

ارزیابی رفتار ترک خوردگی و شکل پذیری تیر بتنی تقویت شده با میلگردهای GFRP دارای هسته فوم الاستومری براساس مطالعات آزمایشگاهی و مدلسازی عددی

محمدجواد کریملو*، محمدزمان کبیر، مجید عبدوس

دانشجوی دکتری سازه دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران

استاد دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران

استاد دانشکده مهندسی شیمی، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران

محمدجواد کریملو *karimlu.mj@aut.ac.ir

چکیده

این تحقیق با هدف ارزیابی شرایط توسعه ترک‌ها و بهبود شکل‌پذیری تیرهای بتنی از طریق طراحی میلگردهای هیبریدی GFRP با هسته فوم پلی‌یورتان انجام گردید. چهار نمونه تیر بتنی (تیر با آرماتورهای فولادی، تیر با میلگردهای GFRP استاندارد، و تیرهای با میلگردهای هیبریدی دارای هسته فوم پلی‌یورتان با قطرهای ۴ و ۸ میلی‌متر براساس روش‌های آزمایشگاهی و مدلسازی عددی بررسی گردید. نتایج نشان داد که تیر با میلگردهای GFRP رفتاری خطی بدون ناحیه پلاستیک نشان داد، در حالی که تیرهای هیبریدی شکل‌پذیری بهبود یافته‌ای ارائه کردند. شاخص شکل‌پذیری تیر با میلگردهای هیبریدی (هسته ۸ میلی‌متر) ۱۳۱٪ بیشتر از تیر با GFRP استاندارد و ۳۷٪ بیشتر از تیر با هسته ۴ میلی‌متر بود. الگوی شکست نیز از برشی در GFRP استاندارد به برشی-خمشی و خمشی در نمونه‌های هیبریدی تغییر یافت، که نشان‌دهنده تأثیر فوم پلی‌یورتان در توزیع یکنواخت تنش‌ها است.

واژگان کلیدی

فوم الاستومتری، میلگرد هیبریدی GFRP، فوم پلی‌یورتان، مدل پلاستیسیته خرابی بتن، شاخص شکل‌پذیری.

Evaluation of cracking behavior and ductility of concrete beams reinforced with GFRP rebars with elastomeric foam core based on laboratory studies and numerical modeling

Name and surname of the corresponding author*, Name and surname of the second author

Faculty of Civil Engineering, Name of the faculty or university, City of the university
Name and surname and email of the corresponding author*

Abstract:

This study investigates the development of cracks and the enhancement of ductility in concrete beams by introducing newly designed hybrid GFRP rebars incorporating polyurethane foam cores as a means to overcome the well-known limitations of conventional GFRP reinforcement. Although reinforced concrete is widely used due to its high compressive strength, economic feasibility, and adaptability to various structural applications, the corrosion of steel reinforcement remains a major concern that can significantly reduce structural durability and increase maintenance costs. GFRP rebars have emerged as a promising alternative due to their excellent corrosion resistance, low weight, and favorable mechanical properties; however, their inherently low elastic modulus often leads to excessive deflection, wider cracks, and brittle failure modes in concrete members. To address these drawbacks, this research proposes a hybrid GFRP rebar system in which a lightweight and highly energy-absorbing polyurethane foam core is embedded to reduce brittleness, enhance deformation capacity, and improve flexural performance. Four concrete beam specimens—one reinforced with steel rebars, one with standard GFRP, and two with hybrid GFRP rebars containing 4-mm and 8-mm foam cores—were tested through laboratory experiments and numerical simulations using ABAQUS to evaluate flexural behavior, crack patterns, and ductility indices. The experimental and numerical results exhibited strong agreement, confirming the reliability of the adopted CDP model in simulating concrete behavior and failure mechanisms. Beams reinforced with hybrid rebars demonstrated notably improved ductility compared with standard GFRP, with the 8-mm core specimen showing a 131% increase in ductility over the standard GFRP beam and a 37% increase over the 4-mm core specimen. Furthermore, the failure modes shifted from brittle shear failure in the standard GFRP beam to shear-flexural and predominantly flexural failures in the hybrid beams, indicating a more uniform stress distribution and enhanced energy absorption due to the foam core. These findings highlight the potential of polyurethane-foam-integrated GFRP rebars as an innovative and effective solution for improving serviceability, ductility, and overall structural performance in concrete beams.

Keywords: Elastomeric foam, GFRP hybrid rebar, Polyurethane foam, Concrete failure plasticity model, Ductile index

بلکه با اصلاح سختی محوری، راه حلی نوین برای کنترل همزمان خیز و ارتقای شکل پذیری در تیرهای بتنی ارائه می دهد (۷).

پژوهش حاضر با هدف پر کردن خلأ تحقیقاتی موجود، به ارزیابی جامع آزمایشگاهی و عددی رفتار ترک خوردگی، تغییر شکل و شکل پذیری تیرهای بتنی مسلح به این نوع میلگردهای نوین می پردازد. در این راستا، با بهره گیری از مدل سازی پیشرفته در نرم افزار ABAQUS و صحت سنجی آن با نتایج تجربی، تأثیر پارامتریک هسته فوم بر عملکرد سازه های تیرها تحلیل می شود (۸). این مطالعه در پی اثبات این فرضیه است که ترکیب هوشمندانه فوم پلی یورتان و الیاف شیشه می تواند محدودیت های کلاسیک آرماتورهای FRP را مرتفع ساخته و گامی نو در جهت توسعه سازه های پایدار و مقاوم بردارد.

۲- مرور ادبیات

در این قسمت به مروری بر چند تحقیق انجام شده پیرامون موضوع تحقیق پرداخته می شود و نتایج آنها بررسی می گردد.

لیو و همکاران (۲۰۲۳)^۴ رفتار فشاری GFRP محصور با FRP را بررسی کردند. آزمایش های فشاری بر روی میله های کوتاه (طول ۳۰۰ میلی متر) و بلند (طول ۶۰۰ میلی متر) با قطر هسته ۲۰ میلی متر نشان داد که محصورسازی ظرفیت فشاری را تا ۲۰۰ درصد افزایش می دهد. آن ها مدل پیش بینی مبتنی بر تئوری پلاستیسیته ارائه دادند که با داده های آزمایشگاهی تا ۹۵ درصد همخوانی داشت. این مطالعه بر بهبود فشاری تمرکز داشت، اما شکل پذیری در بارهای دینامیکی نیاز به تحقیق بیشتر دارد (۹).

وانگ و همکاران (۲۰۲۴)^۵ نوآوری در سازه های قوسی با FRP را بررسی کردند. آن ها روش های تولید مانند پالترژن و پیچش فیلامنت را تحلیل کردند و نشان دادند که این روش ها دوام را تا ۵۰ درصد در محیط های مرطوب افزایش می دهند. این کار پیشنهاد کرد که هیبریدسازی با مواد نرم مانند فوم الاستومری می تواند شکل پذیری را بهبود بخشد، اما آزمایش های عملی ارائه نشد (۱۰).

یانگ و همکاران (۲۰۲۵)^۶ رفتار دینامیکی تیرهای بتن بازافتی تقویت شده با فیبر را تحت ضربه بررسی کردند. آزمایش های ضربه با

بتن مسلح به واسطه ویژگی های برجسته ای نظیر مقاومت فشاری بالا، شکل پذیری مطلوب و توجیه اقتصادی، در کنار سهولت دسترسی به مصالح و انعطاف پذیری در طرح های سازه ای، پرکاربردترین ماده در پروژه های عمرانی مدرن محسوب می شود. قابلیت کنترل بر مشخصه های مقاومتی و امکان تولید بتن سبک با استفاده از افزودنی های نوین، دامنه کاربرد این ماده را گسترش داده است (۱). با این حال، پدیده خوردگی آرماتورهای فولادی همواره چالشی بحرانی در دوام سازه های بتنی بوده که می تواند منجر به زوال تدریجی یکپارچگی سازه و تحمیل هزینه های سنگین نگهداری و تعمیرات گردد (۲).

در دهه های اخیر، آرماتورهای پلیمری تقویت شده با الیاف شیشه^۱ به دلیل مقاومت عالی در برابر عوامل خورنده و وزن کم، به عنوان جایگزینی کارآمد برای فولاد معرفی شده اند (۳). با وجود این مزایا، مدول الاستیسیته پایین این میلگردها منجر به بروز خیزهای بزرگ و عرض ترک های غیرمجاز در حالت بهره برداری می شود (۴). علاوه بر این، رفتار خطی-الاستیک و فاقد پله تسلیم الیاف شیشه، منجر به شکست ترد در اعضای بتنی شده و شکل پذیری سازه را در برابر بارهای سنگین و دینامیکی به شدت محدود می کند (۵).

نوآوری محوری این پژوهش، برای عبور از بن بست "تقابل مقاومت و شکل پذیری" در میلگردهای کامپوزیتی، ارائه و بکارگیری نسل جدیدی از آرماتورهای GFRP با هسته فوم پلی یورتان^۲ است. انتخاب فوم پلی یورتان در این تحقیق بر پایه یک استراتژی علمی چندجانبه صورت گرفته است؛ این ماده به دلیل ساختار سلولی منحصربه فرد و خاصیت ویسکوالاستیک، توانایی بالایی در میراگری و جذب انرژی^۳ داشته و می تواند رفتار صلب و ترد الیاف شیشه را تعدیل نماید (۶). از منظر ساختاری، تعبیه این هسته منعطف در مرکز میلگرد، با بهبود بازتوزیع تنش های داخلی و جلوگیری از تمرکز تنش در الیاف محیطی، مکانیزم شکست را از حالت ناگهانی به حالتی پیش رونده و هشداردهنده تغییر می دهد. این رویکرد نه تنها باعث کاهش وزن نهایی آرماتور و ارتقای جنبه های اقتصادی سازه می شود،

^۴. Liu et al

^۵. Wang et al

^۶. Yang et al (2025)

^۱. Glass Fiber Reinforced Polymer

^۲. Polyurethane Foam Core

^۳. Energy Absorption

سرعت پایین (۲ متر بر ثانیه) بر روی تیرهای ۲ متری نشان داد که BFRP و SBCB تغییر شکل را تا ۴۰ درصد کاهش می‌دهند و جذب انرژی را تا ۶۰ درصد افزایش می‌دهند. مکانیزم‌های آسیب شامل ترک‌های مورب و شکست برشی بود (۱۱).

چن و همکاران (۲۰۲۵)^۱ بررسی‌ای بر کامپوزیت‌های LRS FRP قابل بازیافت ارائه دادند و افزایش کرنش شکست تا ۸ درصد را گزارش کردند، که پایداری محیطی را بهبود می‌بخشد (۱۲).

علی و همکاران (۲۰۲۵)^۲ پیشرفت‌های مقاوم‌سازی لرزه‌ای را بررسی کردند و تکنیک‌های FRP مانند ورق‌های خارجی و محصورسازی را برای افزایش شکل‌پذیری تا ۱۰۰-۲۰۰ درصد پیشنهاد دادند. آزمایش‌های چرخه‌ای بر روی ستون‌های بتن‌آرمه نشان داد که GFRP تغییر شکل ماندگار را تا ۵۰ درصد کاهش می‌دهد (۱۳).

حنطه و همکاران (۱۴۰۱) به بررسی دقت مدل‌های هوش مصنوعی تلفیقی MARS-PSO و ELM-PSO در پیش‌بینی مقاومت فشاری بتن در اعضای محصور شده با الیاف پلیمری FRP پرداختند. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که استفاده از الگوریتم‌های بهینه‌سازی می‌تواند با دقت بسیار بالایی رفتار غیرخطی بتن تقویت‌شده با FRP را مدل‌سازی کند. این مطالعه برای محققانی که به دنبال مدل‌سازی عددی و تحلیلی تیر-ستون‌های تقویت شده با FRP هستند، مبنای محاسباتی دقیقی جهت تعیین ظرفیت نهایی مقطع ارائه می‌دهد (۱۴).

پالیزی و توفیق (۱۴۰۱) به بررسی تحلیل قابلیت اعتماد و ضریب اطمینان در اعضای سازه‌ای که با استفاده از FRP مقاوم‌سازی شده‌اند، پرداختند. تحقیق حاضر با تمرکز بر متغیرهای تصادفی مانند مقاومت تسلیم و چسبندگی الیاف به سطح عضو، نشان داد که استفاده از FRP به روش‌های نوین می‌تواند شاخص قابلیت اعتماد سازه را در برابر بارهای ثقلی و جانبی به طور چشمگیری بهبود بخشد. یافته‌های این مقاله تأکید می‌کند که پارامترهای مقاومتی FRP باید با ضرایب اصلاحی دقیق در محاسبات تیرهای بتنی وارد شوند تا از شکست‌های ترد جلوگیری شود (۱۵).

شایانفر و همکاران (۱۴۰۴) به بررسی روش‌های مقاوم‌سازی برشی تیرهای بتن آرمه با استفاده از FRP پرداختند. مقاوم‌سازی

برشی تیرهای بتن‌آرمه با مصالح FRP روشی مؤثر برای افزایش ظرفیت برشی و کاهش شکست‌های ترد است. این مصالح به دلیل وزن کم، مقاومت در برابر خوردگی و سهولت نسبی اجرا، در تقویت اعضای بتنی کاربرد گسترده‌ای دارند. در میان روش‌های رایج، اتصال خارجی EB با چسباندن الیاف بر سطح بتن اجرا می‌شود، اما ممکن است با جداسازی زودهنگام همراه باشد؛ در حالی که روش نصب نزدیک به سطح NSM با قرارگیری نوارهای FRP در شیارهای سطح بتن، انتقال نیرو و عملکرد بهتری ایجاد می‌کند، هرچند اجرای آن پیچیده‌تر است. همچنین استفاده از مهارهای فلزی، نوارهای افقی و نکرهای FRP می‌تواند کارایی سیستم تقویتی را افزایش دهد. نتایج نشان می‌دهد محصورسازی FRP و آرایش U شکل بیشترین تأثیر را در افزایش مقاومت برشی دارند و روش NSM همراه با مهارهای FRP، به‌ویژه در زاویه ۴۵ درجه، عملکرد بهینه‌تری ارائه می‌دهد (۱۶).

حسن زاده و شریبتدار (۱۴۰۲) به مقایسه‌ی رفتار خمشی و الگوی انتشار ترک تیرهای بتن مسلح معمولی و الیافی با کمینه و بیشینه‌ی آرماتور کششی طولی پرداختند. برای این منظور، ۸ تیر ساخته شد که شامل ۲ تیر بتن معمولی به‌عنوان نمونه مرجع و ۶ تیر بتن الیافی با درصدهای حجمی ۵/۰، ۱ و ۵/۱ درصد الیاف فولادی بود. نتایج نشان داد که استفاده از الیاف فولادی موجب بهبود بار ترک‌خوردگی، مقاومت خمشی، شکل‌پذیری و جذب انرژی تیرها نسبت به نمونه‌های بتن معمولی می‌شود. بیشترین افزایش شکل‌پذیری در تیر دارای آرماتور کششی کمینه و ۱ درصد الیاف فولادی مشاهده شد که حدود ۳۰ درصد بیشتر از نمونه مشابه بدون الیاف بود. همچنین افزودن ۵/۰، ۱ و ۵/۱ درصد الیاف فولادی به‌ترتیب باعث افزایش ۱۶، ۲۳ و ۲۹ درصدی مقاومت خمشی تیرها نسبت به نمونه‌های بدون الیاف شد (۱۷).

کوشا و نقی پور (۱۴۰۱) به بررسی عددی رفتار لرزه‌ای اتصالات تیر به ستون مجهز به ورق‌های جانبی در قاب‌های مرکب فولادی-بتنی پرداختند. در این تحقیق از روش‌های تحلیل عددی المان محدود و مدل‌سازی براساس این روش استفاده گردید. نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که استفاده از صفحات جانبی باعث انتقال مفصل پلاستیک از بر ستون به داخل تیر شده و ظرفیت باربری و

^۲. Ali et al (2025)

^۱. Chen et al (2025)

۲-۳- مشخصات مصالح و نمونه‌ها

به منظور انجام تحقیق در ابتدا از روش‌های ساخت و آزمایش بر روی مدل‌های فیزیکی تیرها و مدلسازی عددی مبتنی بر روش المان محدود و نرم‌افزار ABAQUS به صورت توأم استفاده می‌گردد. در ابتدا تعداد ۴ تیر بتنی با ابعاد مقطع ۲۰ در ۲۰ سانتیمتر و به طول ۷۵ سانتیمتر ساخته می‌شوند. برای ارزیابی مقاومت بتن ساخته شده ۴ نمونه مکعبی به ابعاد ۱۵ سانتیمتر و با شرایط یکسان تهیه و ۲۸ روز عمل‌آوری گردیدند که پس از شکست نمونه‌های مکعبی متوسط مقاومت فشاری بتن ۴۴۸ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع بدست آمده است. بتن‌ریزی در سه لایه انجام شد، و هر لایه با ۲۵ ضربه کوبیده شد تا تراکم کافی حاصل شود و حباب‌های هوا حذف شوند. این فرآیند مطابق با استانداردهای ASTM C192 (۹) برای ساخت نمونه‌های بتنی انجام شد. پس از ۲۴ ساعت گیرش اولیه، نمونه‌ها از قالب خارج شده و به مدت ۲۸ روز در حوضچه آب با دمای ۲۳ درجه سانتی‌گراد عمل‌آوری شدند. برای ارزیابی مقاومت بتن، چهار نمونه مکعبی ۱۵×۱۵×۱۵ سانتی‌متر تهیه شدند که پس از آزمایش فشاری، مقاومت فشاری متوسط ۴۴۸ مگاپاسکال را نشان دادند. این مقاومت برای کاربردهای سازه‌ای، مانند پل‌ها و دال‌های بتنی، مناسب است. در شکل (۲) جزئیات تیر بتنی مورد مطالعه نشان داده شده است.

در این پژوهش، انتخاب ابعاد نمونه‌ها بر پایه تئوری تیرهای عمیق انجام شده است تا مکانیزم شکست از حالت خمشی به برشی تغییر یابد. در این هندسه، آرماتورهای طولی برخلاف تیرهای معمولی، نقش موثری در مهارکنندگی و انتقال بارهای برشی ایفا می‌کنند. تمامی شرایط مرزی و نرخ بارگذاری در مدلسازی عددی دقیقاً منطبق بر شرایط واقعی آزمایشگاه تنظیم شده‌اند تا صحت‌سنجی مدل تضمین شود. همچنین، صرف‌نظر کردن از اثر محصورشدگی خاموت‌ها یک استراتژی علمی برای ایزوله کردن نقش میلگردهای کامپوزیتی و حذف متغیرهای مزاحم بوده است. این رویکرد سخت‌گیرانه ثابت می‌کند که بهبود ظرفیت باربری و کنترل ترک‌ها، صرفاً ناشی از عملکرد سیستم تقویتی است. لذا، انطباق کامل نتایج عددی و آزمایشگاهی نشان‌دهنده دقت بالای فرضیات و کارایی بالای طرح در بحرانی‌ترین شرایط بارگذاری است. همچنین طراحی آزمایش به‌گونه‌ای انجام شد که سایر عوامل مؤثر، به‌ویژه مشخصات

شکل‌پذیری اتصال را به میزان قابل‌توجهی افزایش می‌دهد. همچنین، مدلسازی‌های عددی اثبات می‌کنند که این نوع اتصال در قاب‌های مرکب، پایداری چرخه‌ای مطلوبی داشته و از تمرکز تنش در جوش‌های حساس جلوگیری می‌کند. در نهایت، این تحقیق راهکارهایی برای بهینه‌سازی ابعاد ورق‌های جانبی جهت دستیابی به عملکرد ایده‌آل در زلزله ارائه می‌دهد (۱۸).

۳- روش تحقیق

۱-۳- نحوه ساخت میلگردهای هیبریدی

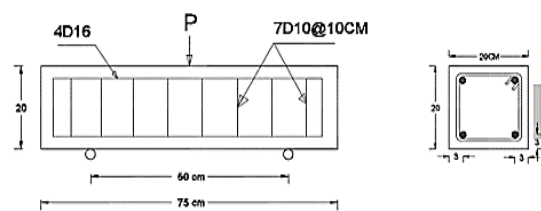
برای ساخت میلگردهای هیبریدی ابتدا داخل میلگردهای GFRP را با دستگاه مخصوصی که قابلیت حفاری با مته‌های بلند (۴۰-۸۰ سانتیمتری) را داشت، حفاری گردید. به منظور سوراخکاری دقیق و عدم تولید حرارت که منجر به از بین رفتن رزین ناحیه سوراخ شده می‌شود، سوراخکاری با دستگاه مخصوص و با دور پایین که مته آن بصورت مداوم خنک کاری می‌شد، انجام گردید. پس از آن و برای گیرایی بیشتر بین میلگرد هیبریدی و بتن، آج‌هایی با گام ۱.۵ سانتیمتر بر روی سطح میلگرد اعمال گردید و فوم پلی‌یورتان با دستگاه تزریق فوم (گان) به داخل سوراخ تزریق گردید. نحوه ساخت میلگرد هیبریدی در شکل (۱) نمایش داده شده است.



شکل ۱: میلگردهای هیبریدی ساخته‌شده با هسته فوم پلی‌یورتان

همانطور که بیان گردید برای بررسی تأثیر هسته فوم پلی‌یورتان بر رفتار خمشی و شکل‌پذیری تیرهای بتنی، چهار نوع تیر با ابعاد یکسان (۷۵×۲۰×۲۰ سانتی‌متر) طراحی و ساخته شدند.

آرماتور عرضی، در تمامی نمونه‌ها ثابت و کنترل شده باقی بماند تا اثر متغیر اصلی تحقیق با حداقل اختلاط پارامتری قابل ارزیابی باشد. بر این اساس، قطر، فاصله و آرایش خاموت‌ها در همه نمونه‌ها یکسان انتخاب شد و نقش آن‌ها در این مطالعه به عنوان یک مؤلفه ثابت و نه یک متغیر مستقل در نظر گرفته شد. بنابراین، تمرکز بر آرماتورهای طولی به هیچ وجه به معنای نادیده گرفتن نقش خاموت‌ها نیست، بلکه مبتنی بر منطق روش‌شناختی کنترل متغیرها در یک مطالعه مقایسه‌ای است. به بیان دقیق‌تر، در این پژوهش ادعا نشده است که شکل‌پذیری عضو منحصراً ناشی از آرماتورهای طولی است، بلکه مقصود آن است که در شرایط ثابت بودن آرماتور عرضی، تفاوت‌های مشاهده‌شده در ظرفیت باربری، گسترش ترک‌ها و شاخص‌های شکل‌پذیری عمدتاً از تغییر در سامانه آرماتور طولی ناشی می‌شود. همچنین در مدل‌سازی عددی، رفتار غیرخطی بتن، آرماتورهای طولی و عرضی و اندرکنش بین آن‌ها لحاظ شده است؛ بنابراین، اثر خاموت‌ها از منظر تحلیل حذف نشده، بلکه در چارچوب ثابت بودن جزئیات آن، به عنوان بخشی از سیستم مقاوم عضو در تمامی نمونه‌ها حضور داشته است.



شکل ۲: جزئیات نمونه تیر بتنی برای انجام آزمایش فشاری

این ابعاد برای شبیه‌سازی شرایط واقعی سازه‌های بتنی، مانند تیرهای پل‌ها، انتخاب شدند تا نتایج قابل تعمیم به کاربردهای عملی باشند. نمونه‌ها شامل موارد زیر هستند:

- BS (تیر بتنی با آرماتورهای فولادی): این نمونه به عنوان مرجع طراحی شد و دارای دو میلگرد فولادی با قطر ۱۶ میلی‌متر در ناحیه کششی و دو میلگرد مشابه در ناحیه فشاری بود. آرماتورهای فولادی به دلیل رفتار خمیری، شکل‌پذیری بالایی دارند و به عنوان معیاری برای مقایسه عملکرد سایر نمونه‌ها استفاده شدند.
- BF (تیر بتنی با میلگردهای GFRP استاندارد): این نمونه با دو میلگرد GFRP با قطر ۱۶ میلی‌متر در نواحی کششی

و فشاری ساخته شد. میلگردهای GFRP به دلیل مقاومت بالای کششی و مقاومت در برابر خوردگی، برای محیط‌های خورنده مناسب هستند، اما رفتار ترد آن‌ها شکل‌پذیری را محدود می‌کند.

- BSHF1 (تیر بتنی با میلگردهای هیبریدی، هسته ۴ میلی‌متر): این نمونه دارای دو میلگرد هیبریدی GFRP با هسته فوم پلی‌یورتان (قطر هسته ۴ میلی‌متر) در ناحیه کششی و دو میلگرد فولادی در ناحیه فشاری بود. هسته فوم برای افزایش انعطاف‌پذیری و بهبود رفتار شکست طراحی شد.
- BSHF2 (تیر بتنی با میلگردهای هیبریدی، هسته ۸ میلی‌متر): مشابه BSHF1، اما با هسته فوم پلی‌یورتان با قطر ۸ میلی‌متر در میلگردهای هیبریدی ناحیه کششی. هسته بزرگ‌تر برای بررسی تأثیر افزایش انعطاف‌پذیری فوم بر رفتار خمشی انتخاب شد.

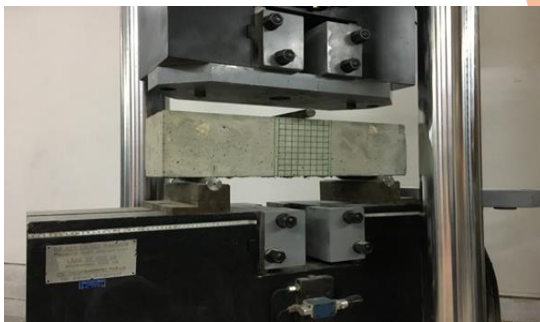
این نمونه‌ها با دقت طراحی شدند تا تفاوت‌های ناشی از نوع آرماتور (فولادی، GFRP استاندارد، و هیبریدی) و تأثیر قطر هسته فوم پلی‌یورتان بر رفتار خمشی و شکل‌پذیری بررسی شود. بتن مورد استفاده با مقاومت فشاری متوسط ۴۴.۸ مگاپاسکال ساخته شد تا شرایط یکنواختی برای همه نمونه‌ها فراهم شود. این مشخصات امکان مقایسه مستقیم عملکرد نمونه‌ها را در شرایط بارگذاری یکسان فراهم کرد. مصالح مورد استفاده شامل میلگردهای GFRP استاندارد، میلگردهای فولادی، و فوم پلی‌یورتان بودند. میلگردهای GFRP با قطر ۱۶ میلی‌متر انتخاب شدند که مقاومت کششی ۹۰۰ مگاپاسکال و مدول الاستیسیته ۷۰ گیگاپاسکال داشتند. این ویژگی‌ها، همراه با مقاومت بالای آن‌ها در برابر خوردگی، آن‌ها را برای محیط‌های خورنده مانند مناطق ساحلی مناسب می‌کند. میلگردهای فولادی با قطر ۱۶ میلی‌متر، برای میلگردهای طولی و ۱۰ میلی‌متر برای میلگردهای برشی برای مقایسه استفاده شدند. این میلگردها رفتار خمیری دارند که شکل‌پذیری بالایی را به سازه می‌بخشند. فوم پلی‌یورتان، بصورت تک جزیی و بر پایه رزین پلی‌یورتان است که با جذب رطوبت هوا به حالت فیزیکی، جامد الاستیک و انعطاف‌پذیر تبدیل می‌شود و درصد ازدیاد طول بالایی دارد.

جدول ۱: مشخصات مصالح مسلح کننده

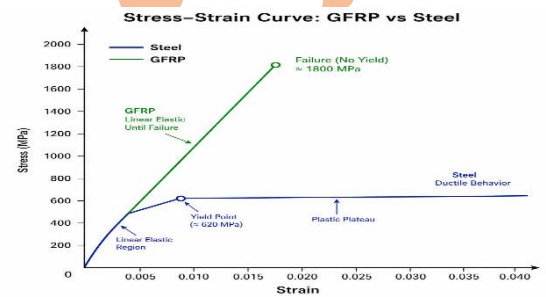
Rebar					
Ultimate Strain	Ultimate Stress	Density	Elastic Modulus	Diameter	Material Name
3.8	900 MPa	2.6 gr/cm ³	70 GPa	16 mm	GFRP
10	600 MPa	7.8 gr/cm ³	200 GPa	16 mm	Longitudinal Steel Rebar
12	500 MPa	7.8 gr/cm ³	200 GPa	10 mm	Transverse Steel Rebar

فوم					
Percentage Elongation	Ultimate Stress	Tensile Strength	Density	Physical States	Material Name
430	750 MPa	2.45 MPa	1.3 gr/cm ³	خمیری تک جزیی	Polyurethane Foam

آزمایش‌های خمشی سه نقطه‌ای با دستگاه ۱۹۰۰ (زوئیک / رول آلمان) انجام شدند، که برای بارگذاری دقیق و کنترل شده طراحی شده است. تیرها روی دو تکیه‌گاه غلتکی با فاصله ۵۰ سانتی‌متر قرار گرفتند، که امکان انتقال بار یکنواخت را فراهم می‌کرد. بار با سرعت ۰.۰۰۹ میلی‌متر بر ثانیه در وسط تیر اعمال شد تا رفتار خمشی تیرها به صورت تدریجی بررسی شود. حسگر جابجایی خطی (LVDT) در زیر وسط تیر نصب شد تا تغییر مکان‌ها با دقت بالا ثبت شوند. داده‌های بار و تغییر مکان به صورت خودکار توسط نرم‌افزار دستگاه ذخیره شدند تا برای تحلیل‌های بعدی استفاده شوند. این آزمایش‌ها مطابق با استاندارد ASTM D790 برای تست خمشی مواد کامپوزیتی انجام شدند (۱۰).

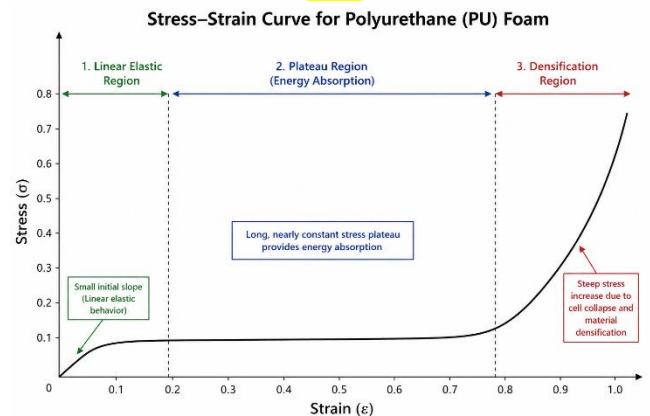


شکل ۵: آزمایش خمشی سه نقطه‌ای تیرهای بتنی



شکل ۳: منحنی رفتاری میلگردهای GFRP و مقایسه با میلگردهای فولادی

معمول



شکل ۴: منحنی رفتاری فوم پلی یورتان

برای شبیه‌سازی رفتار تیرهای بتنی مسلح شده با میلگردهای هیبریدی GFRP، نرم‌افزار ABAQUS انتخاب شد، که یکی از قدرتمندترین ابزارهای مبتنی بر روش اجزای محدود برای تحلیل مسائل مهندسی است. فرآیند تحلیل در ABAQUS از سه مرحله اصلی تشکیل شده است که شامل مراحل پیش‌پردازش، پردازش، و پس‌پردازش است. در مرحله پیش‌پردازش، مدل فیزیکی تیرها در محیط Abaqus/CAE ایجاد شد. این مرحله شامل تعریف هندسه تیر شرایط تکیه‌گاهی (دو تکیه‌گاه غلتکی با فاصله ۵۰ سانتی‌متر)، و بارگذاری (بار متمرکز در وسط تیر) بود. خواص مواد نیز تعریف شدند: بتن با مدل پلاستیسیته خرابی بتن^۱ برای شبیه‌سازی رفتار غیرخطی در کشش و فشار، میلگردهای GFRP با رفتار الاستیک خطی میلگردهای فولادی با رفتار الاستیک-پلاستیک و فوم پلی‌یورتان با

۳-۳- شرح آزمایش‌ها و مدلسازی عددی

^۱. Concrete Damage Plasticity

خواص الاستومری فایل ورودی مدل با استفاده از رابط گرافیکی Abaqus/CAE مستقیم تهیه شد (۱۱).

مرحله پردازش شامل حل مسائل عددی تعریف شده در مرحله پیش پردازش بود. با توجه به پیچیدگی مدل، که شامل رفتار غیرخطی بتن و تعامل بین بتن و میلگردها بود، زمان پردازش بسته به توان پردازشگر رایانه از چند ساعت تا چند روز متغیر است. در مرحله پس پردازش، نتایج مانند تغییر مکان ها، تنش ها، و کرنش ها تحلیل شدند تا رفتار تیرها ارزیابی شود. این مرحله امکان مقایسه نتایج عددی با داده های تجربی را فراهم کرد. مدل رفتاری خرابی بتن نیز به صورت DCP در نرم افزار ABAQUS در نظر گرفته شد که در آن داده های مربوط به منحنی تنش کرنش بتن در فشار و کشش و مشخصات محدوده رفتار پلاستیک بتن از نتایج آزمایش بر روی نمونه های بتن برداشت و به نرم افزار وارد می گردد. همچنین داده های محدوده رفتار میلگردها در ناحیه پلاستیک براساس تست های انجام شده بر روی میلگرد از آزمایشگاه برداشت و به نرم افزار معرفی می گردد و در مجموع رفتار الاستیک و پلاستیک بتن و فولاد به صورت توأم در تحلیل های عددی در نظر گرفته می شود.

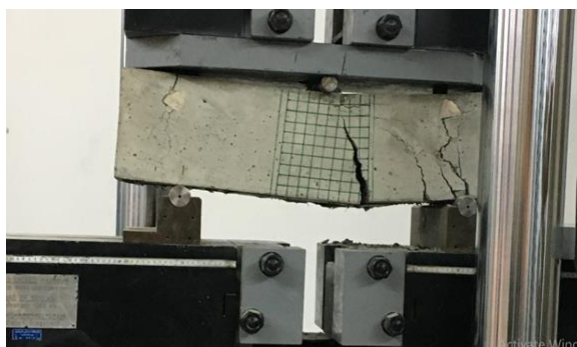
۴- نتایج تحلیل ترک خوردگی آزمایشگاهی و نرم افزاری

۴-۱- نتایج تحلیل ترک خوردگی آزمایشگاهی

آزمایش های خمشی سه نقطه ای با دستگاه Zwick/Roell 1900 انجام شدند، که به دلیل دقت بالا در اعمال بار و ثبت داده ها برای این تحقیق ایده آل بود. تیرها روی دو تکیه گاه غلتکی با فاصله ۵۰ سانتی متر قرار گرفتند، و بار متمرکز با سرعت ۰.۰۰۹ میلی متر بر ثانیه در وسط تیر اعمال شد تا رفتار خمشی به صورت تدریجی بررسی شود. حسگر جابجایی خطی (LVDT) در زیر وسط تیر نصب شد تا تغییر مکان ها با دقت بالا ثبت شوند. داده های بار و تغییر مکان توسط نرم افزار دستگاه ذخیره شدند، که امکان تحلیل دقیق رفتار مکانیکی را فراهم کرد. در ادامه نتایج مربوط به شرایط و الگوی رشد ترک ها برای نمونه ها ارائه می گردند.

نمونه BS (تیر بتنی با آرماتورهای فولادی): برای این نمونه اولین ترک های مویی در باری حدود ۱۰۰ کیلو نیوتن ظاهر شدند و تا نقطه تسلیم، رشد ترک ها محدود بود. پس از آن و تا باری در حدود

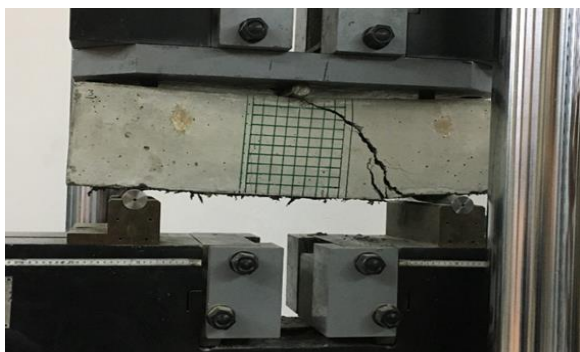
۱۴۰ کیلو نیوتن، ترک های خمشی شروع به گسترش کردند. در ناحیه پلاستیک، سرعت رشد ترک ها و بازشدگی آن ها افزایش یافت، به طوری که بتن ناحیه فشاری قادر به تحمل بار نبود. عمده بار توسط میلگردهای فولادی تحمل شد تا به بار ماکزیمم رسید. پس از آن، میلگردها به تنش نهایی خود رسیدند و با ناتوانی بتن فشاری، تیر به نقطه شکست رسید. در خصوص الگوی رشد ترک برای این نمونه مشاهده گردید که ترک های خمشی در ناحیه وسط تیر، جایی که لنگر خمشی حداکثر بود، ظاهر شدند. این ترک ها به دلیل شکل پذیری و مدول الاستیسیته بالای میلگردهای فولادی به صورت تدریجی و با فواصل منظم گسترش یافتند. با افزایش بار، ترک های برشی در نزدیکی تکیه گاه ها شکل گرفتند، که نشان دهنده توزیع مناسب تنش ها در اثر رفتار خمیری فولاد است. در شکل (۶) نتایج حاصل از ارزیابی شرایط ترک خوردگی و توسعه آن برای تیر BS نشان داده شده است.



شکل ۶: شرایط و الگوی رشد ترک در تیر نمونه BS

نمونه BF (تیر بتنی با میلگردهای GFRP استاندارد): برای این نمونه اولین ترک های مویی در باری در حدود ۵۰ کیلو نیوتن ایجاد گردید و تا نقطه تسلیم، ترک ها رشد قابل توجهی نداشتند. پس از آن و در مقدار باری در حدود ۱۰۲ کیلو نیوتن، ترک های برشی شروع به گسترش کردند. به دلیل مدول الاستیسیته پایین و رفتار ترد میلگردهای GFRP، ناحیه پلاستیک در منحنی بار تغییر شکل این نمونه مشهود نبود. در نهایت بار ماکزیمم در حدود ۲۰۰ کیلو نیوتن برای این نمونه به دست آمد. پس از آن، به دلیل عدم جاری شدن GFRP و ادامه رشد ترک ها تا ناحیه فشاری بتن، تیر به سرعت به نقطه شکست رسید. به لحاظ شرایط توزیع ترک ها نیز ترک های

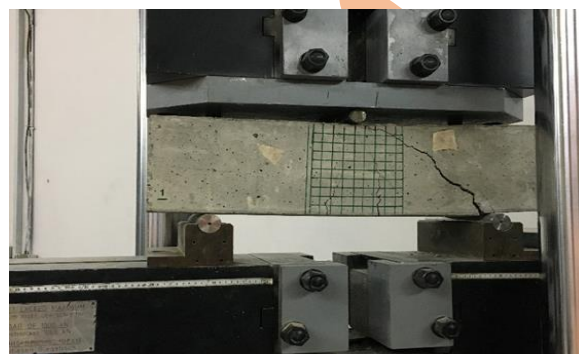
بخشید و از گسترش سریع ترک‌ها جلوگیری کرد. این الگو نشان دهنده تأثیر مثبت فوم در کاهش تمرکز تنش است. در شکل (۸) نتایج حاصل از ارزیابی شرایط ترک خوردگی و توسعه آن برای تیر BSHF1 نشان داده شده است.



شکل ۸: شرایط و الگوی رشد ترک در نمونه تیر BSHF1

نمونه BSHF2 (تیر بتنی با میلگردهای هیبریدی، هسته ۸ میلی‌متر): برای این نمونه اولین ترک‌های مویی تحت باری در حدود ۶۰ کیلونیوتن ایجاد شدند و تا نقطه تسلیم رشد محسوسی در ترک‌ها دیده نشد و در ادامه تحت باری در حدود ۱۱۱ کیلونیوتن به بعد ترک‌ها که از نوع خمشی هستند، شروع به رشد و گسترش نمود، با توجه به شکل‌پذیری و مدول الاستیسیته نسبتاً خیلی بیشتر میلگردهای هیبریدی در مقایسه با میلگردهای GFRP و تیر حالت قبل (BSHF1) ناحیه پلاستیکی کاملاً در نمودار مشهود است و دلیل آن این است که پس از اینکه میلگردهای هیبریدی تحت کشش و ترک خوردگی قرار گرفتند، فوم پلی یورتان که شکل‌پذیری بسیار بالایی دارد وارد عمل می‌شود و با اثر تواما با میلگرد GFRP و کمک به بهبود شکل‌پذیری آنها و با رشد ترک‌ها و تحت کشش قرار گرفتن میلگردهای هیبریدی بار ماکزیمم که در باری در حدود ۱۶۲ کیلونیوتن می‌باشد برای تیر بتنی کسب می‌گردد. اما پس از آن و با توجه به عدم جاری شدن میلگردهای GFRP و رشد ترک‌ها تا منطقه فشاری بتن و از بین رفتن بتن فشاری به نقطه شکست برای تیر فوق رسید. به لحاظ توزیع ترک‌ها نیز ترک‌های خمشی غالب بودند و به دلیل انعطاف‌پذیری بیشتر هسته فوم ۸ میلی‌متر، توزیع یکنواخت‌تری داشتند. تعداد ترک‌ها افزایش یافت و ترک‌های برشی محدودتر بودند، که نشان‌دهنده بهبود رفتار شکست است. در شکل

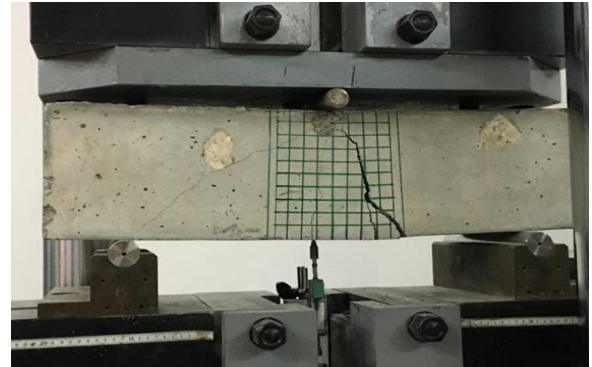
برشی غالب بودند و به دلیل مدول الاستیسیته پایین و رفتار ترد GFRP، به سرعت گسترش یافتند. تعداد ترک‌ها کمتر اما عمیق‌تر بود، که منجر به شکست ناگهانی شد. این الگو نشان‌دهنده تمرکز تنش در نقاط محدود است. در شکل (۷) نتایج حاصل از ارزیابی شرایط ترک خوردگی و توسعه آن برای تیر BF نشان داده شده است.



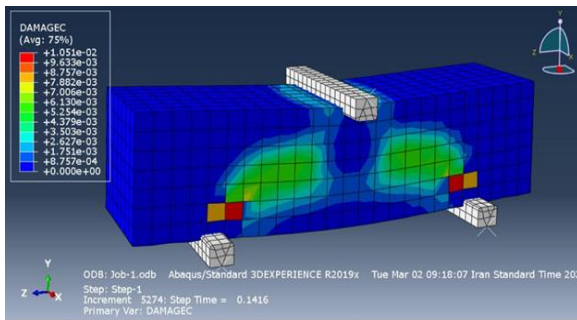
شکل ۷: شرایط و الگوی رشد ترک در نمونه تیر BF

نمونه BSHF1 (تیر بتنی با میلگردهای هیبریدی، هسته ۴ میلی‌متر): برای این نمونه اولین ترک‌های مویی تحت بار ۸۲ کیلونیوتن مشاهده گردید. بعد از آن تا نقطه تسلیم رشد محسوسی در ترک‌ها دیده نشد و تحت باری حدود ۱۳۵ کیلونیوتن به بعد ترک‌ها که از نوع برشی - خمشی هستند، شروع به رشد و گسترش نموده که با توجه به شکل‌پذیری و مدول الاستیسیته نسبتاً بیشتر میلگردهای هیبریدی در مقایسه با میلگردهای GFRP ناحیه پلاستیکی تقریباً در نمودار مشهود بود و دلیل آن این است که پس از اینکه میلگردهای هیبریدی تحت کشش و ترک خوردگی قرار گرفتند، فوم پلی یورتان که شکل‌پذیری بسیار بالایی دارد وارد عمل می‌شود و با اثر تواما با میلگرد GFRP و کمک به بهبود شکل‌پذیری آنها و با رشد ترک‌ها و تحت کشش قرار گرفتن میلگردهای هیبریدی بار ماکزیمم که در حدود ۱۷۵ کیلونیوتن می‌باشد برای تیر بتنی کسب می‌گردد. اما پس از آن و با توجه به عدم جاری شدن میلگردهای GFRP و رشد ترک‌ها تا منطقه فشاری بتن و از بین رفتن بتن فشاری به نقطه شکست برای تیر فوق رسید. به لحاظ شرایط توزیع ترک‌ها در این نمونه نیز ترک‌های برشی - خمشی با فواصل منظم‌تر ظاهر شدند. هسته فوم پلی‌یورتان توزیع تنش‌ها را بهبود

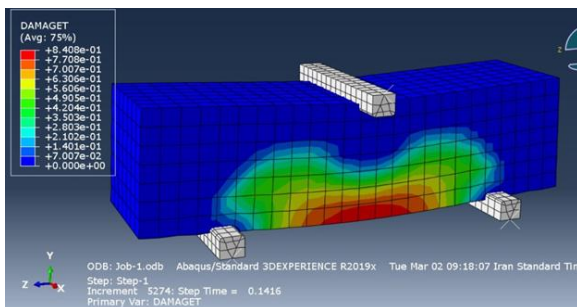
(۹) نتایج حاصل از ارزیابی شرایط ترک خوردگی و توسعه آن برای تیر BSHF2 نشان داده شده است.



شکل ۹: رشد ترک در نمونه تیر BSHF2



شکل ۱۰: نتایج تحلیل عددی و الگوی ترک برای نمونه BS



شکل ۱۱: نتایج تحلیل عددی و توزیع تنش برای نمونه BS

الگوی رشد ترک در مدل عددی برای نمونه BS با نتایج تجربی همخوانی داشت. مدل عددی ترک‌های خمشی اولیه را در ناحیه وسط تیر، جایی که لنگر خمشی حداکثر است، پیش‌بینی کرد. این ترک‌ها به صورت تدریجی و با توزیع منظم گسترش یافتند، که با رفتار خمیری میلگردهای فولادی سازگار است. در مراحل بعدی بارگذاری، مدل عددی ترک‌های برشی را در نزدیکی تکیه‌گاه‌ها نشان داد، که مشابه الگوی مشاهده‌شده در آزمایش‌ها بود. این تطابق نشان‌دهنده توانایی ABAQUS در شبیه‌سازی مکانیزم‌های شکست بتن و تعامل آن با آرماتورهای فولادی است. تحلیل توزیع تنش در مدل عددی برای نمونه BS نشان داد که تنش‌های فشاری در ناحیه بالای تیر و تنش‌های کششی در ناحیه زیرین (در محل آرماتورهای فولادی) با رفتار تجربی همخوانی دارند. مدل عددی تمرکز تنش‌ها را در ناحیه وسط تیر نشان داد، که با محل شروع ترک‌های خمشی در آزمایش‌ها مطابقت داشت. همچنین، رفتار خمیری میلگردهای فولادی در توزیع یکنواخت‌تر تنش‌ها و کاهش سرعت رشد ترک‌ها مؤثر بود. این تحلیل تأیید می‌کند که مدل CDP توانایی بالایی در شبیه‌سازی رفتار غیرخطی بتن و تعامل آن با آرماتورها دارد و

در مجموع نتایج تحلیل‌های آزمایشگاهی نشان می‌دهند که هسته فوم پلی‌یورتان در نمونه‌های هیبریدی با توزیع بهتر تنش‌ها و کاهش ترک‌های ناگهانی، رفتار سازه‌ای را بهبود بخشید. هسته ۸ میلی‌متر (BSHF2) عملکرد بهتری نسبت به هسته ۴ میلی‌متر (BSHF1) داشت.

۲-۴- نتایج تحلیل عددی نمونه تیرها

مدل‌سازی عددی براساس روش المان محدود^۱ و در نرم‌افزار ABAQUS با استفاده از مدل پلاستیسیته خرابی بتن (CDP) انجام گردید تا رفتار غیرخطی بتن، میلگردهای GFRP، فولاد، و فوم پلی‌یورتان شبیه‌سازی شود. عملیات مدل‌سازی شامل تعریف هندسه تیرها، شرایط تکیه‌گاهی، بارگذاری خمشی، و شبیه‌سازی اندرکنش بین بتن و آرماتورها بود. نتایج عددی در سه جنبه با داده‌های تجربی مقایسه شدند که شامل الگوی رشد ترک‌ها، و توزیع تنش‌ها. تمرکز بود. مقایسه نتایج تحلیل عددی و آزمایشگاهی برای نمونه BS (تیر بتنی با آرماتورهای فولادی) انجام گردید، زیرا که داده‌های عددی منحنی بار- تغییرمکان، الگوی ترک، و تنش برای این نمونه در دسترس بود. این مقایسه امکان ارزیابی دقت مدل‌سازی در بازسازی رفتار خمشی تیرها را فراهم کرد و پایه‌ای برای تحلیل‌های بعدی در نمونه‌های دیگر ایجاد نمود.

^۱. Finite Element Method

می‌تواند برای تحلیل‌های دقیق‌تر در شرایط مختلف بارگذاری استفاده شود.

۳-۴- نتایج تحلیل شکل‌پذیری نمونه‌ها

شکل‌پذیری یکی از مهم‌ترین معیارهای ارزیابی عملکرد تیرهای بتنی است، زیرا توانایی سازه در استهلاک انرژی بدون کاهش قابل توجه ظرفیت باربری را نشان می‌دهد. روش‌های متعددی برای محاسبه شکل‌پذیری وجود دارد، اما در این تحقیق، شاخص شکل‌پذیری از نسبت تغییر شکل نهایی به تغییر شکل جاری شدن به دست می‌آید.

$$\mu = \frac{\Delta u}{\Delta y} \quad (1)$$

که در این رابطه که μ شاخص شکل‌پذیری، Δu بیشینه تغییر مکان و Δy تغییر مکان لحظه جاری شدن است این تعریف امکان مقایسه کمی شکل‌پذیری نمونه‌ها را فراهم کرد و نشان‌دهنده توانایی تیرها در تحمل تغییرشکل‌های بزرگ قبل از شکست است. جدول (۲) جزئیات شکل‌پذیری نمونه‌ها را بر اساس داده‌های تجربی نشان می‌دهد.

جدول ۲: مشخصات مصالح مسلح کننده

Beam ID	Δu	Δy (mm)	μ
BS	16.80	3	5.6
BF	5.63	3.5	1.6
BSFH1	12.61	4.7	2.69
BSFH2	14.46	3.9	3.70

نتایج جدول (۲) نشان می‌دهند که نمونه BS با شاخص شکل‌پذیری ۵.۶ بالاترین توانایی استهلاک انرژی را داشت، که به رفتار خمیری میلگردهای فولادی نسبت داده می‌شود. این ویژگی BS را برای کاربردهایی که نیاز به شکل‌پذیری بالا دارند، مانند سازه‌های در معرض بارهای دینامیکی، مناسب می‌کند. در مقابل، نمونه BF با شاخص شکل‌پذیری ۱.۶ کمترین انعطاف‌پذیری را نشان داد، که به دلیل رفتار ترد میلگردهای GFRP و عدم وجود ناحیه پلاستیک در منحنی بار-تغییرمکان است. این رفتار BF را برای کاربردهای با بارهای استاتیکی و محیط‌های خورنده مناسب می‌کند.

اما در برابر بارهای دینامیکی محدود است. نمونه‌های BSFH1 و BSFH2 با شاخص‌های شکل‌پذیری ۲.۶۹ و ۳.۷۰ به ترتیب، بهبود قابل توجهی نسبت به BF داشتند. هسته فوم پلی‌یورتان در این نمونه‌ها با افزایش انعطاف‌پذیری میلگردهای GFRP، رفتار ترد آن‌ها را تعدیل کرد. نمونه BSFH2 با هسته فوم ۸ میلی‌متر عملکرد بهتری نسبت به BSFH1 (هسته ۴ میلی‌متر) نشان داد، که به دلیل انعطاف‌پذیری بیشتر فوم با قطر بزرگ‌تر است. این بهبود در شکل‌پذیری به فوم پلی‌یورتان اجازه داد تا پس از ترک‌خوردگی بتن و تحت کشش قرار گرفتن میلگردهای GFRP، انرژی بیشتری جذب کند و از شکست ناگهانی جلوگیری کند. با این حال، شاخص شکل‌پذیری BSFH2 همچنان کمتر از BS بود، که نشان‌دهنده محدودیت‌های میلگردهای هیبریدی در مقایسه با آرماتورهای فولادی است. نتایج این تحلیل نشان داد که افزودن هسته فوم پلی‌یورتان، به‌ویژه با قطر ۸ میلی‌متر، توانایی جذب انرژی را به‌طور چشمگیری بهبود می‌بخشد. این ویژگی نمونه‌های هیبریدی را برای کاربردهایی که نیاز به تعادل بین مقاومت خوردگی و شکل‌پذیری دارند، مانند پل‌های ساحلی یا سازه‌های صنعتی در مناطق زلزله‌خیز، مناسب می‌کند. با این حال، برای دستیابی به شکل‌پذیری مشابه BS، ممکن است نیاز به بهینه‌سازی بیشتر طراحی میلگردهای هیبریدی، مانند افزایش قطر هسته فوم یا تغییر خواص مکانیکی آن، باشد.

۵- نتیجه‌گیری

در این پژوهش، یک راهکار نوآورانه برای غلبه بر رفتار ترد میلگردهای کامپوزیتی از طریق معرفی میلگردهای هیبریدی GFRP با هسته فوم پلی‌یورتان ارائه شد. هدف اصلی، ایجاد یک مکانیزم داخلی برای جذب انرژی و بازتوزیع تنش‌ها بود تا شکل‌پذیری تیرهای بتنی ارتقا یابد. بر اساس یافته‌های حاصل از آزمون‌های تجربی و تحلیل‌های اجزای محدود در نرم‌افزار ABAQUS، نتایج تفصیلی زیر استخراج گردید:

۱. کارایی مدل‌سازی عددی و پیش‌بینی رفتار سازه‌ای: تحلیل‌های عددی نشان داد که مدل پلاستیسیته آسیب بتن^۱ ترکیب با تعریف دقیق رفتار ویسکوالاستیک فوم پلی‌یورتان، مطابقت بسیار بالایی

^۱. Concrete Damage Plasticity

(بیش از ۹۲ درصد) با منحنی‌های بار-تغییر مکان آزمایشگاهی دارد. این انطباق در تمامی مراحل بارگذاری، از شروع ترک‌خوردگی تا لحظه گسیختگی، مشهود بود. مدل‌سازی عددی ثابت کرد که تعامل بین هسته فوم و پوسته GFRP باعث جلوگیری از تمرکز تنش‌های موضعی در الیاف می‌شود؛ امری که در نمونه‌های فاقد فوم، عامل اصلی شکست ناگهانی و انفجاری میلگرد بود.

۲. تحلیل کمی شاخص‌های شکل‌پذیری و ظرفیت باربری: نتایج نشان داد که ضخامت هسته فوم تأثیر مستقیمی بر رفتار نرمی عضو بتنی دارد. نمونه BSHP2 با هسته ۸ میلی‌متری، نه تنها ظرفیت باربری نهایی را حفظ کرد، بلکه شاخص شکل‌پذیری را به میزان خیره‌کننده ۱۳۱٪ نسبت به نمونه شاهد FB افزایش داد. این مقدار برای نمونه BSHP1 (فوم ۴ میلی‌متری) حدود ۶۸٪ ثبت شد. این یافته تأیید می‌کند که با افزایش حجم فوم در مقطع میلگرد، پتانسیل تغییر شکل‌های پلاستیک و جذب انرژی در سیستم هیبریدی به‌طور خطی ارتقا می‌یابد و رفتار عضو را به استانداردهای تیرهای مسلح به فولاد (نمونه BS) نزدیک‌تر می‌کند.

۳. گذار از شکست ترد برشی به شکست نرم خمشی: یکی از مهم‌ترین دستاوردهای این تحقیق، تغییر بنیادین در مکانیزم خرابی تیرها بود. در حالی که نمونه‌های معمولی (BF) دچار شکست برشی ترد با ترک‌های قطری عمیق به عرض ۱.۲ میلی‌متر شدند، در نمونه‌های دارای هسته فوم، عرض ترک‌ها به ۰.۸ میلی‌متر کاهش یافته و الگوی ترک‌خوردگی به صورت توزیع‌یافته (خمشی-برشی) تغییر یافت. محاسبات انرژی نشان داد که میزان جذب انرژی در این تیرها ۳۵٪ افزایش یافته است. این پدیده به دلیل نقش هسته فوم در میرا کردن انرژی آزاد شده ناشی از ترک‌های بتن و اجازه دادن به میلگرد برای تحمل کرنش‌های بزرگتر پیش از پارگی الیاف است.

در مجموع این پژوهش با موفقیت یک راهکار نوآورانه برای غلبه بر رفتار ترد میلگردهای GFRP در تیرهای بتنی از طریق معرفی سیستم هیبریدی با هسته فوم پلی‌یورتان ارائه داد. نتایج آزمون‌های تجربی و تحلیل‌های عددی در ABAQUS نشان داد که این سیستم هیبریدی نه تنها ظرفیت باربری نهایی را حفظ کرده، بلکه با افزایش چشمگیر شاخص شکل‌پذیری (تا ۱۳۱٪) و تبدیل مکانیزم خرابی از حالت برشی ترد به خمشی نرم‌تر، گامی مهم در جهت ارتقای قابلیت اطمینان سازه‌های بتنی مسلح به FRP برداشته است. استفاده

استراتژیک از میلگرد فولادی در ناحیه فشاری، پایداری مقطع را تضمین و امکان مطالعه دقیق‌تر نوآوری هسته فوم در ناحیه کششی را فراهم نمود، در حالی که تغییر الگوی ترک‌خوردگی و افزایش ۳۵ درصدی جذب انرژی، اثربخشی این رویکرد را در جذب انرژی و میرایی لرزه‌ای تأیید می‌کند؛ با این حال، مطالعات آتی باید بر ارزیابی دوام بلندمدت، رفتار تحت بارگذاری‌های دینامیکی و بهینه‌سازی پارامترهای طراحی این سیستم هیبریدی تمرکز نمایند.

علیرغم نتایج ارزنده حاصله، این مطالعه با محدودیت‌های اجرایی و تئوریک روبرو بود که باید در تعمیم نتایج مدنظر قرار گیرند:

- تعداد محدود نمونه‌ها: به دلیل فرآیند پیچیده و هزینه‌بر ساخت میلگردهای هیبریدی در مقیاس کارگاهی، تعداد نمونه‌های آزمایشگاهی محدود بود.
- نوع بارگذاری: این تحقیق صرفاً تحت بارگذاری استاتیکی ثقلی انجام شد و رفتار عضو تحت بارهای دینامیکی، ضربه‌ای و لرزه‌ای که برای سازه‌های بتنی حیاتی است، مورد مطالعه قرار نگرفت.
- عامل زمان و دوام: رفتار بلندمدت فوم پلی‌یورتان در محیط شیمیایی بتن و اثر پدیده‌هایی مانند خزش و خستگی در این مرحله بررسی نشده است.

با توجه به نوظهور بودن این فناوری، حوزه‌های زیر برای تحقیقات آینده پیشنهاد می‌گردد:

- ❖ بررسی عملکرد تیرهای مسلح به میلگرد فوم‌دار تحت بارگذاری‌های چرخه‌ای برای ارزیابی قابلیت استفاده در مناطق زلزله‌خیز.
- ❖ مطالعه بر روی اثر نسبت‌های مختلف قطر هسته فوم به قطر کل میلگرد جهت دستیابی به یک فرمولاسیون بهینه در طراحی مقاطع.
- ❖ ارزیابی دوام و پایداری حرارتی میلگردهای هیبریدی در مواجهه با آتش‌سوزی و شرایط دمایی بحرانی.
- ❖ تحقیق در خصوص رفتار پیوستگی بین بتن و سطح خارجی این میلگردها با استفاده از روش‌های مختلف آج‌زنی یا پوشش‌های سیلیسی.

Materials, 475, p.141158.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2025.141158>

12. Ye, Y.Y., Liang, S.D., Feng, P. and Zeng, J.J. 2021. Recyclable LRS FRP composites for engineering structures: Current status and future opportunities. *Composites Part B: Engineering*, 212, p.108689. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2021.108689>
13. Qader, D.N., Khudhur, H.M., Shakor, P., Jumaa, G.B., Hasan, S. and Chandra, S.S. 2025. Advances in enhancing earthquake resilience of concrete infrastructure: A state-of-the-art review. *Passer Journal of Basic and Applied Sciences*, 7(1), pp.211-230.
14. Hanteh, M., Malek, H., & Akbari, M. 2022. Development of the integrated MARS-PSO and ELM-PSO models for estimating the compressive strength of concrete in circular concrete columns confined with FRP polymer fibers. *Sharif Journal of Civil Engineering*. [In Persian]. <https://doi.org/10.24200/j30.2022.59497.3053>
15. Palizi, S. and Toufigh, V. 2022. Reliability analysis of FRP-timber system. *Sharif Journal of Civil Engineering*, 38.2(3.1), pp.89-100. [InPersian]. <https://doi.org/10.24200/j30.2022.60571.3109>
16. Shayanfar, M. A., Afzali, S., Mahdavi, A., & Kermani, M. S. 1404. Review of shear strengthening methods for reinforced concrete beams using FRP. In *Proceedings of the 14th International Congress on Civil Engineering*. Tehran, Iran. [InPersian]. <https://civilica.com/doc/2456630>
17. Hasanzade, H. and Sharbatdar, M. K. 2023. Comparison of flexural behavior and cracking pattern of RC and SFRC beams reinforced with minimum and maximum longitudinal tensile bars. *Sharif Journal of Civil Engineering*, 39(2), pp.15-27. [InPersian]. <https://doi.org/10.24200/j30.2022.60932.3131>
18. Koosha, A. and Naghipour, M. 2022. Numerical study of the behavior of side connections with side plate in composite steel and concrete frames. *Journal of Structural and Construction Engineering*, 9(7), pp. 226-246. [InPersian]. <https://doi.org/10.22065/jsce.2022.326910.2711>
1. Diaferio, M. and Varona, F.B. 2024. Concrete structures: latest advances and prospects for a sustainable future. *Applied Sciences*, 14(9), p.3803. <https://doi.org/10.3390/app14093803>
2. Benmokrane, B., Wang, P., Ton-That, T.M., Rahman, H. and Robert, J.F. 2002. Durability of glass fiber-reinforced polymer reinforcing bars in concrete environment. *Journal of Composites for Construction*, 6(3), pp.143-153. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0268\(2002\)6:3\(143\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0268(2002)6:3(143))
3. ACI Committee 440. 2015. Guide for the design and construction of structural concrete reinforced with fiber-reinforced polymer FRP bars. American Concrete Institute.
4. Hollaway, L.C. and Leeming, M. eds. 1999. *Strengthening of reinforced concrete structures: Using externally-bonded FRP composites in structural and civil engineering*. Elsevier.
5. Bank, L.C. 2006. *Composites for construction: structural design with FRP materials*. John Wiley & Sons.
6. Dong, H., Li, S., Jia, Z., Luo, Y., Chen, Y., Jiang, J. and Ji, S. 2024. A review of polyurethane foams for multi-functional and high-performance applications. *Polymers*, 16(22), p.3182. <https://doi.org/10.3390/polym16223182>
7. Karimloo, M.J., Kabir, M.Z. and Abdouss, M. 2025. Ductility improvement of RC beams using GFRP rebar reinforcement filled with hyperelastic polyurethane foam. *International Journal of Civil Engineering*, pp.1-22. <https://doi.org/10.1007/s40999-025-01083-3>
8. Barris, C., Sala, P., Gómez, J. and Torres, L. 2020. Flexural behaviour of FRP reinforced concrete beams strengthened with NSM CFRP strips. *Composite Structures*, 241, p.112059. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2020.112059>
9. Liu, Y., Zhang, H.T., Tafsirojjaman, T., Dogar, A.U.R., Yue, Q.R. and Manalo, A. 2023. Compressive behaviour and prediction model for short and slender FRP-confined GFRP bars. *Construction and Building Materials*, 376, p.131059. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.131059>
10. Xia, Z.Y., Jiang, T. and Yu, T. 2023. Innovating arch structures with fiber-reinforced polymer composites: A review. *Advances in Structural Engineering*, 26(13), pp.2341-2358. <https://doi.org/10.1177/13694332231180373>
11. Htet, P., Chen, W., Huang, Z., Pham, T.M., Tran, D.T. and Hao, H. 2025. Dynamic behaviour of fibre-reinforced recycled aggregate concrete beams under low-velocity impact load. *Construction and Building*