بررسی عددی تأثیر ایجاد پیش‌تنیدگی در لمینت CFRP بر عملکرد خمشی تیر بتنی مسلح

علیرضا میرزائی
دانشجوی مقطع دکتری، گروه مهندسی عمران، واحد مرودشت، دانشگاه آزاد اسلامی، مرودشت، ایران
اشکان ترابی*
استادیار، گروه مهندسی عمران، واحد مرودشت، دانشگاه آزاد اسلامی، مرودشت، ایران
آرش توتونچی
استادیار، گروه مهندسی عمران، واحد مرودشت، دانشگاه آزاد اسلامی، مرودشت، ایران

Ashkan.Torabi@miau.ac.ir
تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۱۰/۲۵ تاریخ پذیرش نهایی: ۱۴۰۰/۱۱/۲۴

چکیده:
ساخت ساختمان‌ها با بتن مسلح به عنوان یکی از رایج‌ترین و پرکاربردترین روش‌های ساخت‌وساز در جهان شناخته شده و سالانه تعداد زیادی از ساختمان‌ها و دیگر سازه‌ها با استفاده از این مصالح بنا می‌شوند. پیشرفت علم مهندسی و استفاده از مصالح جدید سبب ارتقاء کیفیت ساخت و ساز و ارتقاء این صنعت شده است. استفاده از مصالحی مانند FRP و یا سیستم‌های پیش‌تنیده و پس‌کشیده با توجه به عملکرد مناسب این مصالح در زلزله‌های گذشته و تحقیقات انجام شده، مورد توجه بسیاری از مهندسان قرار گرفته است. در تحقیق پیشرو با استفاده از نرم افزار ABAQUS به بررسی تأثیر تقویت خمشی تیر بتن آرمه با استفاده از ورق CFRP پیش تنیده به عنوان روشی جدید و پرکاربرد در تقویت و بهبود عملکرد تیر بتنی پرداخته شده است. درصدهای متفاوت نیروی پیش تنیدگی با توجه به ظرفیت کششی ورق CFRP به عنوان پارامتر مؤثر در مقاومت نهایی، در این تحقیق مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که استفاده از پیش‌تنیدگی در ورق CFRP به دلیل ظرفیت کششی بالای آن می‌تواند تأثیر بسزایی بر افزایش سختی و مقاومت نهایی تیرهای بتن آرمه داشته باشد. تحلیل‌های انجام شده در این زمینه با در نظر گرفتن مسائل و امکانات اجرایی بیان گر آن است که میزان نیروی پیش تنیدگی نباید بیش از ۳۰ درصد مقاومت کششی ورق باشد که از مواردی است که محققان در تحقیقات اخیر به آن اشاره نموده‌اند. همچنین پیش تنیدگی در ورق ها سبب تغییر الگوی ترک خوردگی در ناحیه بحرانی تیر می شود.

کلید واژگان: ورق CFRP، تیر بتنی مسلح، نرم افزار ABAQUS ، پیش‌تنیدگی، ظرفیت کششی، مقاوم‌سازی

۱-مقدمه

سازه‌ها و ساختمان‌ها به عنوان یکی از مهم‌ترین نمادهای شهری و ملی مورد توجه تمام کشورها و شهرها می‌باشند. با توجه به ارزش و اهمیت سازه‌ها، آیین‌نامه‌ها در راستای حفظ و بقای آن‌ها در برابر بارهای جانبی ضوابط و راهکارهای متفاوتی را ارائه می‌نمایند که این ضوابط ممکن است هرچند یک بار با توجه به آزمایشات و تحقیقات انجام‌گرفته توسط محققان و اندیشمندان این عرصه دچار تغییرات و اصلاحات شود. از این رو راهکارهای متفاوتی جهت تقویت و یا رفع ایرادات در ساختمان‌ها در سال‌های اخیر ابداع گردیده است. این ایرادات و نیازها ممکن است به دلیل تغییر کاربری ساختمان، بروز شدن آیین‌نامه‌ها، مشخصات مصالح مورد استفاده جهت تقویت و یا ترمیم سازه‌ها باشد. تقویت و بهسازی در سازه می‌تواند بر روی هر یک از المان‌های سازه‌ای مانند تیر، ستون، اتصال و چشمه اتصال تیر به ستون، دیوار برشی و... انجام گردد [۱–۵]. در ساختمان‌های بتن مسلح دارای سیستم قاب خمشی، تیر به عنوان یک عضو باربر جانبی ایفای نقش می‌نماید. تقویت این المان می‌تواند در رفتار کلی و عملکرد نهایی سازه تأثیر بسزایی بگذارد. این تقویت می‌تواند به روش‌های متفاوتی مانند ژاکت فولادی، ژاکت بتنی و استفاده از ورق‌های FRP باشد [۶–۱۲]. یکی از متداول ترین و پرکاربرد ترین مصالح مورد استفاده جهت تقویت و ترمیم سازه‌ها، ورق‌های ساخته شده از پلیمر های مسلح الیافی (FRP) می‌باشند. FRP ورق‌های با ضخامت‌های متفاوتی هستند که در یک جهت و یا دو جهت دارای مقاومت قابل توجهی می‌باشند و با چسباندن این ورق‌ها به سطح خارجی بتن و یا فولاد سبب تقویت خمشی و برشی آن عضو می‌گردند. از ورق‌های FRP معمولاً جهت مقاوم سازی و افزایش مقاومت سازه‌های بتنی مسلح و یا پیش‌تنیده استفاده شده و سبب افزایش سختی و جلوگیری از ترک خوردگی در ناحیه پلاستیک عضو می‌شوند. جنس ورق‌های FRP با توجه به نوع کاربرد متفاوت بوده و با توجه به نوع و روش تقویت المان مورد نظر انتخاب می‌گردند [۱۳]. حال با توجه به گستردگی استفاده از مصالح بتنی در ساخت و ساز شهری در کشور ایران و انجام بررسی‌های میدانی در خصوص نحوه و روش تقویت سازه‌های بتن مسلح، استفاده از FRP به‌عنوان یکی از رایج‌ترین مصالح جهت تقویت اعضای سازه‌های بتنی در ایران مورد استفاده قرار می‌گیرد. رویکرد تقویت و مقاوم‌سازی سازه‌ها در دهه‌های اخیر با درنظرگرفتن تأثیر تاریخی و سرمایه‌گذاری آن‌ها بیشتر مورد توجه دانشمندان و محققان صنعت ساختمان قرار گرفته است. مطالعات مختلفی به‌صورت عددی و آزمایشگاهی بر روی المان‌های متفاوت در سازه‌های بتنی مانند تیرها، ستون‌ها و دال‌ها انجام شده که بیشتر آن‌ها در راستای ارزیابی رفتار و عملکرد عضو مورد نظر با تغییرات اعمال شده، تحت بارهای استاتیکی و چرخه‌ای بوده است [۱۵–۱۴]. تحقیقات آزمایشگاهی فراوانی در زمینه استفاده از FRP به صورت‌های مختلف مانند الیاف، ورق FRP، استفاده از ورق‌های CFRP جهت تقویت خمشی تیرهای بتنی و یا بررسی عملکرد آن‌ها تحت بارهای مختلف در سال‌های اخیر انجام شده است [۲۰–۱۶]. نتایج این تحقیق‌ها نشان‌دهنده سازگاری مناسب FRP با بتن به‌عنوان تشکیل‌دهنده یک عضو در یک سازه می‌باشد و سبب افزایش مقاومت و بهبود عملکرد آن در بارهای مختلف بوده است. پیش تنیدگی و پس‌کشیدگی نیز به‌عنوان یک روش مفید و کارآمد در بهبود عملکرد سازه‌های بتن مسلح با حذف ترک‌های کششی و جبران ضعف بتن در این ناحیه سبب عملکرد بهتر المان‌های بتن مسلح شده است. با توجه به عملکرد مناسب ورق‌های CFRP و ظرفیت کششی منحصر به فرد آن‌ها، می‌توان با ایجاد پیش تنیدگی و استفاده از این روش به طور ویژه‌ای از ظرفیت این مصالح استفاده نمود. این موضوع در سال‌های اخیر بیشتر مورد توجه قرار گرفته و تحقیقاتی چند بر روی عملکرد آن انجام شده است [۲۱–۲۵]. در این خصوص می توان به تحقیق آزمایشگاهی انجام شده در سال ۲۰۱۵ در زمینه تعمیر تیر های بتنی عمیق با استفاده از نصب خارجی میلگرد های CFRP پس کشیده شده اشاره نمود [۲۶]. در این تحقیق تعداد ۴ نمونه جهت انجام این آزمایش ساخته شده و با استفاده از میلگردهای پلیمری مورد تعمیر و بازسازی قرار گرفته است. نتایج تحقیق فوق نشان داد که مقاومت نهایی تیر تعمیر شده بیشتر از مقاومت نهایی تیرهای بتنی تعمیر نشده در آزمایش بوده، درصورتی‌که از نظر شکل‌پذیری با یکدیگر اختلاف چندانی نداشته‌اند. تیرهای بتنی پیش‌تنیده در سازه‌ها دارای اهمیت ویژه‌ای هستند و ارتقاء سطح عملکرد آن‌ها و یا بهبود ضعف‌های به وجود آمده در آن‌ها با استفاده از مصالح نوینی مانند FRP به عنوان روشی کاربردی از سوی محققین و دانشمندان در حال بررسی می‌باشد. یکی دیگر از تحقیقاتی که به صورت آزمایشگاهی و عددی در سال ۲۰۱۷ در این خصوص انجام شده است [۲۷]، بررسی تأثیر استفاده از ورق‌های FRP در تیرهای بتنی پیش تنیده می باشد، که در این تحقیق با استفاده ار روش های عددی رایج در مراجع و آیین نامه‌های متفاوت به بررسی نحوه تعیین ظرفیت باربری نهایی تیرهای پیش تنیده تقویت شده با استفاده از لایه های پلیمری پرداخته شده است.

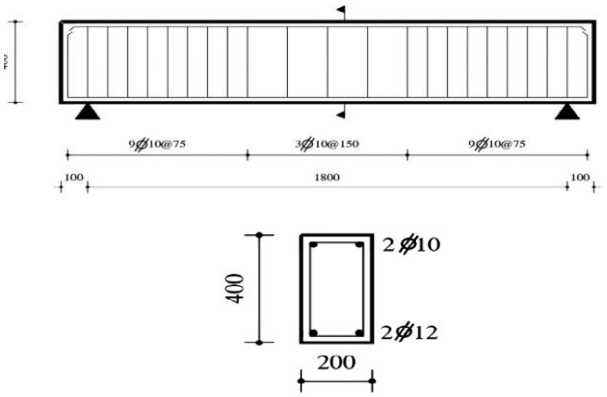
در تحقیق پیش رو تلاش شده تا با استفاده از ایجاد پیش تنیدگی در ورق CFRP به تقویت تیر بتن مسلح پرداخته شود و نتایج حاصل از آن با تیر بتنی مسلح بدون تقویت و تقویت شده با ورق CFRP بدون پیش تنیدگی مورد مقایسه و ارزیابی قرار گیرد.

۲- مدل‌سازی

در این تحقیق با استفاده از نرم افزار آباکوس به بررسی رفتار تیر بتنی تقویت شده با ورق CFRP پیش‌تنیده شده پرداخته شده است. جهت این منظور در نرم افزار از مدل آزمایشگاهی که تحت بار استاتیکی و به‌صورت بار افزون تا شکست کامل نمونه مورد آزمایش قرار گرفته استفاده شده است [۲۸]. بررسی عملکرد نرم افزار در این تحقیق به دو دسته مدل سازی تیر بتن مسلح تقویت شده با استفاده از ورق CFRP و مدل‌سازی ورق CFRP پیش تنیده تقسیم می‌شود. جهت صحت سنجی نرم افزار از دو تحقیق آزمایشگاهی استفاده شده است. در ادامه به نحوه مدل سازی تیر بتن مسلح تقویت شده با استفاده از ورق CFRP پرداخته شده است.

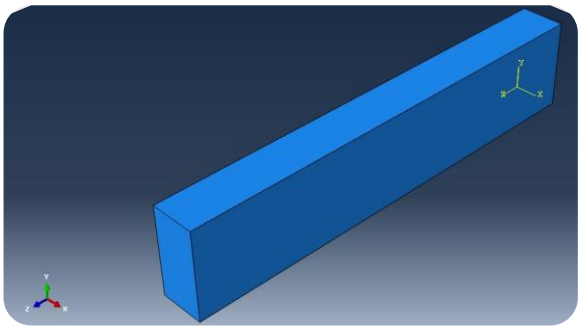
۲-۱- مشخصات تیر بتنی مسلح مورد استفاده

همان‌طور که در شکل شماره ۲ مشاهده می‌شود تیر بتنی با طول ۱۸۰۰ میلی‌متر و مقطع ۲۰۰ * ۴۰۰ میلی‌متر جهت مدل سازی استفاده شده است. همچنین از میلگرد با قطر ۱۰ و ۱۲ میلی‌متر برای آرماتورگذاری طولی و عرضی (خاموت گذاری) در مقطع با مشخصات نشان داده شده در شکل شماره ۱ استفاده شده است.

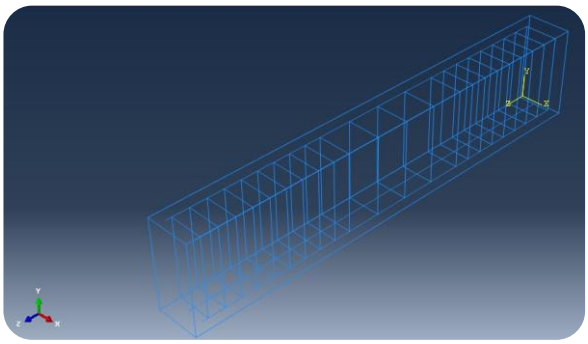


شکل ۱- مشخصات مقطع بتنی مسلح مورد استفاده در مدل سازی [۲۸]

مدل‌سازی در نرم افزار به صورت ماکرو مطابق شکل شماره ۲ انجام شده است. بدین ترتیب که المان های تشکیل دهنده تیر بتنی مورد نظر به صورت جداگانه ترسیم شده و با توجه به مشخصات ذکر شده در شکل شماره ۱ کنار یکدیگر قرار گرفته‌اند. با توجه به اهمیت مدل سازی عددی، در این تحقیق تلاش شده تا بتوان دقیقاً همانند مدل ساخته شده در آزمایشگاه و شرایط حاکم بر آن عمل شود تا کم‌ترین خطای ممکن را در تحلیل به همراه داشته باشد.



(الف)



(ب)

شکل ۲ (الف) تیر مدل شده در نرم‌افزار (ب) میلگرد گذاری در تیر بتنی مورد نظر در نرم افزار

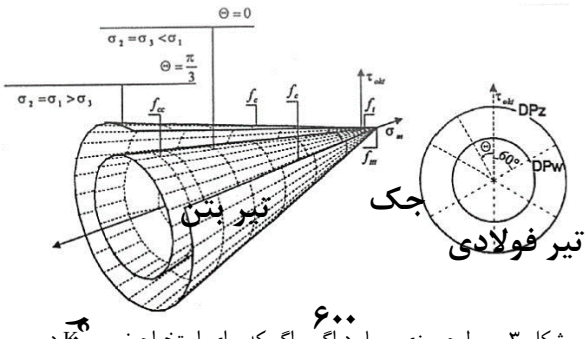
۲-۲- مشخصات مصالح

مصالح مورد استفاده در این تحقیق بتن و فولاد می‌باشد. مشخصات پلاستیک مصالح بتنی با استفاده از تئوری مدل خسارت پلاستیک بتن در نظر گرفته شده است. مدل خسارت پلاستیک بتن (Concrete Damage Plasticity) تکنیکی است که قابلیت نشان‌دادن رفتار غیرخطی و خصوصیات خرابی مواد شبه ترد همانند بتن را دارد [۲۹]. مقاومت فشاری بتن مورد نظر ۳۵ مگاپاسکال و مقاومت کششی بتن به‌دست‌آمده از آزمایش نیز ۳/۲۹ مگاپاسکال در نظر گرفته شده است (جدول شماره ۱). مشخصات مصالح فولادی نیز بر اساس رفتار کششی فولاد بعد از تنش تسلیم مورد استفاده قرار گرفته است. برای این منظور تنش تسلیم برای میلگردهای طولی ۴۲۰/۷۰ مگاپاسکال و برای خاموت‌ها تنش تسلیم نیز همین مقدار در نظر گرفته شده است. لازم به ذکر است رفتار فولاد در ناحیه پلاستیک باتوجه به ماهیت آن در ناحیه غیر خطی به صورت الاستوپلاستیک در نظر گرفته شده است.

جدول ۱- مقاومت بتن مورد استفاده در تحلیل

	مقاومت فشاری (مگاپاسکال)	مقاومت کششی (مگاپاسکال)
بتن	۳۵	۳/۲۹

تئوری مدل آسیب پلاستیک بتن دارای ۳ بخش کلی با عنوان ثابت‌های پلاستیک، رفتار فشاری بتن در ناحیه پلاستیک و رفتار کششی بتن در ناحیه پلاستیک می‌باشد. رفتار فشاری و کششی بتن در ناحیه پلاستیک می‌تواند با وارد نمودن پارامترهای خسارت (Damage) و هم بدون در نظر گرفتن آسیب مورد استفاده قرار گیرند. تئوری و روابط بسیاری در تخمین این ضرائب توسط محققان مختلف ارائه شده است و همچنین در راهنمای نرم افزار نیز مقادیر پیشنهادی در صورت نبود اطلاعات آزمایشگاهی پیشنهاد شده که می‌توان در مدل سازی مورد استفاده قرار گیرد (شکل شماره ۳). در این تحقیق با توجه به اینکه اطلاعات آزمایشگاهی در خصوص زاویه اصطکاک، خروج از مرکزیت و دیگر پارامترها در دسترس نبوده، از مقادیر پیشنهادی راهنمای نرم‌افزار باتوجه به نوع و مقاومت بتن مورد استفاده در این تحقیق استفاده شده است. زاویه اصطکاک ۱۵ درجه و خروج از مرکزیت برابر ۰/۱ به‌عنوان پارامترهای اصلی و تأثیرگذار در بخش ثابت‌های پلاستیک بتن در نظر گرفته شده است.



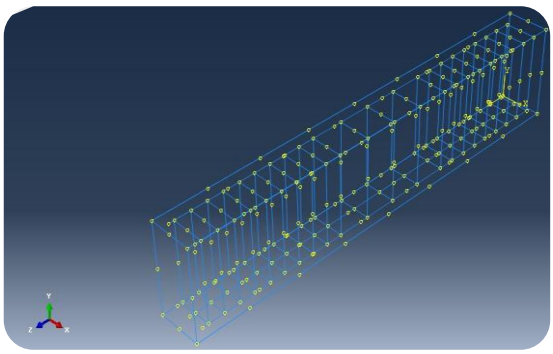
شکل ۳- سطوح مرزی معیار دراگر پراگر که برای استخراج ضریب K_c در مدل خسارت بتن استفاده می‌شود [۲۹].

۲-۳- روش تحلیل

برای انجام تحلیل در این تحقیق از روش بارگذاری بار افزون تا شکست کامل نمونه استفاده شده است. به دلیل پایین بودن قدر مطلق مقادیر سرعت‌ها و شتاب‌ها، سهم نیروهای اینرسی و انرژی جنبشی در این‌گونه تحلیل‌ها بسیار ناچیز می‌باشد، بنابراین در شبیه‌سازی این مسائل با استفاده از نرم‌افزار آباکوس، به طور معمول از تحلیل static, general که حلگر آن Abaqus/Standard است استفاده می‌شود چرا که به هنگام استفاده از این روش تحلیل، مقادیر سرعت و شتاب حالت مجازی داشته و سبب ایجاد نیروی اینرسی نمی‌شوند [۳۰].

۲-۴- اندرکنش اعضاء نسبت به یکدیگر

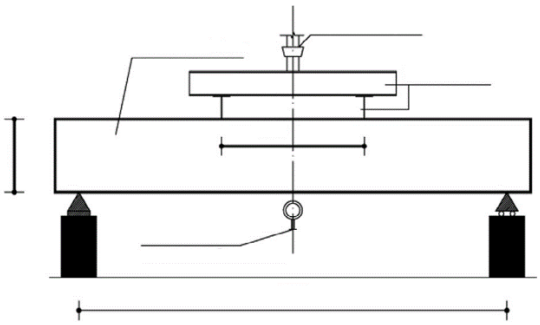
با توجه به اینکه در مدل‌سازی، المان‌ها به‌صورت جدا از یکدیگر در نظر گرفته شده‌اند می باید با استفاده از اندرکنش، رفتار مناسب بخش‌های مدل شده را ایجاد نمود. برای این منظور در نرم افزار با استفاده از اندرکنش "embedded" میلگردهای مدل شده به‌صورت مدفون در بتن در نظر گرفته شده‌اند. در شکل شماره ۴ اندرکنش ایجاد شده نشان داده شده است.



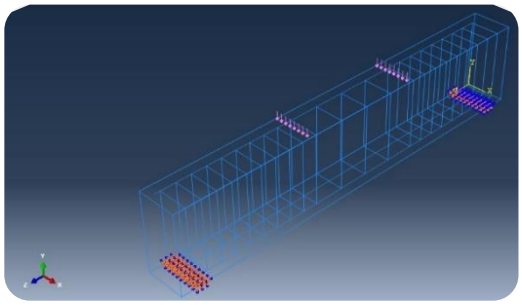
شکل ۴- اندرکنش‌های ایجاد شده در تیر بتنی

۲-۵- بارگذاری و شرایط تکیه گاهی

در تحقیق آزمایشگاهی بارگذاری بر اساس استاندارد ASTM C78 / C78M [۳۱] به‌صورت چهار نقطه‌ای مطابق جزئیات نشان داده شده در شکل شماره ۵ انجام شده است. در مدل عددی نیز همان طور که در شکل شماره ۶ مشاهده می‌گردد، بارگذاری و شرایط تکیه‌گاهی مطابق مدل آزمایشگاهی انجام شده است.



شکل ۵- مشخصات شرایط تکیه گاهی و بارگذاری در مدل آزمایشگاهی [۲۸] و [۳۱]



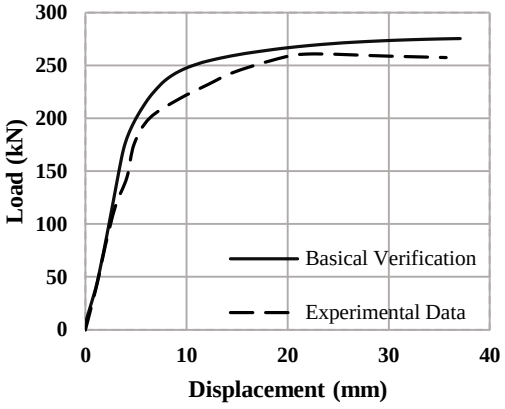
شکل ۶- مشخصات شرایط تکیه‌گاهی و بارگذاری در مدل عددی در نرم‌افزار آباکوس

۲-۶- المان‌های در نظر گرفته شده برای انجام تحلیل

برای مدل‌سازی تیر از المان سه‌بعدی ۸ نقطه‌ای C3D8R و برای مدل‌سازی میلگردهای طولی و خاموت‌ها از المان تراس ۲ نقطه‌ای T3D2 در این تحقیق استفاده شده است.

۲-۷- صحت سنجی مدل عددی

پس از بارگذاری و تحلیل مدل تهیه شده مطابق مدل آزمایشگاهی، نمودار نیرو- جا به جایی حاصل از تحلیل عددی با نمودار نیرو – جا به جایی حاصل از آزمایش مورد بررسی و مقایسه قرار گرفته اند. همان‌طور که در شکل شماره ۷ مشاهده می‌شود رفتار مدل عددی با رفتار مدل آزمایشگاهی هم‌خوانی داشته و با توجه به این نمودار می‌توان از مدل عددی جهت انجام مطالعه پارامتریک استفاده نمود.

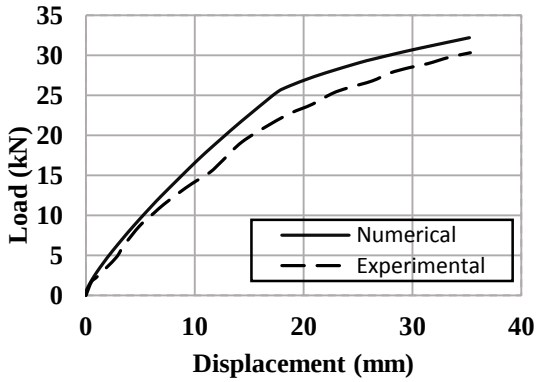


شکل ۷- صحت‌سنجی نرم افزار آباکوس با تهیه مدل عددی از تحقیق آزمایشگاهی

پس از انجام صحت سنجی نرم‌افزار المان‌های تقویتی مربوطه (ورق CFRP) به مدل اصلی اضافه شده و سپس تیر بتنی تقویت شده تحت بارگذاری قرار گرفته است. در ادامه به بررسی نحوه مدل‌سازی ورق CFRP مورد استفاده در این تحقیق پرداخته شده است.

۲-۸- تقویت با استفاده از ورق CFRP

برای بررسی صحیح و دقیق رفتار ورق CFRP در تحقیق پیش رو، ابتدا مدل عددی با استفاده از اطلاعات تحقیق آزمایشگاهی تهیه شده [۱۳]، سپس نتایج به‌دست‌آمده از مدل عددی با نتایج آزمایشگاه مورد مقایسه قرار گرفته است (شکل شماره ۸). در مدل آزمایشگاهی تیر بتنی به طول ۲۳۰۰ میلی‌متر با مقطع ۱۵۰ * ۲۰۰ میلی‌متر ساخته شده و با یک ورق CFRP به طول ۱۹۳۰ میلی‌متر و عرض ۱۵۰ میلی‌متر مورد تقویت قرار گرفته است. لازم به ذکر است جهت مدل سازی ورق CFRP از المان سه‌بعدی ۸ نقطه‌ای C3D8R استفاده شده است. با توجه به اهمیت رفتار ورق CFRP بر عملکرد تیر بتنی، مدل عددی با استفاده از اطلاعات آزمایشگاهی موجود تهیه شده و مورد بررسی و صحت سنجی قرار گرفته است.



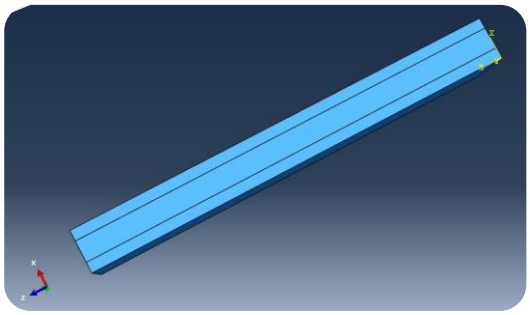
شکل ۸- صحت‌سنجی نرم افزار آباکوس با تهیه مدل عددی از تحقیق آزمایشگاهی

پس از اطمینان از صحت رفتار ورق CFRP مدل شده در نرم‌افزار با استفاده از مدل آزمایشگاهی، تیر بتن مسلح مدل سازی شده و مورد بررسی قرار گرفته در بخش نخست، با استفاده از ورق CFRP مورد تقویت قرار گرفته است. مشخصات ورق تقویت CFRP مورد استفاده در این تحقیق در جدول شماره ۲ نشان داده شده است. همچنین تقویت انجام شده بر روی مدل عددی تیر بتن مسلح در شکل شماره ۹ نشان داده شده است. تیر بتن مسلح مدل سازی شده در بخش نخست جهت انجام تقویت با استفاده از ورق CFRP با مشخصات مندرج در جدول شماره ۲ مورد استفاده قرار گرفته است. با توجه به مشخصات مصالح CFRP و مقاومت کششی بالای آن‌ها، در این تحقیق تلاش شده تا با ایجاد پیش‌تنیدگی با درصدهای مختلف در ورق CFRP بتوان تأثیر پیش‌تنیدگی را بر رفتار و عملکرد خمشی تیر بتنی مسلح شده موجود را بررسی نمود. برای این منظور پیش‌تنیدگی با درصدهای ۰، ۲۰، ۴۰ و ۶۰ درصد مقاومت کششی ورق CFRP

مورد استفاده جهت تقویت به عنوان نیروی پیش‌تنیدگی در نظر گرفته شده است. میزان پیش‌تنیدگی در ورق‌های CFRP در تحقیقات انجام شده متفاوت بوده و جهت درک بهتر رفتار آن ها مقادیر فوق انتخاب شده اند، لازم به ذکر است در عمل میزان پیش‌تنیدگی در ورق‌ها رابطه مستقیم با تجهیزات اجرایی و نوع چسب مورد استفاده دارد. چنانچه چسب مورد استفاده دارای مقاومت کافی نباشد جداشدگی ورق CFRP از سطح بتن اتفاق خواهد افتاد. مدت زمان مورد نیاز جهت دست یابی به حداقل ۹۰ درصد مقاومت چسب مورد استفاده نیز یکی دیگر از پارامترهای تأثیر گذار در انتخاب درصد پیش‌تنیدگی ورق CFRP می‌باشد. لذا در این تحقیق دو بازه حداقل امکانات اجرایی (۲۰٪ ظرفیت کششی ورق CFRP جهت اعمال پیش تنیدگی) و حداکثر امکانات اجرایی و مصالح در دسترس (۶۰٪ ظرفیت کششی ورق CFRP جهت اعمال پیش تنیدگی) مورد بررسی قرار گرفته است.

جدول ۲- مشخصات ورق CFRP مورد استفاده در مدل سازی

	ضخامت (میلی متر)	طول (میلی متر)	عرض (میلی متر)
ورق CFRP	۱/۸	۲۰۰۰	۱۵۰
	مدول الاستیسیته (مگاپاسکال)	مقاومت کششی (مگاپاسکال)	کرنش گسیختگی (میکرو)
	۱۳۱۰۰۰	۱۰۷۴	۲۹۸۰۰



شکل ۹- تقویت تیر بتنی مسلح مدل سازی شده با استفاده از ورق CFRP

جهت انجام تقویت به این روش مقاومت خمشی مقطع مورد تقویت قرار گرفته به نوع شکست آن بستگی دارد. حالت‌های گسیختگی خمشی برای تیرهای بتنی مسلح به شرح ذیل می‌باشد.

۱) خرد شدن بتن در فشار پیش از جاری شدن فولاد
۲) پارگی لایه‌های CFRP به دنبال جاری شدن فولاد کششی
۳) خرد شدن بتن در فشار به دنبال جاری شدن فولاد کششی
۴) جداشدن لایهٔ CFRP از لایهٔ زیرین بتن
۵) جداشدگی پوشش بتن در سطوح کششی یا برشی

خردشدگی در بتن زمانی رخ می‌دهد که کرنش فشاری بتن به حداکثر کرنش مجاز آن برسد. شکست لایهٔ خارجی CFRP نیز زمانی اتفاق خواهد افتاد که کرنش در ورق CFRP پیش از رسیدن بتن به کرنش نهایی بتن در فشار به کرنش شکست ($\varepsilon_f = \varepsilon_{fu}$) برسد.

شکست ناشی از جداشدگی در ورق CFRP نیز می‌تواند سبب کاهش مقدار قابل‌توجهی از ظرفیت خمشی تیر شود. به منظور جلوگیری از ایجاد این دست ترک‌های ناشی از جداشدگی در مصالح CFRP می باید کرنش‌ها در بتن از رابطه ۱ ارائه شده در ذیل کمتر باشد.

$$\varepsilon_{fd} = 0.41\sqrt{\frac{f'_C}{nE_f t_f}} \le 0.9\varepsilon_{fu} \qquad (۱)$$

ε_{fd} = کرنش جداشدگی CFRP از سطح بتن

f'_c = مقاومت فشاری بتن

n = تعداد ورق های CFRP

E_f = مدول کششی CFRP

t_f = ضخامت ورق CFRP

ε_{fu} = کرنش گسیختگی ورق CFRP

مدول الاستیسیته جهت مدل‌سازی ورق CFRP در نرم‌افزار برابر ۱۳۱۰۰۰ مگاپاسکال در نظر گرفته شده همچنین جهت اتصال ورق CFRP به سطح بتن باتوجه به اینکه از مدل‌سازی چسب صرف نظر شده از اندرکنش "tie" استفاده شده است.

۲-۹- اعمال پیش تنیدگی در ورق CFRP

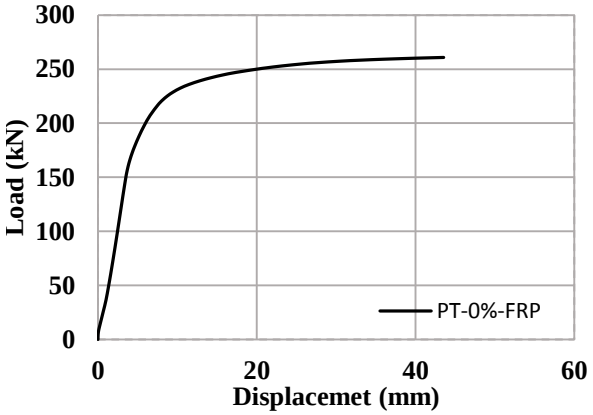
اعمال نیروی پیش‌تنیدگی در نرم‌افزار آباکوس برای ورق‌های CFRP به دو روش قابل انجام می‌باشد.

۱- ایجاد پیش تنیدگی با استفاده از حرارت
۲- ایجاد پیش تنیدگی با استفاده از تنش

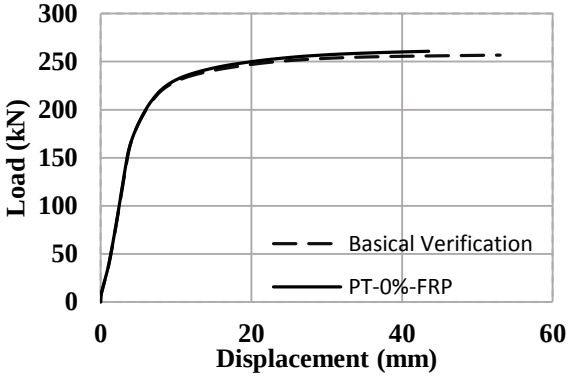
در این تحقیق جهت ایجاد پیش‌تنیدگی در لمینت CFRP از روش دوم استفاده شده است و میزان پیش‌تنیدگی برابر با میزان تنش متناسب با درصد پیش‌تنیدگی مورد نظر قبل از بارگذاری و تحلیل نمونه به ورق CFRP اعمال شده است.

۲-۱۰- نتایج تحلیل مدل تقویت شده با استفاده از ورق CFRP

پس از انجام تحلیل با استفاده از نرم‌افزار آباکوس نتایج با توجه به مقدار پیش‌تنیدگی اعمال شده در ورق CFRP ارائه شده است. همان‌طور که در شکل شماره ۱۰ مشاهده می‌شود حداکثر ظرفیت باربری برای روش تقویت با استفاده از ورق CFRP بدون اعمال پیش‌تنیدگی (۰ ٪) برابر ۲۶۰/۶۷۳ کیلونیوتن می‌باشد. این مهم بیانگر آن می‌باشد که در مدل تقویت شده بدون اعمال پیش تنیدگی، ۱/۵ درصد ظرفیت باربری تیر بتنی نسبت به مدل بدون تقویت افزایش داشته است (شکل شماره ۱۱).

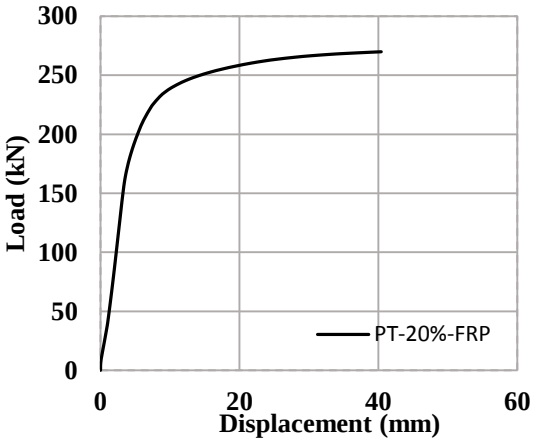


شکل ۱۰- نمودار نیرو – جابه‌جایی نمونه تقویت شده با CFRP بدون اعمال پیش تنیدگی

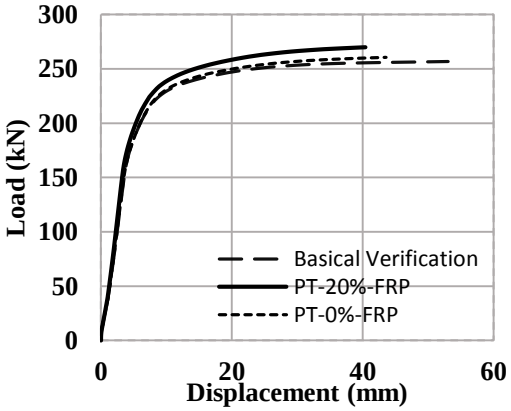


شکل ۱۱–مقایسه نمودار نیرو جابه‌جایی مدل بدون تقویت و مدل تقویت شده با ورق CFRP بدون اعمال پیش تنیدگی

حال در صورت اعمال پیش تنیدگی به میزان ۲۰ درصد در ورق CFRP ظرفیت باربری تیر بتنی به ۲۶۹/۸۸۲ کیلونیوتن ارتقا پیدا خواهد نمود که این مقدار نسبت به نمونه اولیه به میزان ۵/۱ درصد افزایش ظرفیت باربری تیر بتنی را به همراه داشته که خود نسبت به نمونه تقویت شده با ورق CFRP بدون اعمال پیش تنیدگی به میزان ۳/۵۴ درصد افزایش مقاومت به همراه داشته است (شکل شماره ۱۲ و ۱۳).



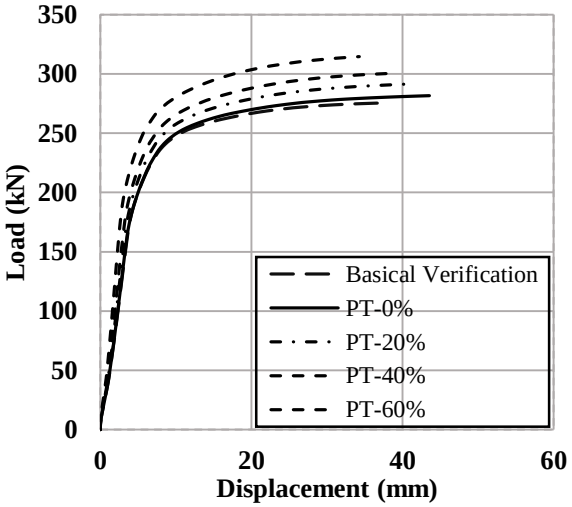
شکل ۱۲– نمودار نیرو – جابه‌جایی نمونه تقویت شده با CFRP با اعمال پیش تنیدگی به میزان ۲۰ درصد



شکل ۱۳– مقایسه نمودار نیرو جابه‌جایی مدل بدون تقویت و مدل تقویت شده با ورق CFRP بدون اعمال پیش تنیدگی و با اعمال پیش تنیدگی به میزان ۲۰ درصد

در ادامه با توجه به روند افزایشی ظرفیت باربری تیر بتنی مسلح تقویت شده با ورق CFRP، به بررسی تأثیر پیش تنیدگی به میزان ۴۰ و ۶۰ درصد ظرفیت کششی مجاز ورق CFRP مورد استفاده پرداخته شده است. با اعمال پیش تنیدگی همان‌طور که در شکل شماره ۱۴ نشان داده شده، افزایش میزان پیش تنیدگی سبب افزایش ظرفیت باربری نمونه تقویت شده به میزان ۱۶/۳۸ درصد نسبت به نمونه تقویت شده بدون پیش تنیدگی شده است. با توجه به روش تقویت و افزایش ظرفیت باربری حاصل شده با استفاده از پیش تنیدگی در ورق CFRP، نتایج تحلیل بیانگر افزایش قابل‌توجه ظرفیت باربری تیر بتنی مسلح نسبت به تیر بدون تقویت می‌باشد. در شکل شماره ۱۴ نیز تأثیر مقادیر متفاوت پیش تنیدگی بر ظرفیت باربری تیر بتنی بدون تقویت نشان داده شده است. همانطور که در شکل شماره ۱۴ مشاهده می گردد، افزایش ظرفیت در نمونه های تقویت شده با اعمال نیروی پیش تنیدگی سبب افزایش سختی نیز شده است. تقویت خمشی با

استفاده از ورق CFRP پیش‌تنیده در تیر بتن مسلح سبب کاهش شکل پذیری می‌شود (جدول شماره ۳).



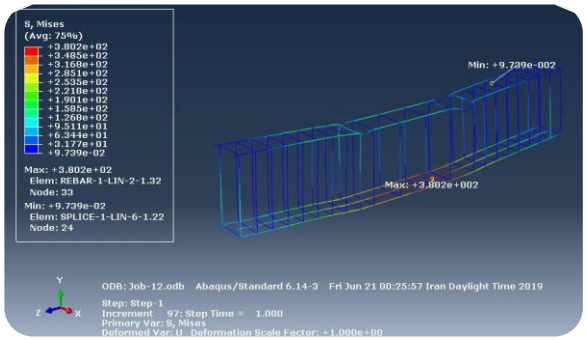
شکل ۱۴– مقایسه نمودار نیرو – جابه‌جایی نمونه های تقویت شده با CFRP با اعمال پیش تنیدگی به میزان ۰، ۲۰، ۴۰ و ۶۰ درصد

جدول ۳– نتایج حاصل از تحلیل عددی تیر بتن مسلح تقویت شده با استفاده از ورق CFRP پیش تنیده

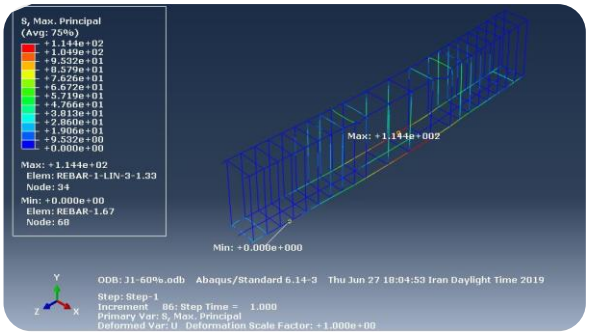
شکل پذیری (μ)	Δ_y (میلی متر)	Δ_u (میلی متر)	مقاومت نهایی (کیلو نیوتن)	میزان پیش تنیدگی (٪)
۵/۶۰	۹/۴۸	۵۳/۰۱	۲۵۵/۶۹	–
۵/۳۳	۸/۱۷	۴۳/۵۵	۲۶۰/۶۷۳	۰
۵/۰۴	۸/۰۱	۴۰/۴۰	۲۶۹/۸۸۲	۲۰
۴/۸۷	۷/۷۷	۳۷/۸۳	۳۰۰/۲۰	۴۰
۴/۵۵	۷/۵۳	۳۴/۲۷	۳۱۴/۶۰	۶۰

در ادامه به بررسی رفتار میلگردها در نمونه بدون تقویت و تقویت شده پرداخته شده است.

همان‌طور که در شکل شماره ۱۵ نشان داده شده، بیشترین تنش ایجاد شده در میلگردهای تیر بتنی بدون تقویت مقدار ۳۸۰/۲ مگاپاسکال می‌باشد که این مقدار برای تیر بتنی تقویت شده با ورق CFRP با اعمال پیش تنیدگی (۶۰ درصد) برابر ۱۱۴/۴ مگاپاسکال می‌باشد (شکل شماره ۱۶) و به میزان ۳۰/۰۸ درصد نسبت به تیر بدون تقویت کاهش‌یافته که این مهم نشان دهنده عملکرد صحیح ورق CFRP به عنوان لایه تقویت در نمونه می‌باشد.

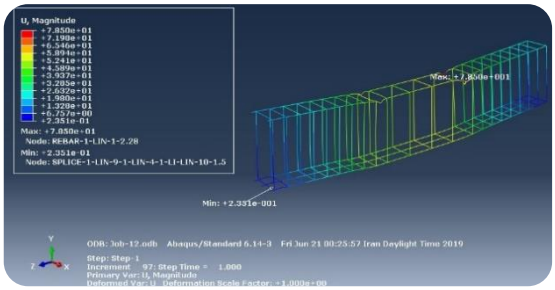


شکل ۱۵– بیشترین و کمترین مقدار تنش ایجاد شده در میلگردهای تیر بتنی بدون تقویت

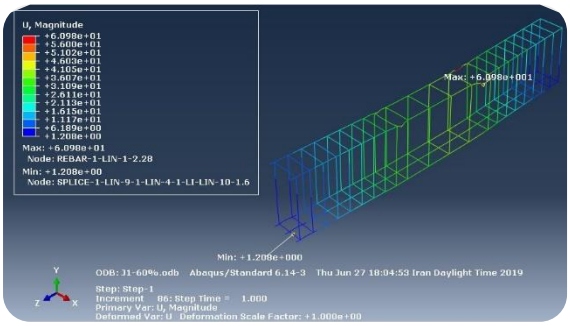


شکل ۱۶– بیشترین و کمترین مقدار تنش ایجاد شده در میلگردهای تیر بتنی تقویت شده با ورق CFRP با اعمال پیش تنیدگی به میزان ۶۰ درصد

یکی دیگر از پارامتر های تأثیر گذار در رفتار نهایی تیر بتن مسلح جابجایی ایجاد شده در میلگرد های طولی در تیر بتن مسلح می باشد. همان طور که در شکل شماره ۱۷ نشان داده شده، بیشترین میزان جا به جایی در میلگرد های طولی تیر بتن مسلح بدون تقویت برابر ۵۸ میلی‌متر می باشد، همچنین بیشترین میزان جابه جایی در میلگرد های طولی نمونه تقویت شده با استفاده از ورق CFRP پیش تنیده (۶۰٪) نیز ۳۲ میلی‌متر می‌باشد. همان طور که در شکل شماره ۱۴ نشان داده شده، استفاده از ورق CFRP به عنوان تقویت خمشی در تیر بتن مسلح سبب کاهش شکل پذیری و افزایش سختی می‌گردد، افزایش سختی به وجود آمده نیز سبب کاهش جا به جایی میلگرد های طولی در تیر بتن مسلح شده است.



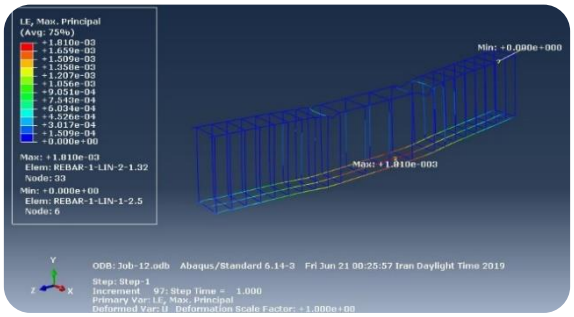
(الف) بیشترین و کمترین مقدار جابه‌جایی ایجاد شده در میلگردهای تیر بتنی بدون تقویت



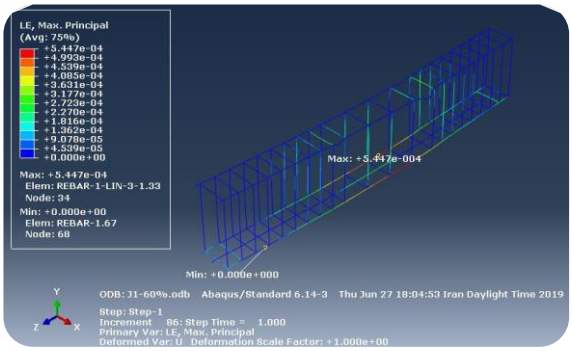
(ب) بیشترین و کمترین مقدار جابه‌جایی ایجاد شده در میلگردهای تیر بتنی تقویت شده با ورق CFRP با اعمال پیش تنیدگی (۶۰ ٪)

شکل ۱۷– بیشترین و کمترین مقدار جابه‌جایی ایجاد شده در میلگردهای تیر بتنی

کرنش پلاستیک به وجود آمده در میلگرد های طولی تیر بتن مسلح بدون تقویت و تیر بتن مسلح تقویت شده با استفاده از ورق CFRP پیش تنیده (۶۰٪) در شکل شماره ۱۸ نشان داده شده است. زمانی که میلگرد های طولی در تیر بتن مسلح وارد ناحیه پلاستیک می شوند در حقیقت مقاومت بتن کاهش پیدا کرده و شکست های خمشی بر روی بتن ظاهر شده است، تغییر در میزان پلاستیک شدن میلگرد های طولی در ناحیه میانی تیر بتن مسلح می تواند الگوی ترک خوردگی تیر را تغییر داده و سبب بهبود رفتار تیر بتن مسلح گردد. همانطور که در شکل شماره ۱۸ مشاهده می گردد، میزان کرنش پلاستیک لگاریتمی در نمونه بدون تقویت برابر ۰/۰۰۱۸ و میزان کرنش پلاستیک لگاریتمی در نمونه تقویت شده با ورق CFRP با اعمال پیش تنیدگی (۶۰ ٪) برابر ۰/۰۰۰۵۴۴ می باشد. این کاهش کرنش پلاستیک در ناحیه میانی تیر بتن مسلح می تواند سبب بهبود رفتار تیر و کاهش میزان ترک ها در این ناحیه گردد.



(الف) بیشترین و کمترین مقدار کرنش پلاستیک لگاریتمی ایجاد شده در میلگردهای تیر بتنی بدون تقویت

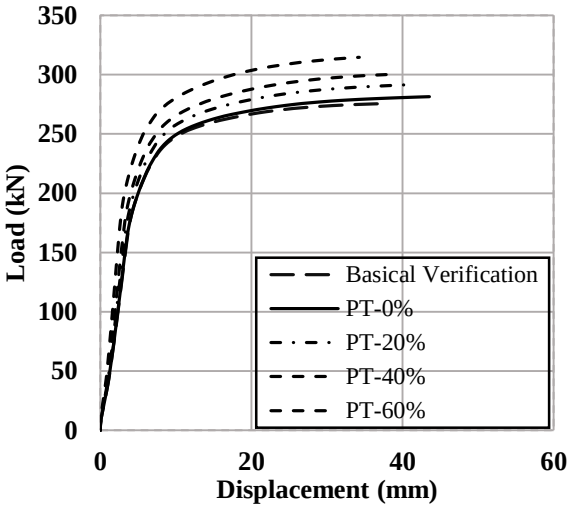


(ب) بیشترین و کمترین مقدار کرنش پلاستیک لگاریتمی ایجاد شده در میلگردهای تیر بتنی تقویت شده با ورق CFRP با اعمال پیش تنیدگی (۶۰ ٪)

شکل ۱۸– بیشترین و کمترین مقدار کرنش پلاستیک لگاریتمی ایجاد شده در میلگردهای تیر بتنی

۳– نتیجه‌گیری

استفاده از این روش مقاوم‌سازی به منظور بالابردن ظرفیت خمشی تیر بتنی مسلح کاربردی و بسیار مفید می‌باشد. با توجه به نمودار نشان داده شده در شکل شماره ۱۹ می‌توان متوجه این مهم شد که استفاده از پیش تنیدگی در ورق CFRP بسیار مؤثر و قابل‌توجه می‌باشد. استفاده از پیش تنیدگی در ورق CFRP علاوه بر افزایش ظرفیت خمشی و مقاومت نهایی در تیر بتن مسلح نوع عملکرد و آسیب‌های وارده را کاهش می‌دهد و سبب بهبود عملکرد خمشی تیر می گردد. لازم به ذکر است این افزایش ظرفیت سبب افزایش سختی می‌گردد و در نتیجه شکل پذیری کاهش پیدا می‌نماید. همچنین همان‌طور که در مطالب پیشین توضیح داده شد، استفاده از این روش تقویت سبب کاهش تنش و کرنش پلاستیک در میلگرد های طولی می گردد که این موضوع می تواند سبب کاهش ترک در ناحیه بحرانی تیر بتن مسلح گردد. هدف از این تحقیق بررسی درصد های متفاوت پیش تنیدگی در ورق CFRP و تأثیرات آن بر عملکرد تیر بتن مسلح بوده است، با توجه به آنالیزها و تحلیل های انجام شده بهترین بازه پیش تنیدگی در ورق را می توان ۳۰ الی ۵۰ درصد مقاومت کششی آن بیان نمود. باتوجه به تجهیزات موجود و چسب‌های ساخته شده توسط شرکت‌های تولید کننده این تکنولوژی، این مقدار پیش تنیدگی قابل انجام و همچنین دارای عملکرد مناسب خواهد بود. این مورد به‌عنوان موضوع پیشنهادی جهت انجام تحقیقات آزمایشگاهی پیشنهاد می‌گردد.



شکل ۱۹– مقایسه نمودار نیرو – جابه‌جایی نمونه های تقویت شده با CFRP با اعمال پیش تنیدگی به میزان ۰، ۲۰، ۴۰ و ۶۰ درصد

مراجع

[1] Du Y, Shao X, Chu S, Zhou F, Su R. Strengthening of preloaded RC beams using prestressed carbon textile reinforced mortar plates. Structures. 2021; 30: 735-744.
[2] Dai J, Lam L, Ueda T. Seismic retrofit of square RC columns with polyethylene terephthalate (PET) fibre reinforced polymer composites. Construction and Building Materials. 2012; 27 (1): 206-217.
[3] Choi E, Cho B, Lee S. Seismic retrofit of circular RC columns through using tensioned GFRP wires winding. Composites Part B: Engineering. 2015; 83: 216-225.
[4] Shoukry M, Tarabia A, Abdelrahman M. Seismic retrofit of deficient exterior RC beam-column joints using steel plates and angles. Alexandria Engineering Journal. 2021.
[5] Le Nguyen K, Brun M, Limam A, Ferrier E, Michel L. Pushover experiment and numerical analyses on CFRP-retrofit concrete shear walls with different aspect ratios. Composite Structures. 2014; 113: 403-418.
[6] Ghalehnovi M, Karimipour A, Anvari A, Brito J. Flexural strength enhancement of recycled aggregate concrete beams with steel fibre-reinforced concrete jacket. Engineering Structures. 2021; 240.
[7] Ma G, Wu C, Hwang H, Li B. Crack monitoring and damage assessment of BFRP-jacketed concrete cylinders under compression load based on acoustic emission techniques. Construction and Building Materials. 2021; 272.
[8] Liang H, Li W, Huang Y, Lu Y. Axial behaviour of CFST stub columns strengthened with steel tube and sandwiched concrete jackets. Thin-Walled Structures. 2020; 155.
[9] Xu C, Guo C, Xu Q, Yang Z. The global collapse resistance capacity of a seismic-damaged SRC frame strengthened with an enveloped steel jacket. Structures. 2021; 33: 3433-3442.
[10] Trapani F, Pio Sberna A, Carlo Marano G. new genetic algorithm-based framework for optimized design of steel-jacketing retrofitting in shear-critical and ductility-critical RC frame structures. Engineering Structures. 2021; 243.
[11] Shin J, Jeon J, Wright T. Seismic mobile shaker testing of full-scale RC building frames with high-strength NSM-FRP hybrid retrofit system. Composite Structures. 2019; 226.
[12] Shin J, Jeon J. Retrofit scheme of FRP jacketing system for blast damage mitigation of non-ductile RC building frames. Composite Structures. 2019; 228.
[13] Mostofinejad D, Hosseini S. Simulating FRP debonding from concrete surface in FRP strengthened RC beams: A case study. Scientia Iranica A. 2017; 24 (2): 452-466.
[14] Dong W, Wua Z, Zhou X. Calculating crack extension resistance of concrete based on a new crack propagation criterion. Construction and Building Materials. 2013; 38: 879–889.
[15] Smith S, Hu S, Kim S, Seracino R. FRP-strengthened RC slabs anchored with FRP anchors. Engineering Structure. 2011; 33: 1075–87.
[16] Al-Mahaidi R, Kalfat R. Investigation into CFRP laminate anchorage systems utilising bi-directional fabric wrap. Composite Structure. 2011; 93: 1265–74.
[17] Ghani Razaqpur A, Cameron R, Mostafa A. Strengthening of RC beams with externally bonded and anchored thick CFRP laminate. Composite Structures. 2019.
[18] Bank L, Arora D. Analysis of RC beams strengthened with mechanically fastened FRP (MF-FRP) strips. Composite Structures. 2007; 79 (2): 180–191.
[19] Jin L, Lan Y, Zhang R, Du X. Numerical analysis of the mechanical behavior of the impact-damaged RC beams strengthened with CFRP. Composite Structures. 2021; 274.
[20] Abdallah M, Mahmoud F, Khelil A, Mercier J. Efficiency of EB CFRP composites for flexural strengthening of continuous RC beams: A comparative study with NSM CFRP rods. Structures. 2021; 34: 1567-1588.
[21] Siwowski T, Piątek B, Siwowska P, Wiater A. Development and implementation of CFRP post-tensioning system for bridge strengthening. Engineering Structures. 2020; 207.

[22] Miller T, Chajes M, Mertz D, Hastings J. Strengthening of a steel bridge girder using CFRP plates. Bridge Engineering. 2001; 6: 514–22.
[23] Piątek B, Siwowski T. Investigation of strengthening effectiveness of reinforced concrete bridge with prestressed CFRP strips. Roads Bridges-Drogi i Mosty. 2018; 15 (4): 301–14.
[24] Alsayed S, Siddiqui N. Reliability of shear-deficient RC beams strengthened with CFRP-strips. Construction and Building Materials. 2013; 42: 238-247.
[25] Nurjaman H, Faizal L, Sidjabat H, Hariandja B, Put Y, Rivky R. Application of Precast System Buildings with Using Connection of Unbonded Post-tension and Local Dissipater Device. Procedia Engineering. 2014; 75 (87).
[26] Burningham A, Pantelides P, Reaveley D. Repair of reinforced concrete deep beams using post-tensioned CFRP rods. Composite Structures. 2015; 125: 256–265.
[27] Bedon C, Louter C. Numerical analysis of glass-FRP post-tensioned beams – Review and assessment. Composite Structures. 2017; 177 (1): 129-140.
[28] El-Azab A, Mohamed H. Effect of tension lap splice on the behavior of high strength concrete (HSC) beams. HBRC Journal. 2014; 10: 287–297.
[29] Lee J, Fenves G. Plastic-damage model for cyclic loading of concrete structures. Journal of Engineering Mechanics. 1998; 124 (8): 892–900.
[30] ABAQUS Theory Manual, 6.6.
[31] ASTM C78 / C78M Standard test method for flexural strength of concrete (Using Simple Beam with Third-Point Loading). 2018.

Numerical Investigation of CFRP Aminate Post Tensioning Effect on RC Beam Performance and Flexural Capacity

Alireza Mirzaee
PhD Candidate, Department of Civil Engineering, Marvdasht Branch, Islamic Azad University, Marvdasht, Iran
Ashkan Torabi*
Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Marvdasht Branch, Islamic Azad University, Marvdasht, Iran
Arash Totonchi
Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Marvdasht Branch, Islamic Azad University, Marvdasht, Iran

Abstract

Construction of reinforced concrete buildings is known as one of the most common and widely used construction methods in the world and a large number of buildings and other structures are built applying these materials every year. Advances in engineering sciences and the utility of new materials have improved the quality of construction and industry. The utilization of materials such as FRP or prestressed and post-tensioned systems has been considered by many engineers due to researches performed and their proper performance during past earthquakes. In the present research, using ABAQUS software, the effect of flexural reinforcement of reinforced concrete beams using prestressed CFRP laminate (Carbon fiber reinforced polymers) has been investigated as a new and widely used method in strengthening and improving the performance of concrete beams. Different percentages of prestressing force according to the tensile capacity of CFRP laminate as an effective parameter in the final strength, have been investigated in this study. The results exhibit that the use of prestressing in CFRP laminate owing to its high tensile capacity and intrinsic performance can have a significant effect on increasing the stiffness and final strength of reinforced concrete beams. Analyses in this field indicate that the amount of prestressing force should not be more than 30% of the tensile strength of the- laminate, which is one of the cases mentioned by recent researches. Prestressing in the laminates also changes the cracking pattern in the critical area of the reinforced concrete beams.

Key words: CFRP Laminate, RC Beam, ABAQUS software, Prestressing, Tensile Capacity, Retrofitting

This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license: (http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).