

تقویت خمشی تیرهای بتن آرمه با ورقه‌های کامپوزیت سیمانی الیافی توانمند حاوی ولاستونیت: مطالعه آزمایشگاهی و عددی

رضا خالقی

گروه مهندسی عمران، واحد کرمانشاه، دانشگاه آزاد اسلامی، کرمانشاه، ایران re.khaleghi@iau.ac.ir

چکیده

در این پژوهش، یک کامپوزیت سیمانی الیافی توانمند حاوی پودر ولاستونیت به منظور تقویت خمشی تیرهای بتن آرمه توسعه یافته است. با وجود پیشرفت‌های اخیر در به کارگیری مواد معدنی در کامپوزیت‌های پایه سیمانی، مکانیسم دقیق هم‌افزایی فیزیکی-شیمیایی ولاستونیت و نقش آن در بهبود ناحیه انتقالی فصل مشترک میان الیاف و ماتریس در ورقه‌های تقویت‌کننده، همچنان به عنوان یک خلأ پژوهشی مطرح است. بدین منظور، تأثیر جایگزینی صفر تا ۲۰ درصدی ولاستونیت بر رفتار مکانیکی کامپوزیت مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج تجربی نشان داد که نسبت جایگزینی بهینه ۲۰ درصد، به دلیل ساختار سوزنی شکل ولاستونیت و نقش آن در بهبود ریزساختار ماتریس، رفتار شبه کرنش سخت‌شوندگی مطلوبی را نشان می‌دهد. نوآوری اصلی این مطالعه، علاوه بر تبیین مکانیسم میکروساختاری ولاستونیت در بهبود یکپارچگی ماتریس سیمانی، ارائه یک مدل عددی معتبر جهت پیش‌بینی رفتار خمشی تیرهای تقویت‌شده با این ورقه‌ها و میلگردهای پلیمری مسلح به الیاف شیشه است. مطالعات پارامتریک انجام‌شده نشان داد که افزایش ضخامت ورقه تقویتی و نیز افزایش قطر و تعداد میلگردهای پلیمری، نقش تعیین‌کننده‌ای در بهبود عملکرد خمشی سیستم تقویت‌شده دارند. در نهایت، اعمال این سیستم تقویتی موجب ارتقای چشمگیر ظرفیت باربری تیرها از ۱۲۰/۰۵ به ۲۶۷/۴۱ کیلو نیوتن و افزایش ظرفیت جذب انرژی از ۱۴۷۹/۳۵ به ۲۹۲۱/۸۴ ژول شد که گویای پتانسیل بالای این کامپوزیت به عنوان یک راهکار کارآمد، پایدار و نوین در بهسازی و مقاوم‌سازی سازه‌های بتنی است.

کلمات کلیدی

کامپوزیت سیمانی الیافی توانمند، پودر ولاستونیت، تیر بتن آرمه، تقویت خمشی، تحلیل عددی.

تیرهای بتن‌آرمه از مهم‌ترین اعضای باربر در سازه‌های بتنی به شمار می‌آیند و نقش اساسی در انتقال بارهای ثقیلی و جانبی ایفا می‌کنند. با این حال، بتن به دلیل مقاومت کششی پایین و کرنش نهایی محدود، مستعد ترک‌خوردگی است و این مسئله می‌تواند در طول دوره بهره‌برداری بر دوام و عملکرد سازه تأثیر منفی بگذارد. عواملی نظیر افزایش بارهای بهره‌برداری، تغییر کاربری سازه، خطاهای طراحی و نیز شرایط محیطی نامساعد از جمله سیکل‌های یخ‌زدگی و ذوب یا پدیده خوردگی، می‌توانند موجب کاهش مقاومت و سختی تیرهای بتن‌آرمه شوند [۱]. از این‌رو، توسعه روش‌های مؤثر برای افزایش ظرفیت خمشی و بهبود دوام این اعضا همواره مورد توجه مهندسان سازه بوده است.

در دهه‌های اخیر، استفاده از سیستم‌های تقویتی مبتنی بر کامپوزیت‌های پلیمری مسلح به الیاف به‌عنوان روشی کارآمد برای بهسازی تیرهای بتن‌آرمه گسترش یافته است. پژوهش‌های مختلف نشان داده‌اند که ورقه‌ها و لمینیت‌های FRP، به‌ویژه انواع CFRP و GFRP، قادرند ظرفیت باربری و سختی خمشی تیرها را به طور قابل توجهی افزایش دهند [۲]. با این حال، رفتار نسبتاً ترد این مصالح، حساسیت اتصال چسبی و افت عملکرد در شرایط دمایی یا رطوبتی بالا، از جمله محدودیت‌های این سیستم‌ها محسوب می‌شود. به همین دلیل، در سال‌های اخیر گرایش به استفاده از مصالح مرکب سیمانی پیشرفته افزایش یافته است [۳].

در این میان، کامپوزیت‌های سیمانی الیافی توانمند HPFRCC به عنوان یکی از گزینه‌های مناسب برای جایگزینی یا تکمیل سیستم‌های پلیمری مطرح شده‌اند. این مصالح به دلیل توانایی ایجاد ریزترک‌های متعدد، رفتار کششی کرنش‌سخت‌شونده و ظرفیت جذب انرژی بالا شناخته می‌شوند [۴]. نتایج مطالعات آزمایشگاهی متعدد نشان می‌دهد که استفاده از لایه‌ها یا ژاکت‌های HPFRCC می‌تواند موجب افزایش مقاومت خمشی، بهبود شکل‌پذیری، کاهش گسیختگی ترد و ارتقای دوام اعضای بتن‌آرمه شود [۵، ۶].

در سال‌های اخیر، استفاده از لایه‌ها و ورقه‌های کامپوزیت سیمانی به عنوان روشی کارآمد برای تقویت خمشی تیرهای بتن‌آرمه مورد توجه قرار گرفته است. در این راستا، سان کوانشتنگ و ژانگ ککسین (۲۰۱۶) با اجرای یک لایه ملات کامپوزیت سیمانی به ضخامت ۶۰ میلی‌متر در ناحیه کششی تیر T شکل پل بتنی یون‌لینگ در شهر هاربین چین، به بهبود عملکرد خمشی این عضو سازه‌ای دست یافتند [۷]. همچنین بی‌طرف، خیرالدین و شربتدار (۱۴۰۰) در یک مطالعه آزمایشگاهی، عملکرد خمشی تیرهای سراسری بتن‌آرمه تقویت‌شده با ورقه‌های پیش‌ساخته کامپوزیت سیمانی الیافی توانمند را بررسی کردند [۸]. نتایج این پژوهش نشان داد که استفاده از ورقه‌های پیش‌ساخته کامپوزیتی موجب افزایش ظرفیت باربری تیرها می‌شود و کاشت میلگرد فولادی درون ورقه، ضمن تقویت ظرفیت خمشی، از کاهش قابل ملاحظه شکل‌پذیری جلوگیری می‌کند. افزون بر این، احسانی، شربتدار و خیرالدین (۲۰۲۲) به تقویت درجا تیرهای سراسری دوده‌خانه با استفاده از HPFRCC و میلگرد فولادی پرداختند [۹]. با وجود آنکه در تمامی پژوهش‌های یادشده هدف اصلی، بهبود رفتار خمشی تیرهای بتن‌آرمه از طریق افزودن لایه یا ورقه‌های کامپوزیت سیمانی بوده است، بررسی مستقل رفتار خمشی ورقه‌های ملات کامپوزیتی پیش از نصب بر روی تیر به طور جامع مورد توجه قرار نگرفته و این خلأ پژوهشی همچنان پابرجاست.

همزمان، میلگردهای پلیمری مسلح به الیاف شیشه GFRP به دلیل مقاومت بالا در برابر خوردگی، وزن کم و مدول الاستیسیته مناسب، به عنوان جایگزینی مطلوب برای میلگردهای فولادی در محیط‌های خورنده مطرح شده‌اند [۱۰]. هرچند رفتار الاستیک خطی و گسیختگی ترد این میلگردها مستلزم ملاحظات ویژه در طراحی است، نتایج تحقیقات متعدد نشان می‌دهد که ترکیب این آرماتورها با سیستم‌های سیمانی می‌تواند به افزایش دوام و پایداری سازه‌ها منجر شود. ترکیب HPFRCC و میلگردهای GFRP در قالب ورقه‌های تقویتی پیش‌ساخته، ظرفیت قابل توجهی برای بهبود عملکرد تیرهای بتن‌آرمه دارد. با این حال، مطالعات انجام‌شده در این زمینه محدود بوده و اغلب بر بررسی HPFRCC یا آرماتورهای کامپوزیتی به صورت مجزا تمرکز داشته‌اند [۱۱]. از این‌رو، بررسی همزمان اثر ضخامت ورقه‌های HPFRCC و ویژگی‌های میلگردهای GFRP شامل تعداد و قطر آن‌ها بر رفتار خمشی تیرهای بتن‌آرمه، می‌تواند بخشی از این خلأ پژوهشی را پوشش دهد.

بر این اساس، هدف پژوهش حاضر مطالعه عددی رفتار خمشی تیرهای بتن آرمه تقویت شده با ورقه های HPFRCC مسلح به میلگردهای GFRP است. در گام نخست، مدل عددی تیر مرجع بر اساس داده های آزمایشگاهی توسعه یافت و صحت آن ارزیابی شد. سپس تحلیل پارامتریک در نرم افزار Abaqus به منظور بررسی اثر پارامترهایی نظیر ضخامت ورقه و تعداد و قطر میلگردهای GFRP بر ظرفیت باربری و ظرفیت جذب انرژی تیرها انجام شد. نتایج این تحلیل می تواند در طراحی بهینه سیستم های تقویتی ترکیبی HPFRCC و GFRP برای افزایش دوام و بهبود عملکرد سازه های بتنی مورد استفاده قرار گیرد.

۲- روش انجام پژوهش

فرآیند اجرای این پژوهش و ارائه نتایج آن در سه مرحله اصلی سازمان دهی شد. در مرحله نخست، کامپوزیت سیمانی الیافی توانمند حاوی پودر ولاستونیت ساخته شد و ویژگی های مکانیکی آن از طریق یک برنامه آزمایشگاهی مورد بررسی قرار گرفت. در این مرحله، رفتار فشاری، کششی و خمشی نمونه های ساخته شده ارزیابی شد. همچنین به منظور درک دقیق تر رفتار خمشی این کامپوزیت، یک مدل عددی توسعه داده شد و نتایج آن با داده های آزمایشگاهی مقایسه گردید تا دقت و اعتبار مدل مورد سنجش قرار گیرد.

در مرحله دوم، به منظور ارزیابی قابلیت مدل سازی عددی در تحلیل رفتار تیرهای بتن آرمه، یک نمونه تیر که نتایج آزمایشگاهی آن در مطالعات پیشین گزارش شده بود، با استفاده از نرم افزار المان محدود Abaqus شبیه سازی شد. سپس نتایج حاصل از تحلیل عددی با داده های آزمایشگاهی متناظر مقایسه شد تا توانایی مدل در بازتولید رفتار خمشی تیر مورد ارزیابی قرار گیرد.

در مرحله سوم، با بهره گیری از مدل عددی اعتبارسنجی شده، رفتار خمشی تیرهای بتن آرمه تقویت شده مورد مطالعه قرار گرفت. در این مرحله، تقویت خمشی از طریق نصب ورقه های کامپوزیت سیمانی الیافی در ناحیه کششی تیرها اعمال شد. همچنین تأثیر استفاده از میلگردهای پلیمری مسلح به الیاف شیشه با قطرهای مختلف در این ورقه های کامپوزیتی بر عملکرد خمشی تیرهای تقویت شده به صورت عددی بررسی و تحلیل شد.

۲-۱- مطالعه آزمایشگاهی HPFRCC

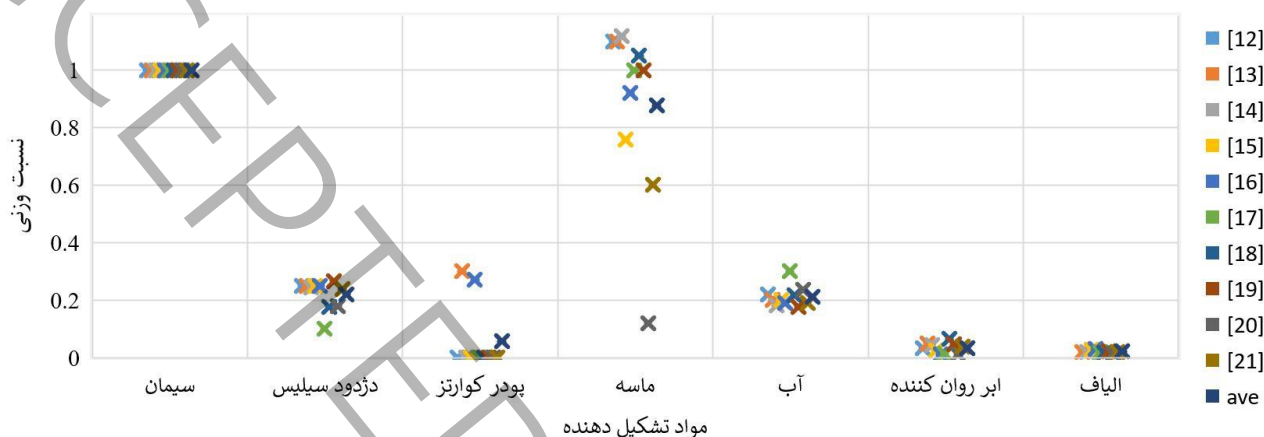
۲-۱-۱- روش ساخت

طرح اختلاط پایه کامپوزیت سیمانی الیافی توانمند (HPFRCC) بر پایه بررسی مطالعات پیشین تدوین شد. در این راستا، با تحلیل میانگین مقادیر گزارش شده در پژوهش های اخیر [۱۲-۲۱]، ترکیب اولیه انتخاب گردید (شکل ۱). در این طرح از سیمان پرتلند نوع ۲ با حداقل مقاومت فشاری ۴۲/۵ مگاپاسکال استفاده شد. برای بهبود مقاومت مکانیکی، افزایش تراکم خمیر و ارتقای کارایی رئولوژیکی، دوده سیلیسی با وزن مخصوص ۱/۳۵ گرم بر سانتی متر مکعب به مخلوط افزوده گردید.

به منظور تأمین مقاومت فشاری و افزایش چسبندگی میان اجزای ماتریس، ماسه سیلیسی (با دامنه دانه بندی ۰/۱ تا ۰/۶ میلی متر) و پودر کوارتز نیز به کار رفت. این مواد نقش مؤثری در ارتقای عملکرد مکانیکی و دوام کامپوزیت دارند. در گام بعد، پودر ولاستونیت به عنوان یک ماده معدنی طبیعی از خانواده سیلیکات های کلسیم با ساختار بلوری سوزنی شکل به مخلوط اضافه شد. سطح ویژه بالای این ماده و ساختار سوزنی آن، نقش مؤثری در افزایش تراکم خمیر سیمانی، بهبود کارایی و ایجاد قابلیت پل زنی در ریزترک ها ایفا می کند. جهت ارزیابی، نسبت های جایگزینی ۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ درصد وزنی سیمان با پودر ولاستونیت بررسی شد. ترکیب دقیق اجزای طرح اختلاط در جدول ۱ ارائه شده است.

در این پژوهش، سیستم الیافی کامپوزیت بر اساس مقادیر بهینه در مطالعات معتبر (شکل ۱) طراحی و مقدار کل الیاف ۲/۳ درصد حجمی تعیین شد. برای دستیابی به توازن مطلوب میان مقاومت و شکل پذیری، ترکیبی از الیاف فولادی میکرو و الیاف پلی وینیل الکل (PVA) به کار رفت. نسبت حجمی الیاف فولادی میکرو ۱/۸ درصد و الیاف PVA ۰/۵ درصد در نظر گرفته شد. الیاف فولادی دارای طول ۱۶ میلی متر و قطر ۰/۲۵ میلی متر هستند. مشخصات مکانیکی این الیاف شامل مقاومت کششی ۲۷۲۰ مگاپاسکال، مدول الاستیسیته ۲۱۰ گیگاپاسکال و چگالی ۷/۸۵ گرم بر سانتی متر مکعب است.

الیاف PVA به کاررفته دارای طول ۱۲ میلی‌متر، قطر ۰/۰۱۵ میلی‌متر، مقاومت کششی ۱۲۵۰ مگاپاسکال، مدول الاستیسیته ۳۳ گیگاپاسکال و چگالی ۱/۱۸ گرم بر سانتی‌متر مکعب هستند. همچنین، به منظور تقویت عملکرد خمشی ورقه‌های کامپوزیتی، از میلگردهای پلیمری مسلح به الیاف شیشه (GFRP) در ساخت نمونه‌ها استفاده شد. این میلگردها دارای مقاومت کششی ۸۰۰ مگاپاسکال، مدول الاستیسیته ۴۰ گیگاپاسکال و چگالی ۱/۸ گرم بر سانتی‌متر مکعب هستند. استفاده از این میلگردها نقش مؤثری در افزایش سختی خمشی و کنترل گسیختگی ترد ورقه‌های کامپوزیتی دارد. تصاویر الیاف در شکل ۲ ارائه شده‌اند.



شکل ۱: درصد اجزای HPFRCC بر اساس مطالعات پیشین و میانگین مقادیر گزارش شده.

Figure 1: Proportions of HPFRCC constituents based on previous studies and the average of reported values.

جدول ۱: طرح اختلاط (درصد).

Table 1: Mix proportions (%).

نام ترکیب	سیمان پرتلند	ولاستونیت	دزدود سیلیس	پودر کوارتز	ماسه	آب	ابر روان کننده
W0	۱	۰	۰/۲۲	۰/۰۴	۰/۸۷	۰/۱۸	۰/۰۳
W5	۰/۹۵	۰/۰۵	۰/۲۲	۰/۰۴	۰/۸۷	۰/۱۸	۰/۰۳
W10	۰/۹	۰/۱۰	۰/۲۲	۰/۰۴	۰/۸۷	۰/۱۸	۰/۰۳
W15	۰/۸۵	۰/۱۵	۰/۲۲	۰/۰۴	۰/۸۷	۰/۱۸	۰/۰۳
W20	۰/۸	۰/۲۰	۰/۲۲	۰/۰۴	۰/۸۷	۰/۱۸	۰/۰۳

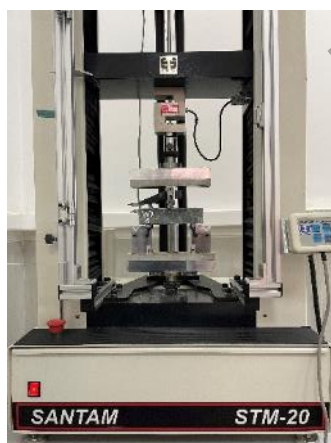
۲-۱-۲- روش انجام آزمایش

برای ارزیابی رفتار کششی HPFRCC، آزمایش کشش مستقیم بر روی نمونه‌های دمبلی شکل انجام شد. ساخت نمونه‌ها و روش اجرای آزمایش مطابق با دستورالعمل پیشنهادی انجمن مهندسين عمران ژاپن (JSCE 2008) انجام گرفت [۲۲]. به منظور اعمال یکنواخت بار کششی، فک‌های فولادی متناسب با هندسه نمونه‌ها طراحی و ساخته شد. آزمایش‌ها با استفاده از دستگاه یونیورسال سرووالکتریکال با ظرفیت ۲۰ کیلونیوتن انجام گردید (شکل ۳). نرخ جابجایی اعمال شده برابر با ۰/۵ میلی‌متر بر دقیقه در نظر گرفته شد. برای اندازه‌گیری دقیق تغییر طول در ناحیه مؤثر، یک اکستنسومتر با طول گیج ۸۰ میلی‌متر در بخش میانی نمونه نصب گردید.

برای بررسی رفتار خمشی، که به عنوان شکلی از آزمون کشش غیرمستقیم نیز شناخته می‌شود [۲۳]. آزمایش خمش بر روی نمونه‌هایی با سه مجموعه ابعاد مختلف شامل ۵۰۰×۱۲۵×۲۵ و ۱۵۰×۱۵۰×۲۵ میلی‌متر انجام شد. آزمایش خمش چهارنقطه‌ای برای نمونه‌های با ابعاد ۵۰۰×۱۲۵×۲۵ میلی‌متر مطابق با مراجع [۲۴، ۲۵] اجرا گردید. در این آزمایش، فاصله دهانه برابر با ۳۰۰ میلی‌متر

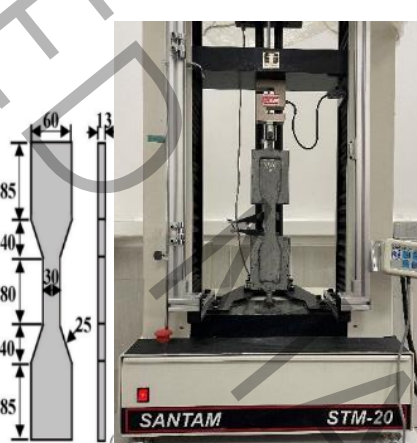
در نظر گرفته شد و دهانه به سه بخش مساوی تقسیم گردید. برای تأمین شرایط تکیه‌گاهی صلب، از یک ورق فولادی با ضخامت ۲۰ میلی‌متر به‌عنوان بستر استفاده شد. جابجایی در وسط دهانه با استفاده از یک مبدل جابجایی خطی (LVDT) اندازه‌گیری شد و بارگذاری با نرخ ۰/۵ میلی‌متر بر دقیقه و مطابق با مطالعات پیشین [۱۵، ۲۴، ۲۶، ۲۷] اعمال گردید.

برای بررسی عملکرد ترکیبی HPFRCC به همراه میلگردهای پلیمری تقویت‌شده با الیاف شیشه (GFRP)، آزمایش خمش چهارنقطه‌ای بر روی ورقه‌های پیش‌ساخته در مقیاس واقعی با ابعاد $1500 \times 150 \times 25$ میلی‌متر انجام شد. در این مرحله، فاصله بین تکیه‌گاه‌ها برابر با ۱۳۰۰ میلی‌متر در نظر گرفته شد. اندازه‌گیری نیرو و جابجایی به‌ترتیب با استفاده از نیروسنج و یک LVDT نصب شده در مرکز دهانه صورت گرفت. اعمال بار توسط جک پنوماتیکی با کنترل بار انجام شد؛ در نتیجه امکان کنترل مستقیم نرخ جابجایی وجود نداشت و بارگذاری با نرخ ثابت ۰/۲۵ نیوتن بر ثانیه اعمال گردید. آرایش تجهیزات و نحوه بارگذاری آزمایش‌های خمش در شکل‌های ۴ تا ۶ ارائه شده است. در نهایت، به‌منظور تعیین مقاومت فشاری کامپوزیت HPFRCC، پنج نمونه مکعبی با ابعاد $100 \times 100 \times 100$ میلی‌متر ساخته و آزمایش شدند. این آزمایش مطابق با دستورالعمل انجمن مهندسين عمران ژاپن (JSCE) [۲۲] و استاندارد BSI BS EN 12390 [۲۸] انجام گرفت. آزمایش فشاری با استفاده از دستگاه بتن‌شکن با ظرفیت ۲۰۰۰ کیلونیوتن اجرا شد که به یک LVDT برای ثبت جابجایی مجهز بود.



شکل ۴: تجهیزات آزمایش و ابعاد نمونه خمشی $160 \times 40 \times 40$ (میلی‌متر).

Figure 4: Test setup and dimensions of the $160 \times 40 \times 40$ mm flexural specimen.



شکل ۳: تجهیزات آزمایش و ابعاد نمونه کششی دمبلی شکل (میلی‌متر).

Figure 3: Test setup and dimensions of the dumbbell-shaped tensile specimen (mm).



شکل ۲: شکل ظاهری الیاف پلی‌وینیل‌الکل و میکرو فولادی.

Figure 2: Appearance of polyvinyl alcohol and micro-steel fibers.



شکل ۶: تجهیزات و نحوه بارگذاری خمشی نمونه $1500 \times 150 \times 25$ میلی‌متر.

Figure 6: Test setup and flexural loading configuration of the $1500 \times 150 \times 25$ mm specimen.



شکل ۵: تجهیزات و نحوه بارگذاری خمشی نمونه $25 \times 125 \times 500$ میلی‌متر.

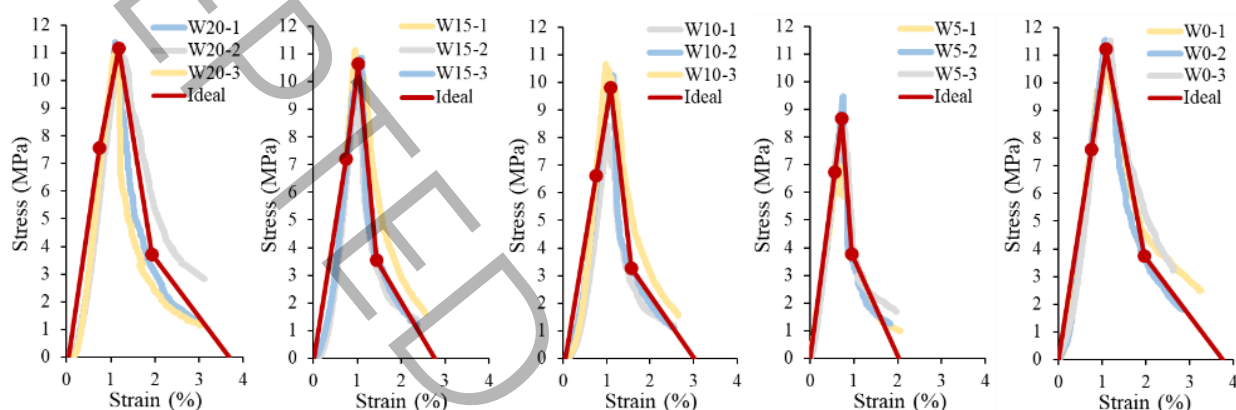
Figure 5: Test setup and flexural loading configuration of the $25 \times 125 \times 500$ mm specimen.

the 25 × 150 × 1500 mm specimen.

specimen.

۳-۱-۲- بررسی نتایج

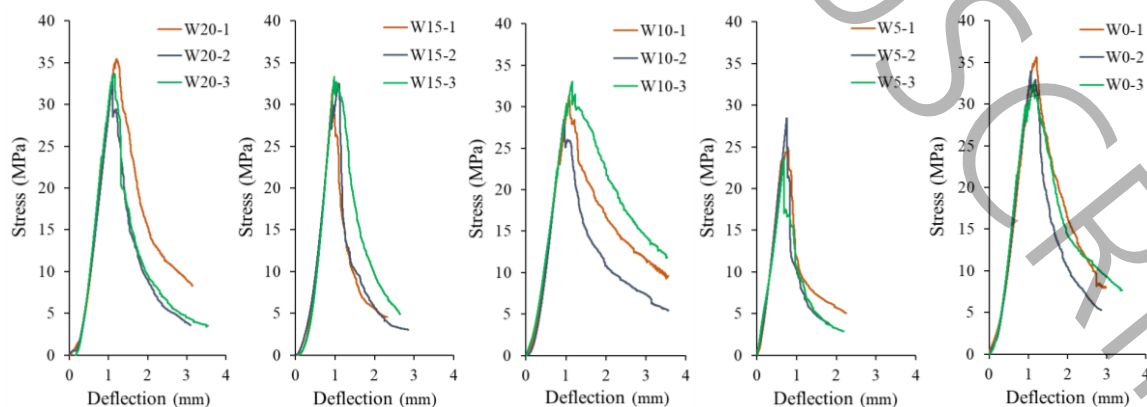
مطابق مراجع [۲۹-۳۳] سه نمونه دمبلی شکل از هر طرح اختلاط تحت آزمون کشش مستقیم قرار گرفتند. منحنی های تنش- کرنش به دست آمده از آزمایش ها در کنار منحنی ایده آل هر نمونه در شکل ۷ نشان داده شده است. تعیین منحنی ایده آل رفتار کششی از اهمیت ویژه ای در مدل سازی عددی ورقه های کامپوزیت سیمانی برخوردار است. نتایج بیانگر آن است که طرح اختلاط فاقد ولاستونیت (W0) و طرح اختلاط حاوی ۲۰ درصد ولاستونیت (W20) عملکردی بسیار نزدیک به یکدیگر دارند؛ با این حال، در محدوده جایگزینی ۵ تا ۱۵ درصد ولاستونیت کاهش مقاومت کششی نمونه ها مشاهده می شود.



شکل ۷: نمودار تنش-کرنش آزمون های دمبلی شکل تحت کشش مستقیم به همراه منحنی ایده آل برای پنج ترکیب.

Figure 7: Stress-strain curves of the dumbbell-shaped specimens under direct tension, together with the idealized curve, for the five mixtures.

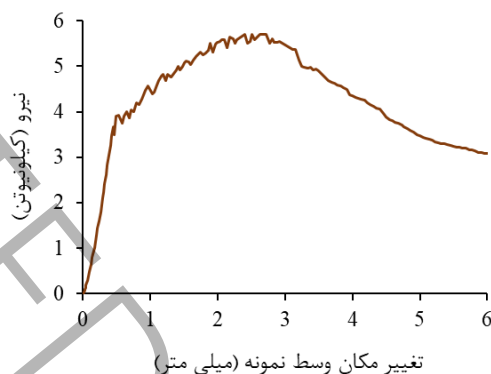
بر اساس مطالعات پیشین [۳۴-۳۸] برای هر طرح اختلاط سه نمونه تهیه و آزمایش شد. شکل ۸ نیز نمودار تنش- تغییرمکان حاصل از آزمون خمش چهار نقطه ای نمونه ای با ابعاد ۱۶۰×۴۰×۴۰ میلی متر را نشان می دهد. همان گونه که مشاهده می شود، رفتار مکانیکی نمونه ها در آزمون خمش چهار نقطه ای با نتایج حاصل از آزمون کشش مستقیم هم خوانی مناسبی دارد. همچنین، تطابق قابل توجه بین نتایج نمونه های W20 و W0 نشان می دهد که جایگزینی ۲۰ درصد ولاستونیت به جای سیمان، مناسب ترین ترکیب را برای دستیابی به عملکرد مکانیکی مطلوب فراهم می کند.



شکل ۸: نمودار تنش-تغییرمکان آزمون های منشوری ۱۶۰×۴۰×۴۰ میلی متر تحت خمش برای درصد های مختلف جایگزینی ولاستونیت.

Figure 8: Stress-displacement curves of the 160 × 40 × 40 mm prismatic specimens under flexure for different wollastonite replacement ratios.

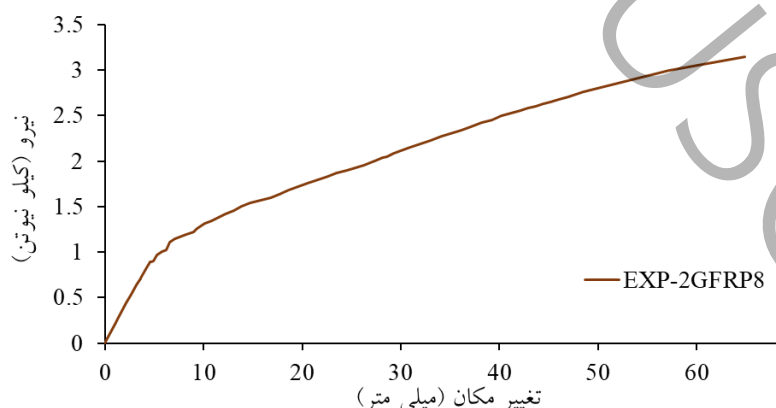
بررسی نتایج حاصل از آزمون کشش مستقیم نمونه‌های دمبلی‌شکل و نیز آزمون خمش نمونه‌های منشوری با ابعاد ۴۰×۴۰×۱۶۰ میلی‌متر نشان می‌دهد که بهترین عملکرد مکانیکی مربوط به جایگزینی ۲۰ درصد ولاستونیت است. بر این اساس، در ادامه پژوهش تنها ترکیب W20 مورد ارزیابی قرار گرفت. نمودار نیرو-تغییر مکان حاصل از آزمون خمش چهار نقطه‌ای نمونه W20 با ابعاد ۵۰×۱۲۵×۲۵ میلی‌متر در شکل ۹ ارائه شده است. همچنین، مقدار بیشینه نیروی تحمل‌شده تحت بارگذاری یکنواخت برابر با ۴۲/۵ کیلونیوتن به دست آمد.



شکل ۹: نمودار نیرو-تغییر مکان آزمایش خمش.

Figure 9: Load-displacement curve from the flexural test.

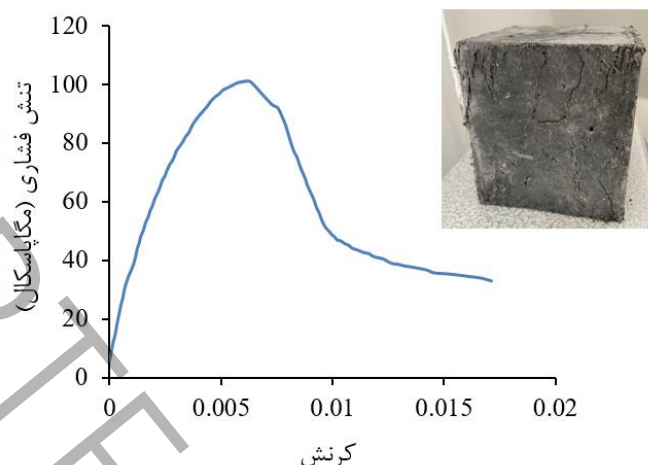
در ادامه، ورقه‌ای با ابعاد واقعی و با استفاده از طرح اختلاط W20 با طول ۱۵۰۰ میلی‌متر، عرض ۱۵۰ میلی‌متر و ضخامت ۲۵ میلی‌متر ساخته شد و با دو میلگرد GFRP به قطر ۸ میلی‌متر مسلح گردید. میلگردها در فاصله ۶ میلی‌متری از کف قالب و با فاصله ۴۵ میلی‌متر از یکدیگر در مرکز مقطع قرار داده شدند. رفتار ورقه تا زمان ایجاد اولین ترک به صورت خطی مشاهده شد. نمودار نیرو-تغییر مکان نمونه مسلح به دو میلگرد GFRP در شکل ۱۰ ارائه شده است. نتایج نشان می‌دهد که نمونه از ظرفیت تغییر شکل قابل توجهی برخوردار است؛ با این حال، به دلیل محدودیت طول دستگاه LVDT امکان ثبت و بررسی تغییر مکان‌های بزرگ‌تر فراهم نبوده است. هدف از انجام این آزمایش، تعیین ویژگی‌های رفتاری ورقه در ابعاد واقعی و بررسی اثر مقیاس، پیش از به‌کارگیری آن به‌عنوان عضو تقویت‌کننده است [۵].



شکل ۱۰: نمودار نیرو-تغییر مکان نمونه مسلح به دو عدد GFRP با قطر ۸ میلی‌متر و ابعاد ۱۵۰۰×۱۵۰×۲۵ میلی‌متر.

Figure 10: Load-displacement curve of the specimen reinforced with two 8 mm diameter GFRP bars and dimensions of 25 × 150 × 1500 mm.

میانگین مقاومت فشاری پنج نمونه مکعبی با ابعاد ۱۰۰ میلی‌متر برای طرح اختلاط W20، برابر با ۱۰۱ مگاپاسکال به‌دست آمد. در شکل ۱۱، منحنی‌های تنش-کرنش حاصل از این پنج آزمون فشاری به‌همراه منحنی ایده‌آل متناظر ارائه شده است. همچنین، مدول الاستیسیته از طریق آزمایش فشاری روی نمونه‌های منشوری تعیین شد که مقدار آن ۳۸/۹۱ گیگاپاسکال گزارش گردید.



شکل ۱۱: منحنی ایده‌آل تنش-کرنش فشاری به همراه شکل ظاهری یک آزمون.

Figure 11: Idealized compressive stress-strain curve and appearance of a specimen.

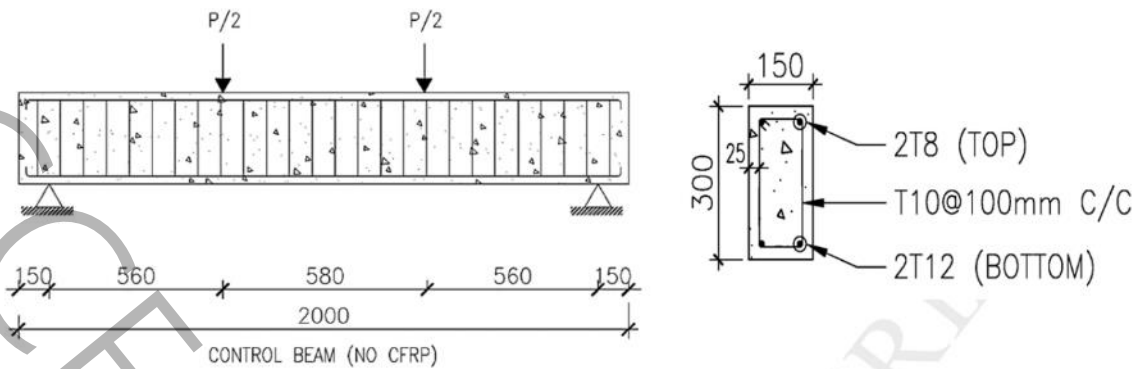
عملکرد مکانیکی HPFRCC مورد مطالعه، نتیجه یک تعامل هم افزای ماتریس بهینه‌شده شامل سیمان، دژدود سیلیسی و پودر کوارتز است. در حالی که تراکم بالای ماتریس که با ناشی از فعالیت پوزولانی دژدود سیلیسی و اثر پرکنندگی پودر کوارتز است، مقاومت پایه را تأمین می‌کند، افزودن ولاستونیت مکانیسم‌های سخت‌شوندگی مضاعفی را ایجاد می‌نماید. ولاستونیت به دلیل ساختار سوزنی خود، به‌عنوان یک ریز تقویت‌کننده عمل کرده و به پل زنی ریز ترک‌ها کمک می‌کند [۳۹-۴۲]. این پدیده در کنار بهبود ساختار حفرات، منجر به انتقال بهتر تنش و شکل‌پذیری بیشتر نسبت به نمونه شاهد می‌شود. بنابراین، ولاستونیت به‌عنوان یک افزودنی راهبردی عمل می‌کند که ضمن بهبود عملکرد کلی سیستم، ویژگی‌های ذاتی ماتریس سیمانی را تکمیل می‌نماید [۴۰، ۴۱].

۲-۲- مطالعه عددی

مطالعه عددی و تحلیل پارامتریک در این تحقیق با استفاده از نرم‌افزار المان محدود ABAQUS انجام شد. در گام نخست، تیر بتن مسلح حاصل از مطالعه آزمایشگاهی مرجع [۴۳] مدل‌سازی شده و صحت‌سنجی نتایج عددی با داده‌های آزمایشگاهی صورت گرفت. در مرحله بعد، ورقه‌های کامپوزیت سیمانی مورد نظر، شبیه‌سازی شده و پس از مقایسه با نتایج آزمایشگاهی، اعتبارسنجی شدند. در ادامه، رفتار تیر بتن مسلح تقویت‌شده با ورقه‌های HPFRCC در قالب یک مطالعه پارامتریک بررسی گردید. در این بخش، تأثیر پارامترهای شامل ضخامت ورقه تقویتی، تعداد و همچنین قطر میلگردهای GFRP بر عملکرد سازه‌ای تیر تحلیل شده است.

۲-۲-۱- صحت‌سنجی تیر بتن مسلح

در این بخش، مدل عددی تیر بتن مسلح ارائه‌شده در مرجع [۴۳]، به‌منظور صحت‌سنجی شبیه‌سازی توسعه یافت. مشخصات هندسی تیر و شرایط انجام آزمون خمش چهارنقطه‌ای تحت بارگذاری یکنواخت در شکل ۱۲ نشان داده شده است. مقاومت فشاری بتن به‌کاررفته در این تیر، ۴۷/۲ مگاپاسکال گزارش شده است. همچنین، تنش تسلیم و تنش نهایی فولاد کششی به‌ترتیب ۵۵۱/۵ و ۶۴۰/۲ مگاپاسکال است. به‌منظور بررسی دقت مدل عددی، تحلیل حساسیت نسبت به اندازه مش انجام شد که نتایج آن در جدول ۲ ارائه شده است. بررسی نتایج نشان داد که اندازه مش ۲۵ میلی‌متر، بهترین انطباق را بین نیروی بیشینه حاصل از تحلیل عددی و داده‌های آزمایشگاهی فراهم می‌کند.



شکل ۱۲: مقطع عرضی و جزئیات آرماتورگذاری تیر مرجع [۴۳].

Figure 12: Cross-section and reinforcement details of the reference beam [43].

در شبیه‌سازی عددی نمونه آزمایشگاهی، از المان‌های سه‌بعدی سالیید هشت‌گرمی با انتگرال‌گیری کاهشی (C3D8R) استفاده شد که هر المان دارای ۲۴ درجه آزادی است. میلگردهای فولادی نیز به کمک المان‌های خربایی سه‌بعدی دوگرمی مدل‌سازی شدند. تحلیل مدل با بهره‌گیری از حل‌گر استاتیکی عمومی، با در نظر گرفتن اثرات تغییرشکل‌های بزرگ و بر اساس الگوریتم تکراری نیوتن-رافسون انجام گرفت. رفتار تنش-کرنش بتن مطابق با روابط استاندارد یوروکد ۲ تعریف شد. به‌منظور شبیه‌سازی رفتار غیرخطی و فرآیند خرابی بتن، از مدل آسیب پلاستیسیته بتن (CDP) استفاده شد که پارامترهای آن بر اساس مطالعات پیشین [۴۴-۴۶] تعیین و در جدول ۳ ارائه شده‌اند.

جدول ۲: نتایج تحلیل حساسیت اندازه‌مش برای تیر بتن مسلح.

Table 2: Sensitivity analysis results of mesh size for the reinforced concrete beam.

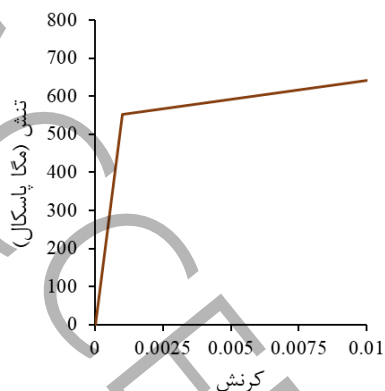
نام ترکیب	اندازه‌مش (سانتی‌متر)	خطا (%) برای نیروی بیشینه نسبت مدل ۳
۱	۱۰	۱۴/۱۰
۲	۵	۵/۱۲
۳	۲/۵	۰
۴	۱/۲۵	۰/۱۴
۵	۱	۰/۱۱

جدول ۳: پارامترهای مدل خرابی پلاستیک بتن.

Table 3: Parameters of the concrete damage plasticity model.

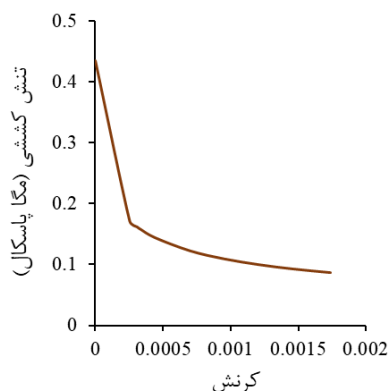
viscosity	Shape factor (Kc)	Stress ratio (σ_0/σ_c)	Eccentricity (e)	Dilation angle (ψ) (degree)
۰/۰۰۱	۰/۶۶۷	۱/۱۶	۰/۱	۳۰

مطابق شکل ۱۳، برای رفتار غیر خطی فشاری بتن از رابطه اصلاح شده پوپوویچ بر اساس مرجع [۴۷] و برای رفتار کششی آن از رابطه بلاریبی و اچ سو بر اساس مرجع [۴۸] استفاده شد که نمودارهای مربوط به آن‌ها در شکل ۱۴ ارائه شده است. همچنین، نمودار تنش-کرنش میلگرد فولادی در شکل ۱۵ آمده است.



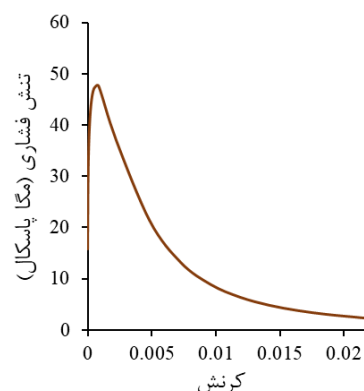
شکل ۱۵: نمودار تنش-کرنش میلگرد فولادی.

Figure 15: Stress-strain curve of the steel reinforcing bar.



شکل ۱۴: نمودار تنش-کرنش کششی بتن.

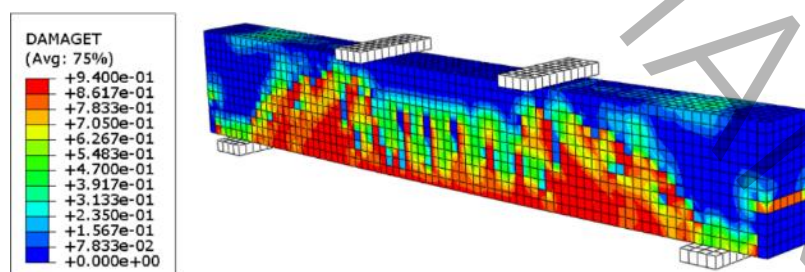
Figure 14: Tensile stress-strain curve of concrete.



شکل ۱۳: نمودار تنش-کرنش فشاری بتن.

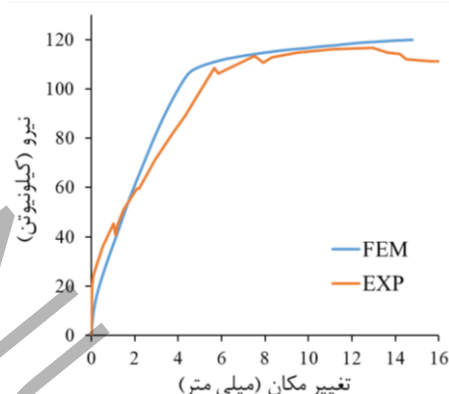
Figure 13: Compressive stress-strain curve of concrete.

در شکل ۱۶، نتایج حاصل از مدل عددی و نتایج آزمایشگاهی تیر بتن مسلح مقایسه شده است. نیروی بیشینه برای نمونه آزمایشگاهی برابر ۱۱۶/۸ کیلونیوتن و برای مدل عددی برابر ۱۲۰/۰۵ کیلونیوتن به دست آمد. اختلاف ناچیز ۲/۸ درصدی میان این دو مقدار، حاکی از تطابق مناسب نتایج مدل سازی عددی با نتایج آزمایشگاهی است. همچنین شکل ۱۷، توزیع خسارت کششی تیر بتن مسلح را در لحظه تسلیم میلگردهای طولی تحتانی نمایش می دهد.



شکل ۱۷: خسارت کششی بتن.

Figure 17: Tensile damage in concrete.



شکل ۱۶: مقایسه نمودارهای نیرو-تغییر مکان.

Figure 16: Comparison of the load-displacement curves.

۲-۲-۱- صحت سنجی ورقه HPFRCC

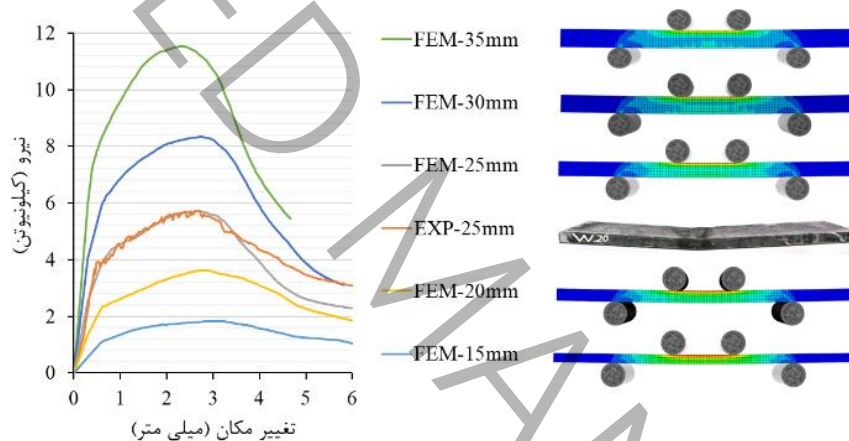
رفتار غیرخطی کامپوزیت HPFRCC حاصل از نتایج آزمایشگاهی بخش نخست این تحقیق، در شکل های ۷ و ۱۱ ارائه شده و در مدل سازی عددی ورقه های تقویت کننده تیرهای بتن مسلح به کار رفته است. با توجه به رفتار الاستیک-خطی میلگردهای GFRP، تعریف مدول الاستیسیته برای مدل سازی آن ها کفایت می کند؛ بر این اساس، مدول الاستیسیته میلگردهای GFRP طبق نتایج آزمون کشش مستقیم، ۴۵ گیگاپاسکال لحاظ شد. همچنین، پارامترهای مدل آسیب پلاستیسیته برای شبیه سازی رفتار غیرخطی کامپوزیت سیمانی الیافی توانمند، مطابق با مطالعات پیشین [۳۳، ۱۱] استخراج و مقادیر آن ها در جدول ۴ درج شده است.

جدول ۴: پارامترهای مدل خرابی پلاستیک HPFRCC.

Table 4: Parameters of the HPFRCC plastic damage model.

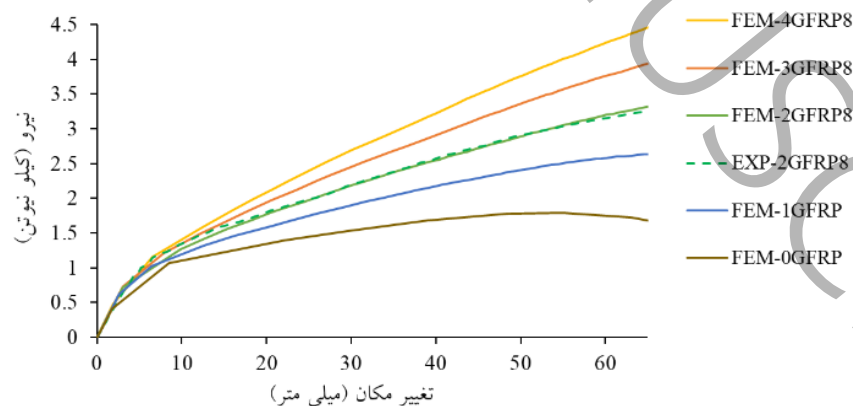
viscosity	Shape factor (Kc)	Stress ratio (σ_b/σ_c)	Eccentricity (e)	Dilation angle (ψ) (degree)
۰/۰۰۰۵	۰/۶۶	۱/۱	۰/۱	۵۵

در این بخش از مطالعه، عملکرد ترکیب W20 برای ساخت ورقه‌های تقویتی بررسی شد. نمودار نیرو-تغییر مکان حاصل از مدل‌سازی عددی در نرم‌افزار ABAQUS در کنار نتایج آزمایش خمش چهار نقطه‌ای نمونه W20 (با ابعاد $125 \times 25 \times 500$ میلی‌متر) در شکل ۱۸ ارائه شده است. نیروی بیشینه به دست آمده از آزمایش و مدل‌سازی عددی، به ترتیب $42/5$ و $39/5$ کیلونیوتن گزارش شد. همچنین، تأثیر ضخامت ورقه‌های کامپوزیتی با طول ۵۰۰ میلی‌متر در بازه ۱۵ تا ۳۵ میلی‌متر (با گام‌های ۵ میلی‌متری) در شکل ۱۸ بررسی شده است. در ادامه، شکل ۱۹ نمودار نیرو-تغییر مکان ورقه‌های تقویتی با طول ۱۵۰۰ میلی‌متر و ضخامت ۲۵ میلی‌متر (مسلح به دو عدد میلگرد GFRP) را در مقایسه با نتایج مدل‌سازی عددی نشان می‌دهد؛ ضمن آنکه مدل‌سازی عددی برای حالت‌های تکمیلی نیز توسعه یافته و نتایج آن در شکل ۱۹ درج شده است.



شکل ۱۸: نمودار نیرو-تغییر مکان آزمایش خمش ورقه ۵۰۰ میلی‌متری به همراه مدل‌سازی عددی.

Figure 18: Load-displacement curve of the 500 mm sheet bending test along with the numerical simulation.



شکل ۱۹: نمودار نیرو-تغییر مکان ورقه با ابعاد $1500 \times 150 \times 25$ میلی‌متر مسلح به میلگردهای GFRP با قطر ۸ میلی‌متر.

Figure 19: Load-displacement curve of the $25 \times 150 \times 1500$ mm sheet reinforced with 8 mm diameter GFRP bars.

۳-۲- مدل سازی عددی تیرهای تقویت شده

در ادامه، تحلیل عددی تیرهای بتنی تقویت شده ارائه شده است. مطابق جدول ۵، مشخصات میلگردهای پلیمری و ضخامت ورقه تقویتی به عنوان متغیرهای اصلی در نظر گرفته شدند تا رفتار تیرها در شرایط مختلف ارزیابی شود. نمونه های تقویت شده با شناسه های S1 تا S9 نام گذاری شده اند که در ادامه به عنوان شناسه اختصاری نمونه ها به کار می روند. جزئیات مدل سازی عددی این تیرها در شکل ۲۰ مشهود است. شایان ذکر است که اتصال میان ورقه تقویتی و تیر بتنی با استفاده از قید Tie در نرم افزار ABAQUS مدل سازی گردید.

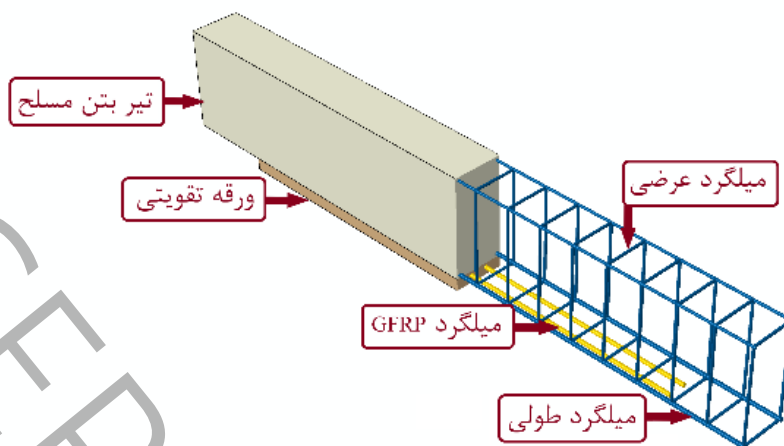
با توجه به اینکه در سیستم تقویتی مورد استفاده در این پژوهش، اتصال ورقه HPFRCC به تیر بتنی از طریق چسب اپوکسی به همراه مهار مکانیکی توسط رول بولت ها تأمین شده است و مطابق گزارش های آزمایشگاهی موجود در منابع پیشین [۱۱، ۳۳]، جداسازی یا لغزش سطحی به عنوان مود گسیختگی مشاهده نشده است، فرض اتصال کامل در مدل سازی عددی به عنوان یک ساده سازی متعارف و مبتنی بر شواهد تجربی در نظر گرفته شد.

به منظور مقایسه دقیق تیرهای تقویت شده با تیر مرجع (OB)، تمامی نمونه ها تا رسیدن به بیشینه تغییر مکان ثبت شده در تیر آزمایشگاهی بارگذاری شده اند. متغیرهای در نظر گرفته شده در تحلیل عددی تیرهای بتن مسلح، شامل ضخامت ورقه تقویتی و همچنین تعداد و قطر میلگردهای GFRP تعبیه شده در ورقه تقویتی است. ضمن آنکه ابعاد و سایر مشخصات هندسی تیر در تمامی مدل ها ثابت فرض شد. بررسی عملکرد تیرها با ضخامت های مختلف ورقه تقویتی، با در نظر گرفتن امکان جانمایی مناسب میلگرد، از اهداف این پژوهش است. با این حال، ضخامت های کمتر از ۲۰ میلی متر امکان تأمین پوشش مناسب را برای میلگردهای GFRP با قطر ۱۰ و ۱۲ میلی متر فراهم نمی کنند. از سوی دیگر، در مطالعات پیشین [۵، ۱۵، ۴۹-۵۵]، ساخت ورقه هایی با ضخامت بیش از ۵۰ میلی متر گزارش نشده است. بر این اساس، در پژوهش حاضر از ورقه های تقویتی با ضخامت های ۲۵، ۳۵ و ۴۵ میلی متر برای تقویت بخش زیرین تیرهای بتنی استفاده شده است.

جدول ۵: نام گذاری تیرها به همراه مشخصات ورقه های تقویتی.

Table 5: Designation of the beams along with the specifications of the strengthening sheets.

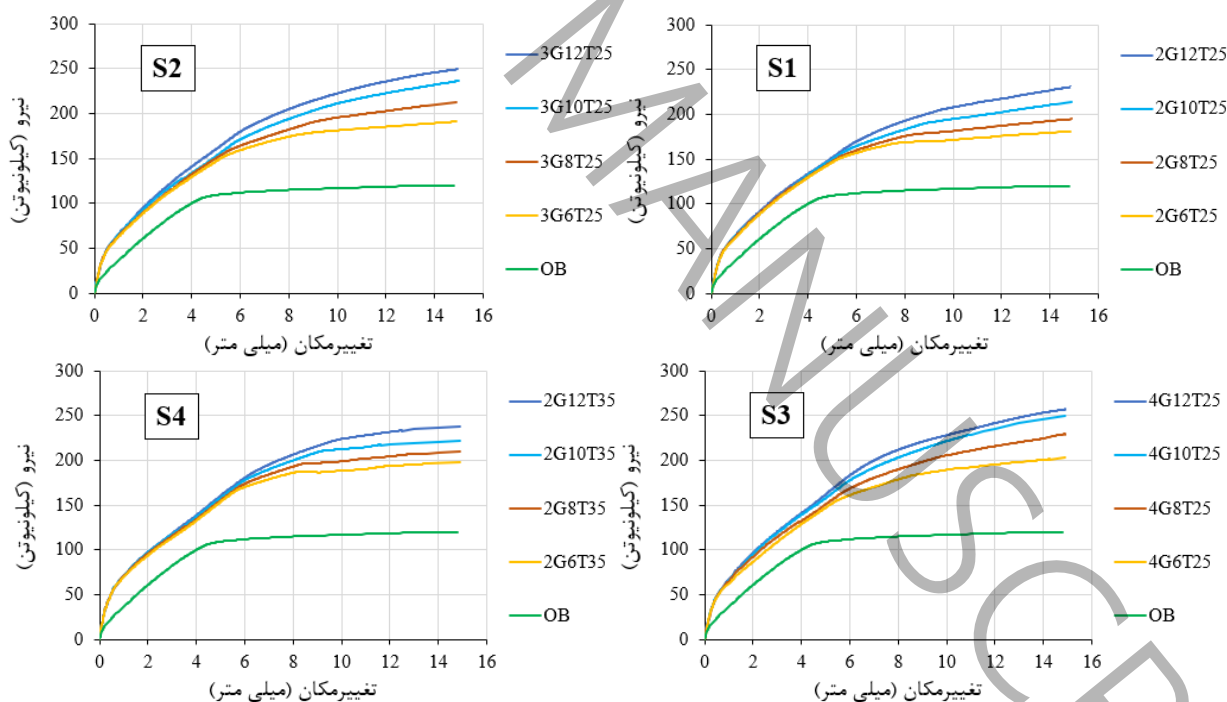
شناسه	نام اختصاری تیرها	تعداد میلگرد پلیمری ورقه زیرین	میلگرد پلیمری ورقه تقویتی	ضخامت ورقه تقویتی (میلی متر)
OB	OB	-	-	-
S1	2G6T25- 2G8T25- 2G10T25- 2G12T25	۲	Ø۶- Ø۸- Ø۱۰- Ø۱۲	۲۵
S2	3G6T25- 3G8T25- 3G10T25- 3G12T25	۳	Ø۶- Ø۸- Ø۱۰- Ø۱۲	۲۵
S3	4G6T25- 4G8T25- 4G10T25- 4G12T25	۴	Ø۶- Ø۸- Ø۱۰- Ø۱۲	۲۵
S4	2G6T35- 2G8T35- 2G10T35- 2G12T35	۲	Ø۶- Ø۸- Ø۱۰- Ø۱۲	۳۵
S5	3G6T35- 3G8T35- 3G10T35- 3G12T35	۳	Ø۶- Ø۸- Ø۱۰- Ø۱۲	۳۵
S6	4G6T35- 4G8T35- 4G10T35- 4G12T35	۴	Ø۶- Ø۸- Ø۱۰- Ø۱۲	۳۵
S7	2G6T45- 2G8T45- 2G10T45- 2G12T45	۲	Ø۶- Ø۸- Ø۱۰- Ø۱۲	۴۵
S8	3G6T45- 3G8T45- 3G10T45- 3G12T45	۳	Ø۶- Ø۸- Ø۱۰- Ø۱۲	۴۵
S9	4G6T45- 4G8T45- 4G10T45- 4G12T45	۴	Ø۶- Ø۸- Ø۱۰- Ø۱۲	۴۵

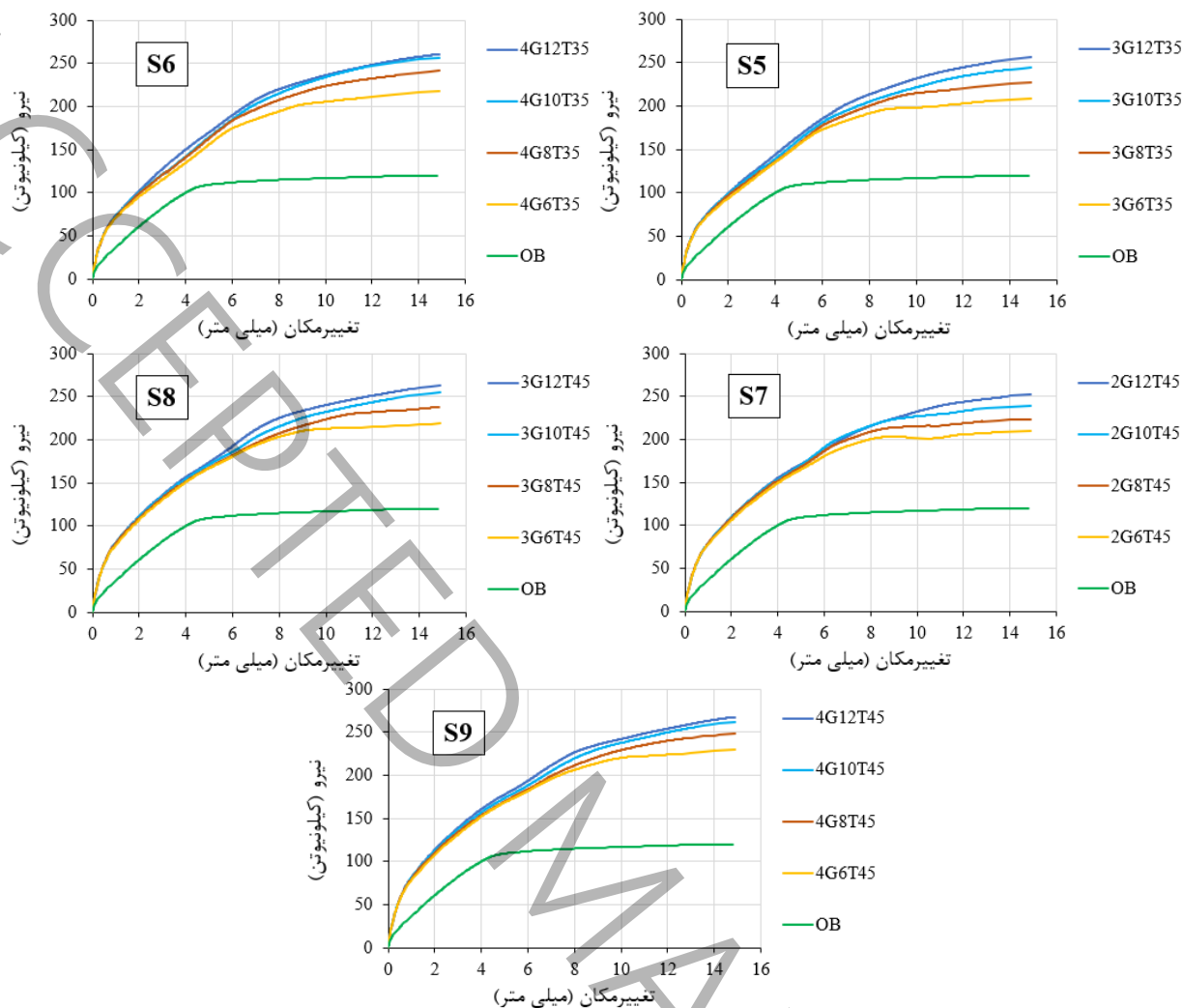


شکل ۲۰: جزئیات مدل عددی تیرهای تقویت شده.

Figure 20: Details of the numerical model of the strengthened beams.

پس از تکمیل تحلیل‌های عددی، نمودارهای نیرو-تغییرمکان در شکل ۲۱ ارائه شده است؛ همچنین برای مقایسه بهتر، نتایج تیر بدون تقویت (OB) نیز در همین شکل نمایش یافته است. در نام‌گذاری نمونه‌های تقویت‌شده، عدد پیش از حرف G نشان‌دهنده تعداد میلگردهای GFRP، عدد پس از آن بیانگر قطر این میلگردها و عدد درج‌شده پس از حرف T معرف ضخامت ورقه HPFRCC است. مقادیر نیروی بیشینه تیرهای مدل‌سازی‌شده نیز در جدول ۶ گردآوری شده است.





شکل ۲۱: نمودارهای نیرو-تغییر مکان برای تیرهای S1 تا S9.

Figure 21: Load-displacement curves for beams S1 to S9.

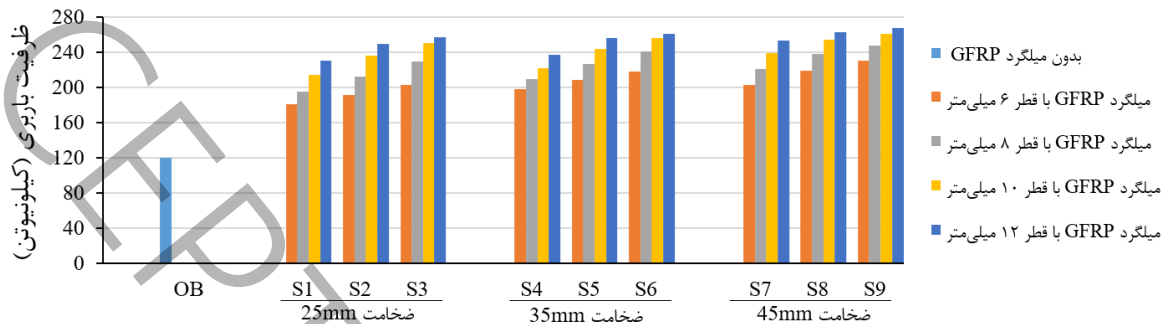
در این بخش، عملکرد تیرهای بتن آرمه تقویت شده با ورقه های HPFRCC مسلح به میلگردهای GFRP بر پایه دو شاخص «ظرفیت باربری» و «ظرفیت جذب انرژی» ارزیابی شده است. ظرفیت باربری که به عنوان نیروی بیشینه قابل تحمل تعریف می شود، از پارامترهای کلیدی در تحلیل رفتار خمشی است. همچنین، ظرفیت جذب انرژی به منزله یکی از معیارهای مهم در رفتار سازه های بتن آرمه، از محاسبه سطح زیر نمودار نیرو-تغییر مکان به دست می آید. در پژوهش حاضر، این پارامتر تا نقطه نیروی بیشینه تعیین شده است که بیانگر پتانسیل جذب انرژی توسط عضو پیش از وقوع گسیختگی است. افزایش این شاخص، نشان دهنده توانمندی بیشتر تیر در جذب انرژی و در نتیجه بهبود عملکرد سازه ای تحت بارگذاری است.

جدول ۶: نیروی بیشینه هر تیر (کیلو نیوتن).

Table 6: Peak load of each beam (kN).

S9	S8	S7	S6	S5	S4	S3	S2	S1	OB	نامگذاری تیرها
-	-	-	-	-	-	-	-	-	120.05	بدون میلگرد GFRP (تیر مرجع)
229.88	218.46	203	217.83	208.11	198.01	203.01	191.13	180.78	-	میلگرد GFRP با قطر ۶ میلی متر
247.63	237.81	221.11	240.98	226.55	209.52	229.37	212.01	194.60	-	میلگرد GFRP با قطر ۸ میلی متر
261.01	254.32	239.15	255.85	243.86	221.95	250.02	236.21	213.80	-	میلگرد GFRP با قطر ۱۰ میلی متر

267.41	262.85	252.68	260.57	255.98	237	256.91	249.28	230.38	-	میلی متر
میلگرد با قطر ۱۲										میلی متر



شناسه تیرها با تفکیک بر اساس ضخامت ورقه تقویتی

شکل ۲۲: ظرفیت باربری بر حسب نام اختصاری تیرها.

Figure 22: Load-carrying capacity versus beam designation.

نتایج ظرفیت باربری تیرهای تقویت شده در جدول ۶ ارائه شده است. ظرفیت باربری تیر مرجع (OB) برابر با ۱۲۰/۰۵ کیلونیوتن به دست آمد؛ در حالی که استفاده از ورقه های HPFRCC مسلح به میلگردهای GFRP، منجر به افزایش چشمگیر این ظرفیت شده است. برای میلگردهای GFRP با قطر ۶ میلی متر، ظرفیت باربری در بازه ۱۸۰/۷۸ تا ۲۲۹/۸۸ کیلونیوتن قرار دارد. با افزایش قطر میلگردهای GFRP به ۸ میلی متر، این محدوده به ۱۹۴/۶۰ تا ۲۴۷/۶۳ کیلونیوتن ارتقا یافته است. این روند صعودی در نمونه های دارای میلگردهای با قطر ۱۰ و ۱۲ میلی متر نیز تکرار شده، به طوری که ظرفیت باربری آن ها به ترتیب در بازه های ۲۱۳/۸۰ تا ۲۶۱/۰۱ کیلونیوتن و ۲۳۰/۳۸ تا ۲۶۷/۴۱ کیلونیوتن گزارش شده است. اگرچه افزایش ظرفیت باربری با به کارگیری آرماتورهای تقویتی از نظر تئوری مورد انتظار است، نتایج این پژوهش امکان ارزیابی کمی تأثیر قطر میلگردهای GFRP را فراهم می سازد. مقایسه داده ها نشان می دهد که با افزایش قطر میلگردها، ظرفیت باربری به طور محسوسی ارتقا یافته و کارایی سیستم تقویتی بهبود می یابد؛ موضوعی که گویای نقش مؤثر پارامترهای طراحی در ارتقای عملکرد سازه های تیرهای بتن آرمه است.

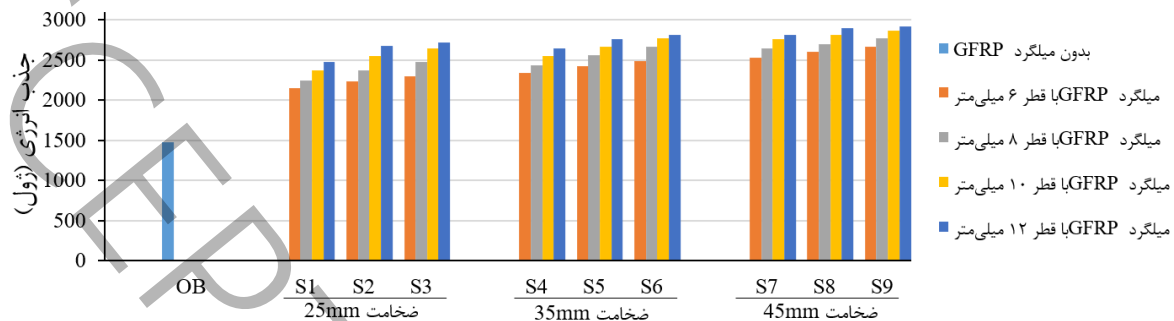
نتایج ظرفیت جذب انرژی در جدول ۷ ارائه شده است. انرژی جذب شده برای تیر مرجع (OB) ۱۴۷۹/۳۵ ژول محاسبه شد. به کارگیری ورقه های تقویتی HPFRCC مسلح به میلگردهای GFRP، منجر به افزایش چشمگیر این ظرفیت در تیرها گردید. در نمونه های تقویت شده با میلگردهای GFRP با قطر ۶ میلی متری، ظرفیت جذب انرژی در بازه ۲۱۵۲/۷۹ تا ۲۶۶۲/۶۶ ژول قرار گرفت. با افزایش قطر میلگردها به ۸، ۱۰ و ۱۲ میلی متر، این بازه ها به ترتیب به ۲۲۴۷/۹۹ تا ۲۷۷۰/۲۷ ژول، ۲۳۶۸/۶۲ تا ۲۸۶۷/۲۷ ژول و نهایتاً ۲۴۷۸/۵۹ تا ۲۹۲۱/۸۴ ژول ارتقا یافت. این روند صعودی، به وضوح حاکی از نقش مؤثر افزایش قطر میلگردهای GFRP در ارتقای ظرفیت جذب انرژی تیرهای بتن آرمه است.

جدول ۷: ظرفیت جذب انرژی (ژول) برای هر تیر.

Table 8: Energy absorption capacity (J) for each beam.

S9	S8	S7	S6	S5	S4	S3	S2	S1	OB	نامگذاری تیرها
-	-	-	-	-	-	-	-	-	1479.35	بدون میلگرد GFRP (تیر مرجع)
2662.66	2598.18	2524.91	2482.30	2423.18	2340.05	2298.76	2234.73	2152.79	-	میلگرد با قطر ۶ میلی متر
2770.27	2693.32	2645.20	2667.78	2559.59	2438.28	2477.42	2368.15	2247.99	-	میلگرد با قطر ۸ میلی متر
2867.27	2810.95	2754.89	2772.56	2660.66	2543.85	2648.22	2548.43	2368.62	-	میلگرد با قطر ۱۰

2921.84	2894.93	2807.62	2817.14	2759.79	2646.61	2721.47	2673.48	2478.59	-	میلگرد GFRP با قطر ۱۲
										میلگرد



شناسه تیرها با تفکیک بر اساس ضخامت ورقه تقویتی

شکل ۲۳: ظرفیت جذب انرژی بر حسب نام اختصاری تیرها.

Figure 23: Energy absorption capacity versus beam designation.

به طور کلی، نتایج نشان می‌دهد که استفاده از ورقه‌های HPFRCC مسلح به میلگردهای GFRP، علاوه بر افزایش ظرفیت باربری، موجب افزایش ظرفیت جذب انرژی تیرهای بتن‌آرمه تحت بارگذاری یکنواخت شده است. این افزایش جذب انرژی ناشی از ارتقای مقاومت و سختی سیستم تقویت‌شده است و نه بیانگر افزایش اتلاف انرژی یا بهبود شکل‌پذیری. با توجه به ماهیت الاستیک میلگردهای GFRP و نوع بارگذاری به‌کاررفته در این پژوهش، تفسیر نتایج صرفاً در چارچوب افزایش ظرفیت مقاومتی و سختی سازه‌ای قابل بیان است.

۳- نتیجه‌گیری

در این پژوهش، رفتار خمشی تیرهای بتن‌آرمه تقویت‌شده با ورقه‌های HPFRCC مسلح به میلگردهای GFRP به‌صورت عددی بررسی شد. در ابتدا، ویژگی‌های مکانیکی مخلوط‌های مختلف حاوی ولاستونیت از طریق آزمایش‌های مکانیکی تعیین گردید. سپس مدل عددی تیر مرجع در نرم‌افزار ABAQUS ایجاد و با نتایج آزمایشگاهی صحت‌سنجی شد. پس از تأیید دقت مدل، یک مطالعه پارامتریک برای بررسی تأثیر پارامترهای مختلف، شامل ضخامت ورقه‌های تقویتی و مشخصات میلگردهای GFRP، بر عملکرد تیرهای بتن‌آرمه انجام شد. بر اساس نتایج به‌دست‌آمده، مهم‌ترین یافته‌های این پژوهش به شرح زیر ارائه می‌شود:

۱. نتایج آزمایش‌های مکانیکی نشان داد که مخلوط حاوی ۲۰ درصد ولاستونیت (W20) بهترین عملکرد مکانیکی را در میان طرح‌های اختلاط بررسی‌شده داراست. این ترکیب با مقاومت فشاری ۱۰۱ مگاپاسکال و مدول الاستیسیته ۳۸/۹۱ گیگاپاسکال، به دلیل رفتار مطلوب در کشش و خمش، به‌عنوان ماده بهینه برای ساخت ورقه‌های تقویتی HPFRCC انتخاب شد.

۲. مدل عددی توسعه‌یافته برای تیر بتن‌آرمه مرجع توانست رفتار بار-تغییرمکان تیر را با دقت مناسبی پیش‌بینی کند. تحلیل حساسیت اندازه‌ها نشان داد که اندازه المان ۲۵ میلی‌متر بهترین تطابق را با نتایج آزمایشگاهی فراهم می‌کند. همچنین استفاده از مدل آسیب پلاستیسیته بتن برای شبیه‌سازی رفتار غیرخطی کامپوزیت سیمانی و در نظر گرفتن رفتار الاستیک خطی برای میلگردهای GFRP، امکان بازتولید مناسب رفتار واقعی سیستم را فراهم ساخت.

۳. نتایج تحلیل پارامتریک نشان داد که به کارگیری ورقه‌های تقویتی HPFRCC مسلح به میلگردهای GFRP، ظرفیت باربری تیرهای بتن‌آرمه را به‌طور قابل‌توجهی افزایش می‌دهد. ظرفیت باربری تیر مرجع ۱۲۰/۰۵ کیلونیوتن محاسبه شد، در حالی که این مقدار در تیرهای تقویت‌شده تا ۲۶۷/۴۱ کیلونیوتن ارتقا یافت که حاکی از بهبود چشمگیر عملکرد خمشی اعضای تقویت‌شده است.

۴. افزایش قطر میلگردهای GFRP در ورقه‌های تقویتی تأثیر مستقیمی بر افزایش ظرفیت باربری تیرها دارد. نتایج تحلیل عددی نشان داد که با افزایش قطر میلگردها از ۶ میلی‌متر به ۱۲ میلی‌متر، ظرفیت باربری تیرهای تقویت‌شده به‌طور پیوسته افزایش می‌یابد. این افزایش عمدتاً ناشی از افزایش سطح مقطع آرماتورهای تقویتی و در نتیجه بهبود توزیع تنش در ناحیه کششی تیر است که به افزایش ظرفیت خمشی عضو منجر می‌شود.

۵. بررسی تأثیر تعداد میلگردهای GFRP نیز نشان داد که افزایش تعداد میلگردها موجب افزایش ظرفیت باربری تیر می‌شود. با این حال، اختلاف ظرفیت باربری بین حالت‌های دارای سه و چهار میلگرد نسبتاً محدود بوده، در حالی که اختلاف بین حالت‌های دارای دو و سه میلگرد بیشتر است. این موضوع نشان می‌دهد که افزایش تعداد میلگردهای تقویتی تا یک حد مشخص موجب بهبود قابل توجه عملکرد خمشی تیر می‌شود، اما پس از رسیدن به سطحی از تقویت مؤثر، میزان تأثیر افزایش بیشتر میلگردها کاهش می‌یابد. لازم به ذکر است که در این مطالعه اثر قطر و تعداد میلگردها به‌صورت پارامتریک و در حالت‌های مستقل بررسی شده و مقایسه مستقیم این دو پارامتر بر اساس سطح مقطع کل یکسان مدنظر نبوده است.

۶. نتایج حاصل از ظرفیت جذب انرژی نشان داد که استفاده از ورقه‌های HPFRCC مسلح به میلگردهای GFRP، موجب افزایش قابل توجه توانایی تیرها در جذب انرژی می‌شود. ظرفیت جذب انرژی تیر مرجع برابر با ۱۴۷۹/۳۵ ژول به دست آمد، در حالی که در تیرهای تقویت‌شده این مقدار تا حدود ۲۹۲۱/۸۴ ژول افزایش یافته است. این افزایش، ناشی از بهبود ظرفیت باربری و افزایش سختی سیستم تحت بارگذاری یکنواخت است که منجر به افزایش سطح زیر نمودار نیرو-تغییر مکان شده است. در واقع، استفاده از مقاطع تقویت‌شده، توانایی سازه را در برابر بارگذاری‌های شدید از طریق افزایش مقاومت و ظرفیت جذب انرژی تحت بارگذاری‌های استاتیکی بهبود می‌بخشد.

لازم به ذکر است که نتایج این پژوهش تحت برخی محدودیت‌ها به دست آمده‌اند. در آزمایش خمش ورقه بزرگ‌مقیاس، به دلیل محدودیت دامنه اندازه‌گیری LVDT، ثبت کامل پاسخ نمونه در تغییر شکل‌های بزرگ امکان‌پذیر نبود؛ با این حال، بخش اصلی رفتار سازه‌ای شامل مراحل اولیه بارگذاری و روند توسعه ترک‌ها با دقت مناسب ثبت شد و مبنای صحت‌سنجی مدل عددی قرار گرفت. همچنین، در مدل‌سازی عددی حاضر اثرات وابسته به زمان نظیر جمع‌شدگی و خزش، و نیز عدم قطعیت‌های اجرایی لحاظ نشده‌اند و تحلیل‌ها تحت شرایط ایده‌آل انجام شده‌اند. علاوه بر این، ارزیابی جذب انرژی در این پژوهش صرفاً بر اساس بارگذاری استاتیکی یکنواخت انجام شده و تعمیم نتایج به بارگذاری‌های دینامیکی یا لرزه‌ای نیازمند مطالعات تکمیلی است. بررسی این موارد می‌تواند به‌عنوان پیشنهاد برای تحقیقات آینده مدنظر قرار گیرد.

مراجع

- [1] I. Khan, Strengthening of reinforced concrete structures using FRP composites: A state-of-the-art review, Composite Structures, 92(12) (2010) 2793–2815.
- [2] A. Shaikh, L.J. Butler, Self-sensing fabric reinforced cementitious matrix systems for combined strengthening and monitoring of concrete structures, Construction and Building Materials, 331 (2022) 127243.
- [3] J.A. Barros, A. Fortes, Flexural strengthening of concrete beams with CFRP laminates bonded into slits, Cement and Concrete Composites, 27(4) (2005) 471–480.
- [4] V.C. Li, H.-C. Wu, Conditions for Pseudo Strain-Hardening in Fiber Reinforced Brittle Matrix Composites, Applied Mechanics Reviews, 45(8) (1992) 390–398.

- [5] H. Tanarlan, N. Alver, R. Jahangiri, Ç. Yalçinkaya, H. Yazıcı, Flexural strengthening of RC beams using UHPFRC laminates: Bonding techniques and rebar addition, *Construction and Building Materials*, 155 (2017) 45-55.
- [6] H.M. Tanarlan, Ç. Yalçinkaya, N. Alver, C. Karademir, Shear strengthening of RC beams with externally bonded UHPFRC laminates, *Composite Structures*, 262 (2021) 113611.
- [7] Z. Kexin, S. Quansheng, Strengthening of a reinforced concrete bridge with polyurethane-cement composite (PUC), *The Open Civil Engineering Journal*, 10(1) (2016).
- [8] A. Bitaraf, A. Kheyroddin, M.K. Sharbatdar, Flexural Strengthening of Continuous RC Beams Using HPFRCC Precast Laminates, (2021).
- [9] R. Ehsani, M.K. Sharbatdar, A. Kheyroddin, Estimation of the moment redistribution and plastic hinge characteristics in two span beams cast with high-performance fiber reinforced Cementitious composite (HPFRCC), *Structures*, 35 (2022) 1175-1190.
- [10] R. Zhang, J. Wu, L. Jin, X. Du, Influence of elevated temperatures on bond performance between BFRP bars and concrete, *Engineering Fracture Mechanics*, 287 (2023) 109303.
- [11] M.M. Kadhim, A. Jawdhari, W. Nadir, L.S. Cunningham, Behaviour of RC beams strengthened in flexure with hybrid CFRP-reinforced UHPC overlays, *Engineering Structures*, 262 (2022) 114356.
- [12] A. Farhat Farhat, D. Nicolaides, A. Kanellopoulos, L. Karihaloo Bhushan, Behavior of RC Beams Retrofitted with CARDIFRC after Thermal Cycling, *Journal of Materials in Civil Engineering*, 22(1) (2010) 21-28.
- [13] D.J. Kim, S.H. Park, G.S. Ryu, K.T. Koh, Comparative flexural behavior of hybrid ultra high performance fiber reinforced concrete with different macro fibers, *Construction and Building Materials*, 25(11) (2011) 4144-4155.
- [14] M.A. Al-Osta, M.N. Isa, M.H. Baluch, M.K. Rahman, Flexural behavior of reinforced concrete beams strengthened with ultra-high performance fiber reinforced concrete, *Construction and Building Materials*, 134 (2017) 279-296.
- [15] H. Tanarlan, Flexural strengthening of RC beams with prefabricated ultra high performance fibre reinforced concrete laminates, *Engineering Structures*, 151 (2017) 337-348.
- [16] M. Hussein, M. Kunieda, H. Nakamura, Strength and ductility of RC beams strengthened with steel-reinforced strain hardening cementitious composites, *Cement and Concrete Composites*, 34(9) (2012) 1061-1066.
- [17] S.E.-T. K. Will, A.E. Naaman, Properties of strain hardening ultra high performance fiber reinforced concrete (UHP-FRC) under direct tensile loading, *Cement & Concrete Composites*, 48 (2014) 53-66.
- [18] R.X. Zhidong Zhou, Pizhong Qiao, Linjun Lu, On the modeling of tensile behavior of ultra-high performance fiber-reinforced concrete with freezing-thawing actions, 174 (2019) 136983.
- [19] M.S.M.A. M. Singh Sheikh, P. Visintin, M.C. Griffith, Experimental and numerical study of the flexural behaviour of ultra-high performance fibre reinforced concrete beams, *Construction and Building Materials*, 138 (2017) 15-25.
- [20] M.K. Mohamed Husseina, Hikaru Nakamura., Strength and ductility of RC beams strengthened with steel-reinforced strain hardening cementitious composites, *Cement and Concrete Composites*, 34(9) (2012) 1061-1066.
- [21] H.A.B. Othman, PERFORMANCE OF ULTRA-HIGH PERFORMANCE FIBRE REINFORCED CONCRETE PLATES UNDER IMPACT LOADS, Toronto, Ontario, Canada, 2016.
- [22] JSCE, Recommendations for Design and Construction of High Performance Fiber Reinforced Cement Composites with Multiple Fine Cracks (HPFRCC), in, Japan Society of Civil Engineers, Tokyo, 2008, pp. 16.
- [23] F. Lo Monte, L. Ferrara, Tensile behaviour identification in Ultra-High Performance Fibre Reinforced Cementitious Composites: indirect tension tests and back analysis of flexural test results, *Materials and Structures*, 53(6) (2020) 145.
- [24] W. Li, J. Zhao, X. Huang, J. Zheng, T. Shi, E.D. Shumuye, Mechanical properties of SAC-ECC reinforced with fiber-reinforced polymer mesh, *Construction and Building Materials*, 344 (2022) 128279.
- [25] G. Tan, Z. Zhu, W. Wang, X. He, A fractal-based approach for cracking characterization and whole process prediction exploration of PP fiber reinforced ECC containing sustainable ingredients, *Construction and Building Materials*, 318 (2022) 126015.

- [26] R.D. Toledo Filho, F. de Andrade Silva, E. Fairbairn, J. de Almeida Melo Filho, Durability of compression molded sisal fiber reinforced mortar laminates, *Construction and building materials*, 23(6) (2009) 2409-2420.
- [27] Q. Zhang, Q.-C. Yang, W.-J. Li, X.-L. Gu, H.-H. Dai, Study on model of flexure response of carbon fiber textile reinforced concrete (CTRC) sheets with short AR-glass fibers, *Case Studies in Construction Materials*, 18 (2023) e01791.
- [28] B.S. EN, Testing hardened concrete—Part 3: Compressive strength of test specimens English version of DIN EN 12390-3:2009-07, British Standard Institution, London, UK, (2009).
- [29] L.-S. Wu, Z.-H. Yu, C. Zhang, T. Bangi, RETRACTED: Effect of CaCO_3 whiskers on tensile properties of ultra-high-performance engineered cementitious composites, in, Elsevier, 2022.
- [30] B.-T. Huang, J.-X. Zhu, K.-F. Weng, V.C. Li, J.-G. Dai, Ultra-high-strength engineered/strain-hardening cementitious composites (ECC/SHCC): Material design and effect of fiber hybridization, *Cement and Concrete Composites*, 129 (2022) 104464.
- [31] L.-Y. Xu, B.-T. Huang, J.-C. Lao, J.-G. Dai, Tailoring strain-hardening behavior of high-strength Engineered Cementitious Composites (ECC) using hybrid silica sand and artificial geopolymers aggregates, *Materials & Design*, 220 (2022) 110876.
- [32] A.M. Tawfek, Z. Ge, H. Yuan, N. Zhang, H. Zhang, Y. Ling, Y. Guan, B. Šavija, Influence of fiber orientation on the mechanical responses of engineering cementitious composite (ECC) under various loading conditions, *Journal of Building Engineering*, 63 (2023) 105518.
- [33] R. Khaleghi, M. TahamouliRoudsari, Flexural strengthening of concrete beams using prefabricated mortar laminates reinforced with GFRP bars and hybrid fibers, *Asian Journal of Civil Engineering*, 26(6) (2025) 2585-2604.
- [34] Z. Wu, C. Shi, W. He, L. Wu, Effects of steel fiber content and shape on mechanical properties of ultra high performance concrete, *Construction and building materials*, 103 (2016) 8-14.
- [35] J. Li, J. Yan, G. Xue, J. Niu, Acoustic emission behavior of polyvinyl alcohol (PVA) fiber reinforced calcium sulphoaluminate cement mortar under flexural load, *Journal of Building Engineering*, 40 (2021) 102734.
- [36] M. Khan, M. Cao, A. Hussain, S. Chu, Effect of silica-fume content on performance of CaCO_3 whisker and basalt fiber at matrix interface in cement-based composites, *Construction and Building Materials*, 300 (2021) 124046.
- [37] S. Li, O.M. Jensen, Q. Yu, Mechanism of rate dependent behaviour of ultra-high performance fibre reinforced concrete containing coarse aggregates under flexural loading, *Construction and Building Materials*, 301 (2021) 124055.
- [38] M. Mercuri, M. Vailati, A. Gregori, Lime-based mortar reinforced with randomly oriented polyvinyl-alcohol (PVA) fibers for strengthening historical masonry structures, *Developments in the Built Environment*, 14 (2023) 100152.
- [39] M. Dutkiewicz, H.E. Yücel, F. Yıldızhan, Evaluation of the performance of different types of fibrous concretes produced by using wollastonite, *Materials*, 15(19) (2022) 6904.
- [40] S. Wang, G. Li, F. Luo, Influence of Natural Wollastonite Microfibers on the Mechanical Behavior of Ultra-High-Toughness Cementitious Composites Containing Polyethylene Fibers, *Materials*, 19(9) (2026) 1717.
- [41] C. Hu, X. Lin, Y. Liu, M. Pellicciari, A.M. Tarantino, H. Jiang, T. Ji, Physical-chemical synergistic toughening mechanism of wollastonite powder in $\text{MgO-K}_2\text{HPO}_4\text{-SiO}_2$ cement system, *Construction and Building Materials*, 514 (2026) 145581.
- [42] M.-Y. Xuan, Y.-S. Wang, R. Lin, S.-J. Kwon, X.-Y. Wang, Strength enhancement–carbon emission reduction–autogenous shrinkage mitigation of cement-slag-limestone ultra-high-performance concrete by using natural wollastonite, *Journal of Building Engineering*, (2025) 114598.
- [43] R. Hawileh, H. Musto, J. Abdalla, M. Naser, Finite element modeling of reinforced concrete beams externally strengthened in flexure with side-bonded FRP laminates, *Composites Part B: Engineering*, 173 (2019) 106952.
- [44] G.K. Mohammed, K.F. Sarsam, I.N. Korkess, Modeling the flexural performance of reinforced concrete built-up beams, in: *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, IOP Publishing, 2020, pp. 012108.

- [45] H. Cheng, C.M. Paz, B.C. Pinheiro, S.F. Estefen, Experimentally based parameters applied to concrete damage plasticity model for strain hardening cementitious composite in sandwich pipes, *Materials and Structures*, 53(4) (2020) 78.
- [46] S.A. Mohammed, A.I. Said, Analysis of concrete beams reinforced by GFRP bars with varying parameters, *Journal of the Mechanical Behavior of Materials*, 31(1) (2022) 767-774.
- [47] S. Popovics, A numerical approach to the complete stress-strain curve of concrete, *Cement and concrete research*, 3(5) (1973) 583-599.
- [48] A. Belarbi, & Hsu, T. T. C, Constitutive Laws of Concrete in Tension and Reinforcing Bars Stiffened By Concrete., *Aci Structural Journal*, 91 (1994) 465 - 474.
- [49] E. Esmaeeli, J.A. Barros, H. Baghi, Hybrid composite plates (HCP) for shear strengthening of RC beams, (2013).
- [50] Y.M. Alharthi, M. Emara, A.S. Elamary, I.A. Sharaky, Flexural response and load capacity of reinforced concrete beams strengthened with reinforced mortar layer, *Engineering Structures*, 245 (2021) 112884.
- [51] P. Zhang, Y. Su, Y. Liu, D. Gao, S.A. Sheikh, Flexural behavior of GFRP reinforced concrete beams with CFRP grid-reinforced ECC stay-in-place formworks, *Composite Structures*, 277 (2021) 114653.
- [52] K.-D. Peng, B.-T. Huang, L.-Y. Xu, R.-L. Hu, J.-G. Dai, Flexural strengthening of reinforced concrete beams using geopolymer-bonded small-diameter CFRP bars, *Engineering Structures*, 256 (2022) 113992.
- [53] H. Al-Mashgari, Y. Abdullah, F. Hejazi, M.Y. Alkhateeb, Retrofitting of corroded reinforced concrete beams in flexure using CFRP rods and anchor bolt, in: *Structures*, Elsevier, 2021, pp. 1819-1827.
- [54] Y. Zhang, S. Huang, Y. Liu, W. Fan, X. Shao, Flexural behavior of damaged RC beams strengthened with prestressed UHPC layer, *Engineering Structures*, 283 (2023) 115806.
- [55] M.M.A. Kadhim, A. Jawdhari, W. Nadir, A. Majdi, Experimental study on RC beams strengthened in flexure with CFRP-Reinforced UHPC overlays, *Engineering Structures*, 285 (2023) 116066.

ACCEPTED MANUSCRIPT