشیدگی طناب بافته شده از پلی اتیلن ترفتالات و هم چنین میلگرد فولادی بر روی ۱۵ نمونه آزمایشی حاوی طناب پت به قطر ۱۴ و ۱۵ حالت برای میلگرد با قطر ۱۴ ساخته شده در سن ۲۸ روزه انجام پذیرفت. (با ۳ تکرار برای هر حالت برای اطمینان از تکرارپذیری؛ ضریب تغییرات کمتر از ۱۰ درصد).

نتایج آزمایش، توسط رایانه متصل به دستگاه، به صورت منحنی نیرو - لغزش ترسیم گردید و اطلاعاتی از قبیل نیروی حداکثر، جابه جایی متناظر با نیروی حداکثر، جابه جایی نهایی میلگرد و نیروی متناظر با آنکه در اینجا نیروی باقیمانده نامیده می شود و سایر اطلاعات مربوط به آزمایش برای هر نمونه توسط دستگاه تست کشش ارائه گردید.

نمودارهای بار - تغییر مکان به دست آمده از آزمایش بیرون کشیدگی میلگرد فولادی آجدار برای نمونه های بتن FRCC بدون الیاف و بتن FRCC دارای میکرو الیاف فولادی در شکل (۵) برای میلگردهای با قطر ۱۴ میلی متر و مقادیر مختلف درصد الیاف (۰، ۰.۵، ۱، ۱.۵، ۲٪) ارائه شده است. این نمودارها تأثیر استفاده از میکرو الیاف فولادی بر رفتار چسبندگی میلگرد با بتن را نشان می دهند. با استفاده از این نمودارها می توان اطلاعات مفیدی در مورد تأثیر پارامترهای مختلف، از جمله حداکثر نیروی پیوستگی، لغزش متناظر با حداکثر 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 می شود، زیرا الیاف با تقویت شبکه بتن و توزیع یکنواخت تر تنش ها، مقاومت کششی و برشی بتن را افزایش می دهند. در میلگردهای فولادی آجدار، علاوه بر چسبندگی شیمیایی و پایداری اصطکاکی، چفت و بست مکانیکی بین بتن و آج ها نقش مهمی در بالابردن مقاومت پیوستگی ایفا می کند. مکانیزم چسبندگی برشی که از طریق درگیری آج ها و کلیدهای بتنی بین آن ها نیرو را منتقل می کند، بیشترین تنش پیوستگی را ایجاد می نماید.



شکل ۵: تأثیر کسر حجمی الیاف فولادی بر منحنی نیرو-لغزش به دست آمده از آزمون کشیدگی بر روی میلگرد فولادی آجدار با قطر ۱۴ میلی متر

در شکل (۶) دو نوع شکست متفاوت نشان داده شده است:

- شکل (a) - نمونه های بدون الیاف با ترک طولی و شکافتگی بتن،
شکل (b) - نمونه های دارای ۱ درصد وزنی الیاف با بیرون کشیدگی بدون شکافت عمده که نشان دهنده کنترل ترک توسط الیاف است.



(a)

بتن خارج نشده و همه موارد طناب دچار گسیختگی شده است. در هر چهار نمونه موجود با افزایش بارگذاری جابه‌جایی نیز افزایش یافته است؛ ولی این نیرو نتوانسته است باعث استهلاک پیوستگی بتن و طناب بافته شده از پلی‌اتیلن ترفتالات شود و در نتیجه به جای لغزش و خروج طناب از داخل نمونه مکعبی، افزایش نیرو باعث گسیختگی طناب بافته شده از پلی‌اتیلن ترفتالات شده است.

طناب PET به عنوان یک جایگزین برای میلگرد فولادی، رفتار متفاوتی در چسبندگی و مقاومت کششی نشان داد. طناب PET به دلیل انعطاف‌پذیری بیشتر و مقاومت کششی پایین‌تر نسبت به میلگرد فولادی، در مراحل اولیه بارگذاری چسبندگی خوبی به ماتریس بتن ایجاد کرد، اما در مراحل بارگذاری بالاتر دچار گسیختگی سریع‌تر شد. این مشاهدات به دلیل مقاومت کمتر طناب PET در برابر کشیدگی‌های زیاد و عدم توانایی در تحمل بارهای بالاتر در مقایسه با میلگرد فولادی است.

نمودار بار - تغییر مکان آزمایش بیرون‌کشیدگی طناب پلاستیکی از بتن بدون الیاف شکل (۷) نشان می‌دهد که حداکثر بار تحمل‌شده برابر با $6/7$ کیلونیوتن در تغییر مکان حدود $23/5$ میلی‌متر است. پس از رسیدن به این نقطه اوج، بار به سرعت کاهش یافته و در حدود 30 میلی‌متر تغییر مکان به مقدار 1 کیلونیوتن می‌رسد که نشان‌دهنده شکست چسبندگی و اتمام پارگی طناب در بتن است.

در ادامه، نمودار نوسانات کوچکی دارد که ناشی از گسیختگی تدریجی رشته‌های باقیمانده طناب است و در نهایت در تغییر مکان حدود 50 میلی‌متر بار به صفر کاهش می‌یابد که نشان‌دهنده شکست کامل و پارگی طناب است.

این نتایج حاکی از مقاومت چسبندگی مطلوب اولیه طناب به بتن است، اما کاهش سریع بار پس از اوج نشان‌دهنده گسیختگی سریع پس از لغزش اولیه می‌باشد.



(b)

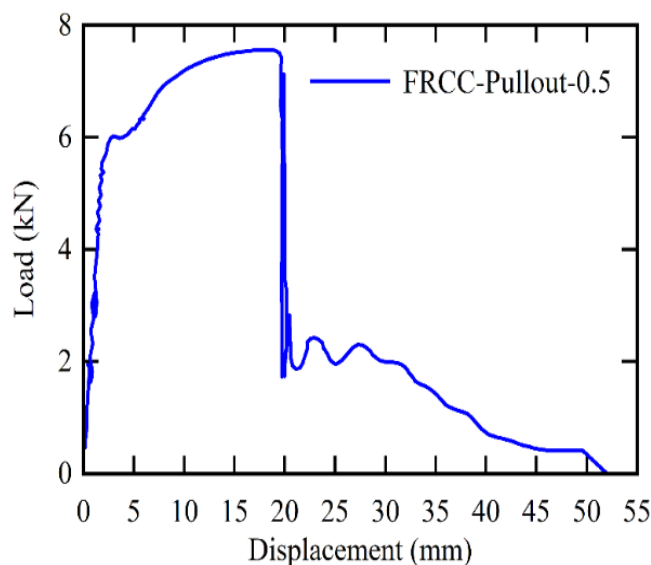
شکل ۶: (a) مسیر ترک و شکافته شدن بتن برای نمونه کامپوزیت سیمانی بدون الیاف (b) خرابی از نوع بیرون‌کشیدگی برای نمونه کامپوزیت سیمانی دارای ۱ درصد وزنی الیاف

در ادامه رفتار بیرون‌کشیدگی طناب PET بررسی می‌شود. شکل‌های ۷ تا ۱۰ منحنی‌های نیرو-تغییر مکان و هم چنین مود خرابی را به ترتیب برای بتن معمولی و بتن تقویت شده با 0.5% و 1% و ۲ درصد الیاف فولادی نشان می‌دهد. تست بیرون‌کشیدگی تا جابه‌جایی حدود 55 میلی‌متر میلگرد ادامه یافته است. با توجه به شکل عمومی منحنی، منحنی نیرو-جابه‌جایی را می‌توان به سه ناحیه متمایز تقسیم‌بندی نمود.

ناحیه اول به صورت خطی و با سختی نسبتاً بالا می‌باشد که نشان می‌دهد جابه‌جایی اولیه مستلزم اعمال تغییرات نیروی بیشتری می‌باشد. ناحیه دوم، محدوده قبل از رسیدن به نیروی اوج می‌باشد که پس از مرحله اول و به صورت تغییرات غیرخطی تا رسیدن به نیروی اوج ادامه دارد. ناحیه سوم مربوط به بعد از نیروی پیک می‌باشد که در آن با افزایش جابه‌جایی، مقدار نیرو کاهش می‌یابد.

در بررسی رفتار پیوستگی بین بتن FRCC و طناب بافته شده از پلی‌اتیلن ترفتالات به قطر 14 میلیمتر مشاهده شده است که طناب بافته شده از پلی‌اتیلن ترفتالات با طول درگیری 8 سانتی‌متر با بتن FRCC، در هیچ‌یک از نمونه‌های بیرون‌کشیدگی از داخل

ریز تارها در یکدیگر و درهم تنیدگی الیاف و سفت شدن طناب می‌باشد. بازبینی طناب پت پس از انجام آزمایش این نمونه نشانه دهنده این است که از لبه بیرونی نمونه دچار پارگی شده که نشان دهنده تشکیل یک پیوستگی مناسب بین طناب با بتن و هم چنین چسبندگی مناسب الیاف نیز می‌باشد. بدیهی است با افزایش طول جای گذاری، میزان چسبندگی نمونه به بتن افزایش می‌یابد.

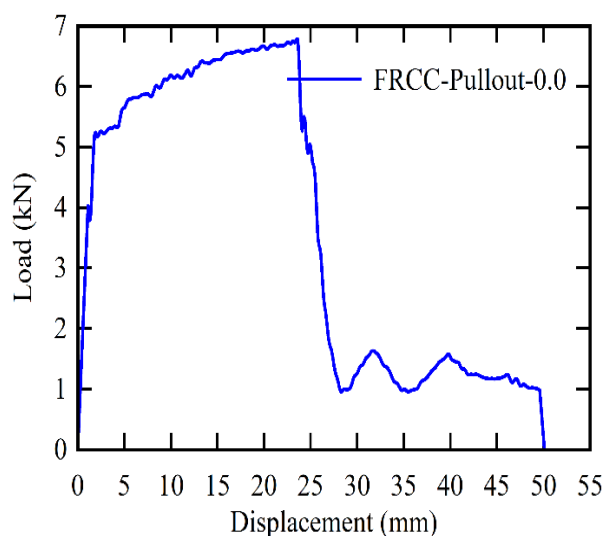


(a)



(b)

شکل ۸: (a) منحنی نیرو - جابه‌جایی و (b) مکانیزم خرابی برای بیرون کشیدگی طناب بافته شده از پلی اتیلن ترفتالات از بتن نمونه FRCC-Pullout-0.5



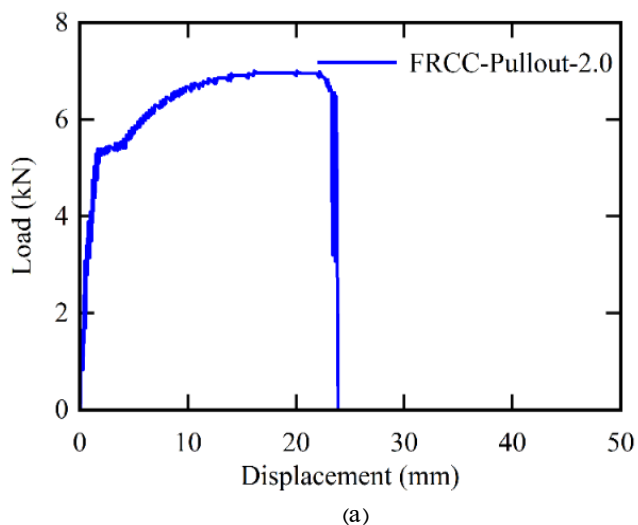
(a)



(b)

شکل ۷: (a) منحنی نیرو - جابه‌جایی و (b) مکانیزم خرابی برای بیرون کشیدگی طناب بافته شده از پلی اتیلن ترفتالات از بتن نمونه FRCC-Pullout-0.0

باتوجه به اینکه طناب در نمونه شاهد دچار پارگی شده است، بنابراین در نمونه‌های دیگر نیز به طور حتم مود خرابی به صورت گسیختگی طناب خواهد بود که نتایج تجربی نیز این نتیجه را تأیید می‌کنند. باتوجه به شکل (۸) مشاهده می‌شود که در نمونه دارای ۰/۵ درصد الیاف فولادی نیرو تا مقدار ۶/۱ کیلونیوتن در جابه‌جایی ۲۰۴۰ میلی‌متر افزایش و سپس تا حدودی ثابت می‌ماند و مجدداً افزایش می‌یابد. کاهش اولیه مربوط به کشیده شدن بافت طناب و کوچک شدن سطح مقطع بوده و افزایش بعد آن به دلیل سفت شدن



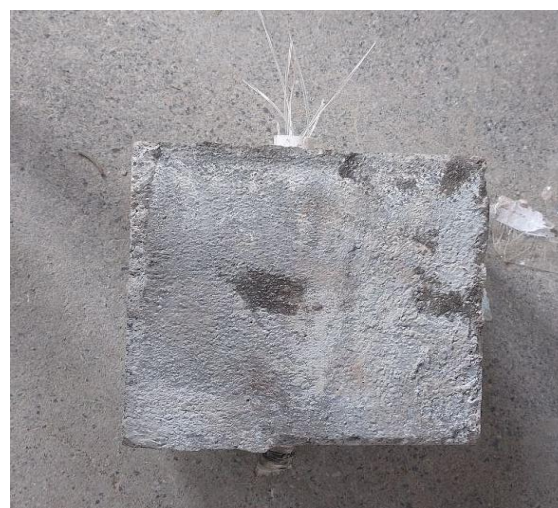
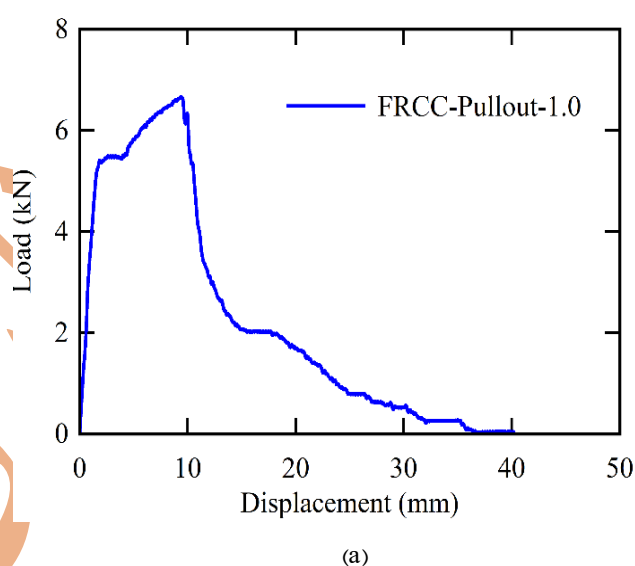
(b)

شکل ۱۰: (a) منحنی نیرو - جابه‌جایی و (b) مکانیزم خرابی برای بیرون کشیدگی طناب بافته شده pet از بتن نمونه FRCC-Pullout-2.0

با مقایسه رفتار بیرون کشیدگی طناب بافته شده از پلی اتیلن ترفتالات با میلگرد فولادی نشان می‌دهد که الیاف پت انعطاف‌پذیری بیشتر و تنش تسلیم کمتری نسبت به میلگردهای فولادی دارند. هم‌چنین با مقایسه تنش چسبندگی به دست آمده با نتایج حاصل از طرح‌های ساخته شده با میلگرد فولادی و طناب پت، این نتیجه حاصل می‌شود که تنش‌ها در نمونه پت کاهش یافتند که به دلیل نیروی کمتر طناب پت نسبت به میلگرد فولادی نیز می‌باشد.

نتایج بیرون کشیدگی طناب بافته شده از پلی اتیلن ترفتالات از بتن نمونه FRCC-Pullout-1.0 که در شکل (۹) ارائه شده، نشان می‌دهد که در این حالت حداکثر نیرو برابر ۶/۷ کیلو نیوتن در جابه‌جایی ۹/۳ میلی‌متر می‌باشد. پس از نیرو، کاهش تدریجی در نیروی تحمل شده توسط طناب مشاهده می‌شود که نشان از پاره شدن تدریجی رشته‌های طناب می‌باشد.

همان‌طور که مد خرابی بیرون کشیدگی این نمونه که در شکل (۹-ب) آمده است نشان می‌دهد که پارگی طناب به صورت تدریجی و رشته‌به‌رشته است.



(b)

شکل ۹: (a) منحنی نیرو - جابه‌جایی و (b) مکانیزم خرابی برای بیرون کشیدگی طناب بافته شده از پلی اتیلن ترفتالات از بتن نمونه FRCC-Pullout-1.0

نتایج به دست آمده نشان داد میزان نیروی ماکزیمم در طناب پت حدود ۴ برابر کمتر از میلگرد فولادی می باشد، اما مقدار جابه جایی در نمونه پت بیش از ۴۰ برابر بیشتر از نمونه فولادی است. هم چنین الیاف پت 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 پت، این نتیجه حاصل می شود که تنش ها در نمونه پت کاهش یافتند.

۴- نتیجه گیری

۱- حداکثر 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 بود که بیانگر کاهش قابل ملاحظه ای (حدود ۷۵٪) در مقاومت چسبندگی طناب PET نسبت به میلگرد فولادی می باشد.

۲- مقدار جابه جایی 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 شد که نمایانگر افزایش قابل توجه در شکل پذیری طناب PET است.

۳- بررسی نمودارهای نیرو-جابه جایی نشان داد که رفتار چسبندگی طناب PET متشکل از سه ناحیه مشخص (سختی اولیه خطی، افزایش غیرخطی تا پیک، و افت نیرو پس از گسیختگی) است. برخلاف میلگردهای فولادی که عمدتاً با لغزش و افت پیوستگی از ماتریس جدا شدند، طناب های PET در هیچ یک از نمونه ها از بستر سیمانی خارج نشدند و شکست همگی به صورت گسیختگی داخلی الیاف و بافت طناب رخ داد. این پدیده نشان دهنده یک پیوستگی مکانیکی و اصطکاکی مؤثر میان رشته های طناب و خمیر سیمان می باشد.

۴- از سوی دیگر، نقش الیاف فولادی در بهبود عملکرد نمونه ها به ویژه در حالت طناب PET، کاملاً مشهود بود. افزایش درصد الیاف فولادی موجب افزایش نیروی پیک و پایداری منحنی نیرو-جابه جایی در ناحیه پس از پیک شد. در نمونه دارای ۱ درصد وزنی الیاف، نیروی پیک طناب PET به مقدار ۷.۶ کیلونیوتن در جابجایی ۹.۳ میلیمتر رسید که نسبت به نمونه بدون الیاف، افزایش در مقاومت و پایداری شکست را نشان می دهد.

۵- تحلیل نهایی داده ها نشان داد که اگرچه مقاومت نهایی طناب PET کمتر از میلگرد فولادی است، اما قابلیت جذب انرژی بیشتر (چقرمگی)، شکل پذیری بالا، و رفتار تدریجی در شکست، می تواند آن را به گزینه ای مناسب برای سازه های تبدیل کند که در آن ها انعطاف پذیری و جذب انرژی اهمیت دارد، از جمله سازه های مقاوم در برابر زلزله یا نواحی غیرسازه ای با عملکرد شکل پذیر.

در مجموع، این پژوهش نشان داد که استفاده از طناب های بازیافتی در بتن FRCC، علاوه بر مزایای زیست محیطی، دارای پتانسیل مکانیکی قابل قبولی است و می تواند به عنوان یک گزینه مکمل یا جایگزین در طراحی های خاص مدنظر قرار گیرد. بررسی بیشتر در خصوص بهینه سازی سطح تماس، نحوه درهم تنیدگی، و هندسه سطحی طناب می تواند به افزایش عملکرد پیوستگی و کاربرد عملی این مصالح نوین منجر شود.

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*

15. Kamani, R., Kamali Dolatabadi, M., Asgharian 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].
<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>
- 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>