

بررسی رفتار خمشی و شکل پذیری تیر پل های بتنی T شکل مقاوم سازی شده با CFRP پیش تنیده

کیان آغنی

دانشجوی دکتری مهندسی عمران-سازه، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی سهند.

حسن افشین*

دانشیار گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی سهند.

کریم عابدی

استاد گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی سهند.

چکیده

یکی از روش های مؤثر در مقاوم سازی اعضای بتن آرمه، استفاده از کامپوزیت های CFRP می باشد. با وجود اینکه این روش دارای مزایای بسیاری می باشد، نتایج آزمایشات نشان داده اند که CFRP ها از ۳۰٪ الی ۴۰٪ ظرفیت خود در حین مقاوم سازی تیرها و دال های بتنی استفاده کرده و پیش از رسیدن به حداکثر ظرفیت خود دچار پدیده جداشدگی (Debonding) می شوند. بدین دلیل ایجاد پیش تنیدگی در CFRP از راهکارهای مناسب جهت استفاده حداکثری از ظرفیت آن ها و نیز به تاخیر انداختن پدیده جداشدگی هنگام مقاوم سازی می باشد. هدف تحقیق حاضر بررسی تأثیر این روش مقاوم سازی در رفتار خمشی و شکل پذیری تیر پل های بتن آرمه می باشد. در این تحقیق ۸ نمونه تیر T شکل بتنی مقیاس شده به ابعاد (۲۵۰×۳۰۰×۳۰۰۰ mm) در چهار سری، نمونه های کنترلی، نمونه های مقاوم سازی شده با CFRP، نمونه های مقاوم سازی شده با CFRP پیش تنیده به میزان ۲۰٪ و ۳۵٪، ساخته شده اند. به منظور ایجاد پیش تنیدگی در CFRP ها، از یک چینش مکانیکی نوین استفاده شده است. در ادامه، نمونه ها تحت بارگذاری خمشی چهار نقطه ای فراینده قرار گرفته و رفتار آن ها بررسی شده است. نتایج حاکی از آن است که ایجاد پیش تنیدگی در کامپوزیت باعث افزایش محسوس ظرفیت باربری و نیز بهبود مکانیزم شکست نسبت به حالت مقاوم سازی شده با CFRP بدون پیش تنیدگی شده است. همچنین نتایج نشان می دهند که کاهش شکل پذیری تیرها با افزایش میزان پیش تنیدگی کامپوزیت تا ۳۵٪، نسبت به حالت بدون پیش تنیدگی، کمتر از ۱۰٪ می باشد. به علاوه، یک روش عددی جهت شبیه سازی مناسب رفتار تیرهای بتنی مقاوم سازی شده با CFRP پیش تنیده با استفاده از کدنویسی سابروتین ها در نرم افزار ABAQUS ارائه شده است.

واژه های کلیدی: مقاوم سازی، تیرهای بتنی، کامپوزیت CFRP، پیش تنیده، ABAQUS.

* نویسنده مسئول: hafshin@sut.ac.ir

۱- مقدمه

همچنین CFRP ها بدلیل دارا بودن مقاومت بالا و رفتار تقریباً الاستیک تا نقطه پارگی، نسبت به مابقی FRP ها در امر پیش‌تندگی و استفاده جهت مقاوم‌سازی اعضای بتنی در اولویت هستند. همچنین، مطالعات متعددی به بررسی اثر مقدار پیش‌تندگی FRP بر رفتار تیرهای بتنی پرداخته است. Yang و همکاران [10] به بررسی رفتار خمشی تیرهای بتن‌آرمه تقویت شده با CFRP پیش‌تندیده و اثر میزان پیش‌تندگی کامپوزیت را مورد مطالعه قرار دادند. نتایج آنها حاکی از افزایش ۱۴۰٪ ظرفیت باربری در تیرهای تقویت شده بود. Woo و همکاران [16] همچنین نتایج مشابهی به دست آورده و افزایش ۲۰۰٪ را در تیر بتن‌آرمه تقویت شده با صفحات CFRP پیش‌تندیده در مقایسه با آنهایی که با CFRP های غیر پیش‌تندیده تقویت شده بودند، گزارش کردند. Hong و Park [17] اثرات میزان پیش‌تندگی CFRP را در ایجاد پدیده جدایش و نحوه خرابی تیرهای بتن‌آرمه تقویت شده با CFRP پیش‌تندیده مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها گزارش کردند که میزان بالای پیش‌تندگی منجر به پارگی CFRP می‌شود. آنها همچنین خاطر نشان کردند که استفاده از مهار انتهایی، پدیده جداشدگی را به تاخیر می‌اندازد.

نقش سیستم مهاری و مقاومت فشاری بتن بر رفتار خمشی تیرهای بتن‌آرمه مقاوم‌سازی شده توسط CFRP پیش‌تندیده توسط Woo و همکاران مورد مطالعه قرار گرفت [16]. آنها نتیجه گرفتند که مقاومت فشاری بتن تنها زمانی بر رفتار تیرهای بتنی تأثیر می‌گذارد که میزان پیش‌تندگی پایین باشد. علاوه بر این، آنها نشان دادند که سیستم مهاری باعث افزایش کارایی سیستم مقاوم‌سازی می‌شود. Abdulhammed و همکاران [18] رفتار دو تیر تقویت شده با CFRP پیش‌تندیده را که به میزان ۱۳٪ و ۲۵٪ مقاومت حداکثر کامپوزیت، پیش‌تندیده شده بودند، مورد مطالعه قرار دادند و به ترتیب افزایش ۲۸٪ و ۴۹٪ را در ظرفیت باربری تیرهای تقویت شده نسبت به تیر کنترلی (تقویت نشده) گزارش کردند. آنها همچنین خاطر نشان کردند که پارگی CFRP فقط در تیر تقویت شده با CFRP پیش‌تندیده شده به میزان ۲۵٪ مشاهده شده است. اگرچه طیف وسیعی از سطوح پیش‌تندگی CFRP در مطالعات پیشین اعمال شده است، حداکثر سطح پیش‌تندگی گزارش شده، ۵۰٪ مقاومت کششی کامپوزیت بوده که تضمین‌کننده عملکرد مناسب سیستم مقاوم‌سازی باشد [9,11,19].

از پلیمرهای تقویت شده با الیاف (FRP) به دلیل دارا بودن خواص مکانیکی عالی به طور گسترده‌ای در بهسازی و مقاوم‌سازی اعضای سازه‌های بتن مسلح (RC) استفاده می‌شود. FRP ها دارای انواع مختلفی از جمله کامپوزیت تقویت شده با الیاف کربنی (CFRP)، الیاف شیشه‌ای (GFRP)، الیاف آرامیدی (AFRP) و الیاف بازالتی (BFRP) می‌باشند که هر یک برای اهداف مختلفی مورد استفاده قرار می‌گیرند. انواع FRP ها به طور گسترده‌ای در مقاوم‌سازی اعضای بتنی با استفاده از روش‌های چسباندن روی سطح (EBR)، مقاوم‌سازی نزدیک به سطح (NSM) و روش نوین آماده‌سازی سطح خارجی بتن به روش شیارزنی (EBROG و EBRIG) مورد استفاده قرار گرفته و نتایج مناسبی نیز حاصل شده است [1,2]. در این میان، روش مقاوم‌سازی EBR دارای معایبی نیز می‌باشد که مهم‌ترین آن، عدم استفاده از حداکثر ظرفیت FRP و جدایش (Debonding) ایجاد شده مابین سطح بتنی و FRP می‌باشد. نتایج تحقیقات آزمایشگاهی و عددی موجود نشان می‌دهند که جداشدگی سبب می‌شود که FRP تنها از ۳۰٪ الی ۴۰٪ ظرفیت خود استفاده کند [3-8]. یکی از راهکارهای پیشنهاد شده جهت افزایش کارایی استفاده از FRP ها در مقاوم‌سازی به روش EBR و نیز به تاخیر انداختن جدایش، ایجاد پیش‌تندگی در کامپوزیت FRP می‌باشد [9-11]. در این روش، FRP بر اساس درصدی از استحکام کششی نهایی خود (UTS) قبل یا در حین اجرای مقاوم‌سازی پیش‌تندیده شده و سپس به عضو بتنی متصل می‌شود. از آنجایی که FRP ها تا زمان شکست رفتار تقریباً الاستیک از خود نشان می‌دهند [12,13]، پیش‌تندگی باعث می‌شود که FRP مقاومت بیشتری از خود نشان داده و عملکرد سیستم را بهبود بخشد.

در بحث تقویت تیرهای بتن‌آرمه با FRP های پیش‌تندیده چهار پارامتر نوع کامپوزیت، میزان پیش‌تندگی، سیستم مهاری و سیستم پیش‌تندگی تأثیر بسزایی دارند. CFRP کمترین حساسیت را به پدیده خزش از خود نشان داده است در حالی که GFRP و AFRP به خزش بسیار حساس بوده و در بلندمدت نزدیک به ۵۰٪ و ۷۰٪ مقاومت خود را از دست می‌دهند [14]. همچنین مطالعات متعددی در این زمینه انجام شده و نتایج نشان دادند که پیش‌تندگی ایجاد شده در CFRP ها باید به ۵۰٪ محدود شود [10,11,15].

برخی از مطالعات با هدف ارزیابی و شبیه‌سازی عددی اثرات پیش‌تندگی FRP در مقاوم‌سازی تیرهای بتن‌آرمه انجام شده است. Yang و همکاران [10] یک مدل عددی دو بعدی ساده‌سازی شده را برای تخمین رفتار خمشی تیرهای بتن‌آرمه تقویت شده توسط صفحات CFRP پیش‌تندیه ارائه دادند. Kim و همکاران [25] به شبیه‌سازی دوبعدی تیرپل‌های بتنی تقویت شده با CFRP پیش‌تندیه پرداختند. آنها از عناصر پوسته (Shell) سه بعدی الاستیک برای مدل‌سازی تیر بتنی و عناصر تیری (Beam) برای مدل‌سازی میله‌های CFRP استفاده کردند. Rezazadeh و همکاران [26] به بررسی عددی اثرات ورق‌های CFRP پیش‌تندیه بر رفتار خمشی تیرهای بتن‌آرمه پرداختند. آنها از مدل‌سازی عناصر محدود سه بعدی با در نظر گرفتن یک مدل پلاستیسیته کامل برای مدل‌سازی چسب بین CFRP و بتن استفاده کردند. چند مطالعه دیگر نیز از روش‌های مشابهی برای مدل‌سازی تیرها بتن‌آرمه تقویت شده با FRP‌های پیش‌تندیه استفاده کردند [18,25,27]. با این وجود، مشکلاتی در مدل‌سازی اعم از شبیه‌سازی صحیح نیروی پیش‌تندگی و سیستم مهاری همچنان وجود دارد.

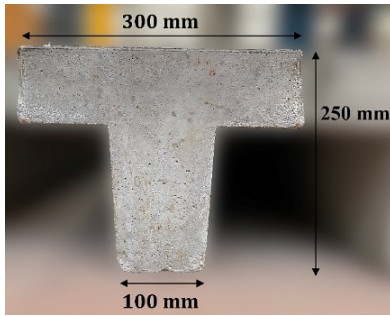
هدف مطالعه حاضر ارزیابی اثرات پیش‌تندگی ورق‌های CFRP بر رفتار خمشی تیرپل‌های بتن‌آرمه به همراه توسعه یک روش عددی برای شبیه‌سازی رفتار خمشی آنها می‌باشد. در این راستا، این پژوهش از دو بخش برنامه آزمایشگاهی و مدل‌سازی عددی تشکیل شده است. برای بخش اول، تیرپل‌های بتنی T شکل توسط CFRP پیش‌تندیه با دو سطح پیش‌تندگی ۲۰٪ و ۳۵٪ مورد مقاوم‌سازی قرار گرفته و رفتار آنها با تیرهای کنترلی (مقاوم‌سازی نشده) و تیرهای مقاوم‌سازی شده با CFRP بدون پیش‌تندگی مقایسه شده است. همچنین، یک چینش مکانیکی کاربردی برای سیستم پیش‌تندگی به دلیل عریض بودن ورق‌های CFRP ارائه شده است. جهت اطمینان از ایجاد پیش‌تندگی صحیح در کامپوزیت‌ها، نیروی پیش‌تندگی ایجاد شده در ورق‌های CFRP هر ۲۴ ساعت تا پیش از آزمایش بارگذاری اندازه‌گیری شده است. برای مدل‌سازی عددی، روشی برای ایجاد تدریجی نیروی پیش‌تندگی به سیستم و مدل‌سازی رفتار تیرهای بتن‌آرمه مقاوم‌سازی با CFRP پیش‌تندیه با استفاده از کدنویسی سابروتین‌ها در نرم‌افزار ABAQUS ارائه شده و با نتایج

توجه به شکل‌پذیری تیرهای تقویت‌شده با CFRP‌های پیش‌تندیه، مطالعات متعددی نشان دادند که تیرهای تقویت‌شده، شکل‌پذیری تقریباً معادل تیرهای تقویت نشده را زمانی که مقدار پیش‌تندگی CFRP به ۲۰٪ الی ۴۰٪ محدود می‌شود، نشان می‌دهند [11,16].

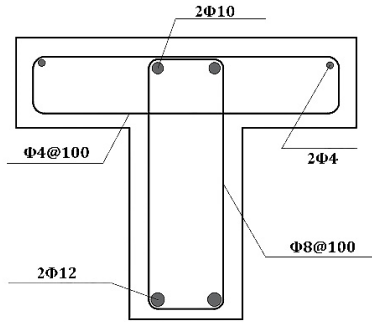
علاوه بر سیستم‌های مهاری معمول که شامل دورپیچ‌های U شکل کامپوزیتی می‌باشند، چندین سیستم مهاری در مطالعات پیشین پیشنهاد شده‌اند. Xue و همکاران [20] یک سیستم مهاری متشکل از پیچ و صفحات فولادی که سبب مهار CFRP در انتهای تیر بتنی می‌شود را پیشنهاد دادند. در حالی که سیستم مذکور برای سطوح پیش‌تندگی کمتر از ۵۰٪ کارآمد است، نیاز به دسترسی به انتهای تیر بتنی داشت. You و همکاران [21] سیستمی را توسعه دادند که CFRP را توسط پیچ و گیره‌های فولادی به تیر بتنی متصل می‌کند. نتایج آزمایشات آنها نشان داد که سیستم مهاری مذکور برای میزان پیش‌تندگی کمتر از ۵۰٪، عملکرد مناسبی از خود نشان می‌دهد. سیستم‌های مهاری مشابهی توسط Pellegrino و Modena [22] و Wang و همکاران [23] پیشنهاد شده است. علاوه بر این، استفاده از صفحات بریده شده GFRP [10] و نیز ایجاد انحنا در گیره‌های فولادی [16] جهت جلوگیری از لغزش کامپوزیت حین عملیات مقاوم‌سازی نیز در مطالعات پیشنهاد شده است. با وجود آنکه سیستم‌های مهاری متعددی در مطالعات گذشته توسعه و پیشنهاد داده شده، امکان سنجی آنها در موارد عملی محدود است. همچنین یکی دیگر از چالش‌های این سیستم‌های مهاری با هزینه آنها مرتبط است.

سیستم‌های پیش‌تندگی متنوعی توسط محققین جهت ایجاد پیش‌تندگی در کامپوزیت‌ها ارائه شده‌اند. با در نظر گرفتن امکان کاربرد میدانی، رایج‌ترین سیستم‌های مورد استفاده جک‌های هیدرولیک و چینش‌های مکانیکی می‌باشند [11,24]. توانایی ایجاد مقادیر مختلف پیش‌تندگی، کاربرد در ارتفاع و محدودیت‌های معماری از چالش‌های اصلی در هنگام استفاده از سیستم پیش‌تندگی می‌باشند. اگر سیستم تقویتی از میله‌های FRP یا ورق با عرض کم تشکیل شده باشد، جک‌های هیدرولیک گزینه ایده‌آلی برای سیستم پیش‌تندگی به نظر می‌رسند. با این حال، با افزایش عرض FRP، محدودیت‌هایی برای یک روش پیش‌تندگی اعمال می‌شود.

آزمایشگاهی اعتبارسنجی شده است.



(الف)



(ب)

شکل ۱- سطح مقطع تیر بتنی؛ (a) مقطع تیر؛ (b) آرماتورگذاری تیر (اندازه‌ها به میلی‌متر)

همچنین، نسبت عمق به عرض مؤثر برای تیرهای تیپ غیر پیش‌تینده آیین‌نامه AASHTO [29] برابر $1/75$ الی $2/07$ می‌باشد. با فرض حداقل عمق لازم، بازه عرض مؤثر مناسب تیر مناسب بتن (در اینجا ۲۵ میلی‌متر)، عمق و عرض مؤثر مقطع به ترتیب برابر ۲۵۰ میلی‌متر و ۱۰۰ میلی‌متر در نظر گرفته شده است. بتن مورد استفاده در تیرها از نوع بتن خودتراکم (SCC) دارای مقاومت فشاری ۲۸ روزه (میانگین) $41/8 \text{ MPa}$ می‌باشند. افزایش در مقاومت فشاری بتن توسط نمونه‌های شاهد که در سن ۹۰ روز مورد آزمایش قرار داده شدند، بررسی شده است. به طور میانگین، افزایش مقاومت ۲۶٪ در مقاومت فشاری نمونه‌ها مابین سن ۲۸ روز و ۹۰ مشاهده شد. در فاصله میان سن ۹۰ روز و ۷ ماه، افزایش محسوسی در مقاومت فشاری نمونه‌ها یافت نشد. مشخصات مکانیکی آرماتورهای مورد استفاده در جدول ۱ داده شده است. آرماتورهای ناحیه کششی و فشاری به ترتیب برابر $2\Phi 10$ و $2\Phi 12$ می‌باشند ($\frac{\rho}{\rho_b} = 0/26$) که سبب رفتار شکل‌پذیر تیر می‌شوند. از میلگرد با قطر ۸ میلی‌متر در فواصل ۱۰۰ میلی‌متر برای آرماتورهای برشی ($\frac{A_v}{s} = 1/00 > \frac{A_{v,min}}{s} = 0/01$) استفاده شده است

۲- دلایل استفاده از پیش‌تندگی جهت بهبود کارایی

کامپوزیت‌های CFRP در مقاوم‌سازی تیرهای بتن آرمه

در هنگام مقاوم‌سازی تیرهای بتنی با کامپوزیت‌های CFRP به روش چسباندن روی سطح (EBR)، تنش ایجاد شده حین بارگذاری توسط لایه چسب به کامپوزیت منتقل گردیده و سبب ایجاد کرنش/تنش در کامپوزیت می‌شود. به دلیل وجود تفاوت زیاد در مقاومت کششی کامپوزیت‌های CFRP با مقاومت لایه چسبی و بتن، جدایش کامپوزیت از لایه چسبی و سطح بتن عموماً در مقاوم‌سازی تیرهای بتنی به روش EBR اتفاق می‌افتد [12].

همانطور که پیش‌تر اشاره شده، CFRPها دارای رفتار تقریباً الاستیک تا نقطه خرابی (گسیختگی) می‌باشند. در این راستا، ایجاد پیش‌تندگی در کامپوزیت قبل و یا حین مقاوم‌سازی تیرهای بتنی باعث می‌شود که کامپوزیت در هنگام بارگذاری، متحمل کرنش بیشتری شده و مقاومت قابل توجهی را از خود نشان دهد [10,12]. این میزان افزایش در مقاومت سبب می‌شود که CFRP درصد بیشتری از مقاومت کششی خود را در حین بارگذاری تیر بتنی استفاده نموده و حتی به مقاومت گسیختگی خود نزدیک شود. در نتیجه، ایجاد پیش‌تندگی در کامپوزیت CFRP علاوه بر افزایش مقاومت خمشی تیر بتنی نسبت به حالت بدون پیش‌تندگی کامپوزیت، سبب جلوگیری (یا به تأخیر انداختن) پدیده جدایش و افزایش کارایی سیستم مقاوم‌سازی نیز می‌شود [10,28].

۳- برنامه آزمایشگاهی

۳-۱- معرفی نمونه‌ها

در این پژوهش، تعداد ۸ نمونه تیر بتنی T شکل به طول ۳۰۰۰ میلی‌متر و عمق ۲۵۰ میلی‌متر مطابق شکل ۱ ساخته شده و به صورت خمشی مورد مقاوم‌سازی قرار گرفته‌اند. بر اساس آیین‌نامه AASHTO [29]، نسبت عمق به دهانه تیرپل‌های بتن آرمه T شکل، حداقل برابر $0/07$ می‌باشد. با توجه به شرایط آزمایشگاهی طول کلی تیرها برابر ۳۰۰۰ میلی‌متر در نظر گرفته شده است. در نتیجه، حداقل عمق لازم برای تیرها برابر ۲۰۰ میلی‌متر محاسبه می‌شود.

میلی متر و با عرض ۱۰۰ میلی متر استفاده شده است. مشخصات مکانیکی آزمایش شده کامپوزیت (بدست آمده از آزمایش کشش تک محوره) مذکور مطابق جدول ۳ می باشد. چسب مورد استفاده در این پژوهش از نوع رزین اپوکسی دو جزئی با نسبت اختلاط ۱:۳ (۱ برای سخت کننده و ۳ برای مواد پایه) بوده که مشخصات مکانیکی آن در جدول ۴ ارائه شده است.

جدول ۳- مشخصات مکانیکی کامپوزیت CFRP

تنش حداکثر	مدول الاستیک	کرنش پارگی
۴۸۰۰ MPa	۲۳۰ GPa	٪ ۱/۸

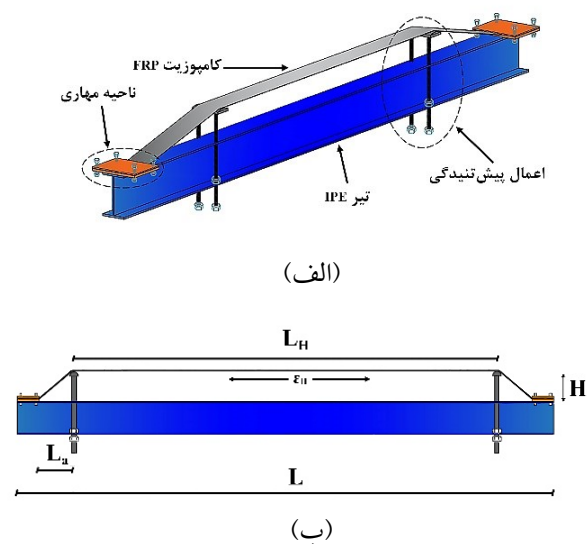
جدول ۴- مشخصات مکانیکی چسب

مدول اولیه	مقاومت خمشی	مقاومت کششی
۴/۲ MPa	۴۶/۱ MPa	۵۸/۹ MPa

۲-۳- پیش تنیدگی CFRP و نحوه مقاوم سازی تیرها

۱-۲-۳- چینش مکانیکی جهت اعمال پیش تنیدگی

به منظور ایجاد پیش تنیدگی در CFRP از چینش مکانیکی مطابق شکل ۲ استفاده شده است



شکل ۲- طرح چینش مکانیکی نوین جهت پیش تنیدگی

CFRP؛ الف) نمای کلی؛ ب) نمای جانبی

در این چینش، ابتدا کامپوزیت بر روی یک تیر فولادی (تیر IPE) قرار داده شده و از ابتدا و انتها مهار می شود. سپس توسط سازوکار

جدول ۱- مشخصات مکانیکی آرماتورهای فولادی

قطر (mm)	تنش تسلیم (MPa)	تنش حداکثر (MPa)	کشامد (٪)
۱۲	۵۰۲	۶۳۰	۱۸
۱۰	۴۳۰	۵۶۱	۱۹
۸	۴۲۲	۵۸۰	۲۲
۴*	۱۳۰	-	-

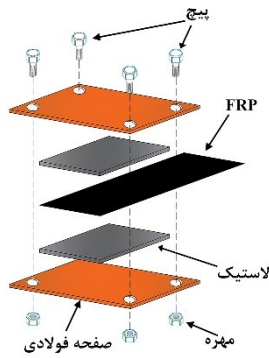
*میلگرد صاف

به علاوه، میلگرد با قطر ۴ میلی متر برای نگهداری شبکه آرماتورها استفاده شده است. ظرفیت برشی تئوریک تیرها برابر ۶۳/۷۷ kN بوده که سبب بار حداکثری ۱۲۷/۵۴ kN می شود. همچنین، ظرفیت خمشی تئوریک تیرها برابر ۲۱/۳۰ kN.m بوده که سبب بار حداکثری ۴۸/۸۰ kN می شود. در نتیجه، خرابی خمشی برای تمامی تیرهای T شکل پیش بینی می شود. از ۸ نمونه تیر T شکل، دو نمونه به عنوان تیر کنترلی، دو نمونه به عنوان تیر مقاوم سازی شده با CFRP بدون پیش تنیدگی، چهار نمونه به عنوان تیر مقاوم سازی با CFRP با پیش تنیدگی به میزان ۲۰٪ و ۳۵٪ می باشند (جدول ۲).

جدول ۲- نحوه مقاوم سازی و نامگذاری تیرهای بتنی مقاوم سازی شده

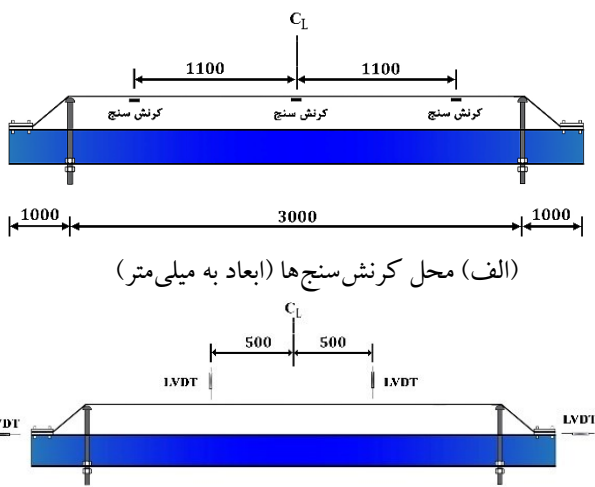
نام گذاری	نحوه مقاوم سازی
CB 1 & CB 2	تیر کنترلی T شکل - بدون مقاوم سازی
RB 1 & RB 2	تیر T شکل مقاوم سازی شده با CFRP بدون پیش تنیدگی
P20RB 1 & P20RB 2	تیر T شکل مقاوم سازی شده با CFRP با ۲۰٪ پیش تنیدگی
P35RB 1 & P35RB 2	تیر T شکل مقاوم سازی شده با CFRP با ۳۵٪ پیش تنیدگی

با توجه به اینکه در مطالعات پیشین مقادیر ۲۰٪ الی ۴۰٪ پیش تنیدگی برای کامپوزیت با در نظرگیری افزایش کارایی کامپوزیت ها و نیز تأمین شکل پذیری مناسب تیرها پیشنهاد شده است، در این پژوهش مقادیر ۲۰٪ و ۳۵٪ برای حفظ کارایی مناسب سیستم مقاوم سازی و نیز بررسی اثر پیش تنیدگی بر رفتار تیرهای بتنی در نظر گرفته شده اند. برای مقاوم سازی تمامی تیرها از CFRP تک جهته به ضخامت ۰/۱۶۵ میلی متر، به طول ۳۰۰۰



شکل ۴- مشخصات ناحیه مهاري

در این پژوهش، مقدار طول و ضخامت صفحه مهاري به ترتیب برابر ۲۰۰ میلی متر و ۲۰ میلی متر در نظر گرفته شده است. پیچ‌های اصطکاکی متصل کننده صفحات فولادی از نوع مقاومت بالا A325 بوده و قطر اسمی آنها برابر ۱۶ میلی متر می‌باشند. جهت ایجاد اتصال اصطکاکی در محل مهارها از روش اعمال نیروی پیش‌تندگی بر پیچ با استفاده از آچار ترک‌متر (Torque meter) استفاده شده است. لاستیک‌های موجود در ناحیه مهاري دارای ابعاد ۲۰۰×۱۰۰ میلی متر بوده و از نوع با مقاومت بالا و ضد سایش با ضخامت ۱۰ میلی متر می‌باشند. به منظور اطمینان از میزان پیش‌تندگی ایجاد شده در کامپوزیت‌ها حین ارتفاع‌دهی، از سه کرنش‌سنج (که در طول کامپوزیت قرار گرفته‌اند) جهت ثبت کرنش ایجاد شده در کامپوزیت و نیز از چهار LVDT جهت ثبت میزان ارتفاع‌دهی و هرگونه لغزش (تغییر مکان‌های احتمالی ناحیه مهاري در ابتدا و انتها)، استفاده شده است (شکل ۵).

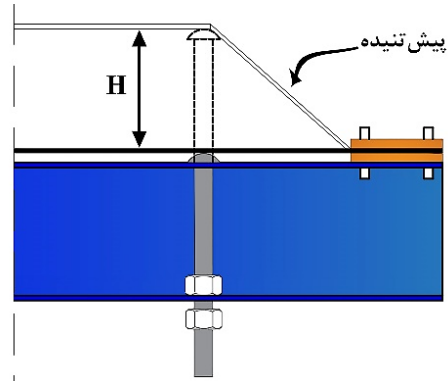


(الف) محل کرنش‌سنج‌ها (ابعاد به میلی‌متر)

(ب) محل LVDTها (ابعاد به میلی‌متر)

شکل ۵- محل تجهیزات ثبت داده‌ها

تسمه فولادی- پیچ متری- مهره، مورد کشش قرار می‌گیرد. با توجه به اینکه طول کامپوزیت توسط ناحیه مهاري ثابت نگاه داشته شده، ارتفاع‌دهی کامپوزیت باعث ایجاد پیش‌تندگی در آن می‌شود. شکل ۳ کامپوزیت CFRP را قبل و بعد از اعمال پیش‌تندگی با استفاده از چینش مکانیکی مذکور نشان می‌دهد.



شکل ۳- نحوه پیش‌تندگی کامپوزیت

از آنجایی که کامپوزیت‌های FRP دارای رفتار الاستیک خطی تا لحظه پارگی می‌باشند [28]، رابطه‌ای مستقیم مابین میزان ارتفاع‌دهی و کرنش ایجاد شده در کامپوزیت را می‌توان به وسیله برقراری رابطه تعادل به صورت زیر به دست آورد:

$$\varepsilon_H = \frac{(L - L_H) \left[\sqrt{\frac{(L - L_H)^2}{4} + H^2} + \frac{(L_H - L)}{2} \right]}{L_H \left(\frac{L - L_H}{2} \right) + \left[\frac{(L - L_H)^2}{2} + 2H^2 \right]} \quad (1)$$

که در آن L ، L_H ، H و ε_H به ترتیب طول کلی کامپوزیت، طول ناحیه ارتفاع داده شده، میزان بلندشدگی و کرنش ایجاد شده در ناحیه ارتفاع داده شده کامپوزیت می‌باشد. با توجه به روابط مذکور، مقدار L_H برابر طول ناحیه مقاوم‌سازی (در اینجا، ۳۰۰۰ میلی‌متر) بوده و طول ناحیه انتقال $(L_a = \frac{L - L_H}{2})$ برابر ۸۰۰ میلی‌متر در نظر گرفته شده است. جهت بدست آوردن مقطع مناسب، از روش آزمون و خطا استفاده شده و نتیجتاً IPE20 به طول ۵۰۰۰ میلی‌متر برای مقطع تیر فولادی در نظر گرفته شده است. همچنین، قطر، طول و مقاومت کششی پیچ‌های متری به ترتیب برابر ۲۰ میلی‌متر، ۵۰۰ میلی‌متر و ۲۳۵ مگاپاسکال می‌باشد. ناحیه مهاري از صفحات فولادی و لایه‌های لاستیک (جهت کاهش تمرکز تنش) با مقاومت بالا تشکیل شده که توسط پیچ به یکدیگر متصل شده‌اند (شکل ۴).

نتیجه آزمایش نشان می‌دهد که چینش مکانیکی مذکور به صورت میانگین ۲۱٪ و ۳۳٪ پیش‌تندگی بر کامپوزیت اعمال کرده است.

۳-۲-۲- پیش‌تندگی اولیه و تلفات آن

جدول ۵ میزان پیش‌تندگی اولیه و تنش‌های اندازه‌گیری شده نمونه‌های CFRP پیش‌تندگی را تا قبل از آزمایش بارگذاری نشان می‌دهد.

جدول ۵- تنش اندازه‌گیری شده در نمونه‌ها بر اساس درصد

نمونه	تنش			
	اولیه	اول	دوم	سوم
CFRP 35%-A	۳۳/۴	۳۲/۸	۳۲/۱	۳۱/۶
CFRP 35%-B	۳۶/۶	۳۵/۹	۳۴/۸	۳۴/۵
CFRP 20%-A	۲۱/۹	۲۱/۵	۲۱/۱	۲۱/۱
CFRP 20%-B	۲۰/۸	۲۰/۶	۲۰/۳	۲۰/۲

در جدول ۵، تنش اولیه مبین تنش اندازه‌گیری شده بلافاصله پس از عملیات پیش‌تندگی می‌باشد. به علاوه، تنش‌های اندازه‌گیری شده در انتهای هر هفته آورده شده است. مشاهده می‌شود که تلفات کل پیش‌تندگی (از ابتدا تا پیش از آزمایش) برای همه نمونه‌ها زیر ۱۰٪ بوده که نشان دهنده موفقیت آمیز بودن روش پیش‌تندگی است. علاوه بر این، هیچ لغزشی بین CFRP و ناحیه مهاری مشاهده نشده است.

۳-۲-۳- مقاوم‌سازی تیرهای T شکل

پس از گذشت حداقل ۸ ماه از بتن‌ریزی، تیرهای T شکل مورد مقاوم‌سازی خمشی با استفاده از کامپوزیت CFRP قرار گرفته‌اند. در نتیجه، می‌توان از اثر جمع‌شدگی بتن صرف‌نظر کرد [30,31]. شکل ۷ تیرهای بتنی T شکل را حین عملیات مقاوم‌سازی نشان می‌دهد.

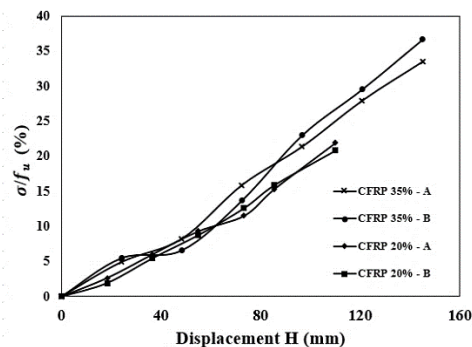
جهت مقاوم‌سازی، ابتدا ورق کامپوزیت مطابق توضیحات بخش ۳-۲-۱ پیش‌تندگی شده است. در ادامه، یک لایه چسب بر روی سطح تیر زده شده و کامپوزیت مطابق شکل (۷-الف) بر روی تیر بتنی قرار داده شده است. سپس، یک لایه چسب بر روی ورق کامپوزیت (جهت غرقاب کردن آن) مالیده شده است. به منظور

از آنجایی که در حین عملیات پیش‌تندگی کامپوزیت فقط از ابتدا و انتها با تیر فولادی در تماس بوده و مهار شده است، هرگونه لغزشی در ناحیه مهاری سبب تغییر در مقادیر اولیه اندازه‌گیری شده توسط LVDTها خواهد شد. برای اندازه‌گیری کرنش ایجاد شده در CFRPها در حین پیش‌تندگی و به دست آوردن تلفات پیش‌تندگی، از کرنش‌سنج الکتریکی با طول گیج ۵ میلی‌متر و مقاومت ۱۲۰ اهم استفاده شده است.

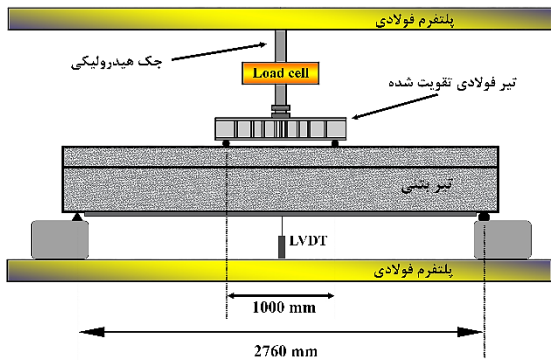
همچنین LVDTها دارای بازشدگی ۲۰۰ میلی‌متر و دقت یک میکرومتر بوده‌اند. در طول فرایند پیش‌تندگی، کرنش‌سنج‌ها مستقیماً به یک سیستم ثبت داده‌ها متصل بودند. با این حال، اتصال دائمی سیستم به کرنش‌سنج‌ها برای به دست آوردن تلفات پیش‌تندگی به دلیل طولانی بودن مدت قرائت امکان‌پذیر نشده است. بنابراین، اندازه‌گیری‌ها هر ۲۴ ساعت به مدت تقریبی چهار هفته و قبل از آزمایش بارگذاری انجام شده است. با توجه به خطی بودن رابطه تنش-کرنش در کامپوزیت‌های CFRP و مشخص بودن مدول یانگ آنها، با در دست داشتن کرنش ایجاد شده در CFRP، می‌توان تنش معادل آن را نیز محاسبه کرد. در محاسبه تنش (نرمال شده بر اساس مقاومت حداکثر کامپوزیت) ایجاد شده در کامپوزیت از رابطه زیر استفاده شده است:

$$\frac{\sigma}{f_u} (\%) = \frac{\sum \varepsilon_{gauge}}{3} \frac{E_f}{f_u} (\%) \quad (2)$$

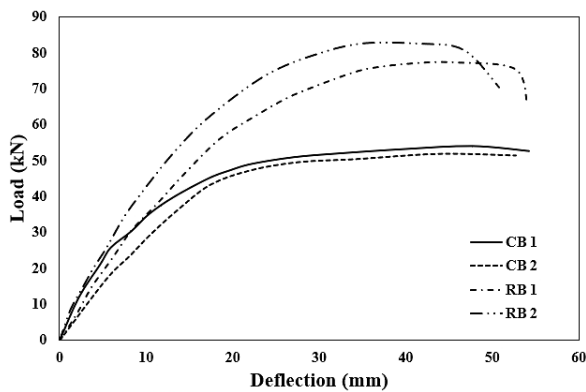
که در آن E_f ، f_u و ε_{gauge} به ترتیب مقاومت نهایی اسمی کامپوزیت، مدول یانگ کامپوزیت و کرنش ثبت شده توسط کرنش‌سنج می‌باشد. شکل ۶ مقایسه نتایج حاصل از اعمال پیش‌تندگی بر کامپوزیت CFRP با استفاده از چینش مکانیکی (میانگین سه کرنش‌سنج) را بر حسب تغییر مکان عمودی و نسبت تنش ایجاد شده به مقاومت اسمی کامپوزیت نشان می‌دهد.



شکل ۶- نتایج آزمایشگاهی بدست آمده برای پیش‌تندگی CFRPها



شکل ۸- بارگذاری چهار نقطه‌ای تیرهای بتنی مقاوم‌سازی شده



شکل ۹- مقایسه نمودارهای بار- تغییر مکان وسط دهانه برای

نمونه‌های RB و CB

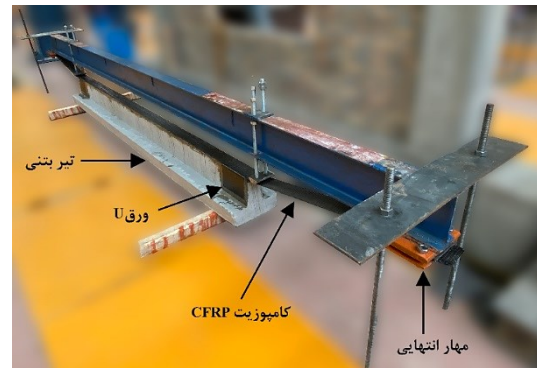
میانگین ظرفیت باربری تیرهای کنترلی (CB) ۵۲ kN بوده در حالی که میانگین ظرفیت باربری نهایی تیرهای مقاوم‌سازی شده (RB) حدود ۸۱ کیلو نیوتن بوده است. همانطور که مشاهده می‌شود، افزایش تقریبی ۵۲٪ در ظرفیت نهایی مشاهده شد. علاوه بر این، تیرهای تقویت شده تقریباً خیز نهایی معادل با تیرهای کنترل از خود نشان داده‌اند. جدول ۶ نتایج بدست آمده از آزمایش را نشان می‌دهد.

جدول ۶- نتایج بدست آمده از آزمایش برای تیرهای RB و CB

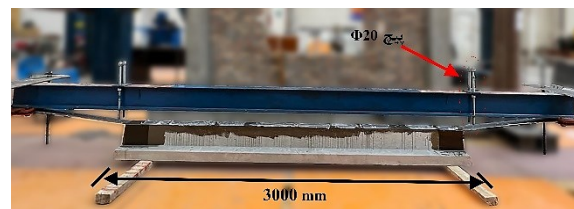
نمونه	ترک اولیه		بار حداکثری	
	جایجایی (mm)	بار (kN)	جایجایی (mm)	بار (kN)
CB 1	۵/۹۲	۱۸/۰۱	۳۹/۸۷	۴۷/۹۳
CB 2	۵/۳۹	۱۷/۱۱	۳۴/۲۶	۴۴/۱۳
RB 1	۸/۵۲	۳۰/۸۱	۴۵/۵۲	۶۸/۰۲
RB 2	۸/۸۸	۲۹/۲۷	۴۱/۳۵	۷۲/۶۴

مشاهده می‌شود که مقاوم‌سازی با استفاده از CFRP بدون پیش‌تندگی، خیز متناسب با اولین ترک و بار حداکثری را به

مهار کامپوزیت‌های CFRP بر روی تیر بتنی، از ورق‌های U شکل کامپوزیت CFRP به عرض ۱۲۰ میلی‌متر استفاده شده است. پس از سخت شدن چسب، دستگاه آماده جدایش از تیر بتنی بوده و قسمت‌های اضافی کامپوزیت بریده می‌شود.



(الف)



(ب)

شکل ۷- نحوه مقاوم‌سازی تیر بتنی با CFRP پیش‌تندیده؛ (الف)

نمای کلی، (ب) پیش از جدایش دستگاه

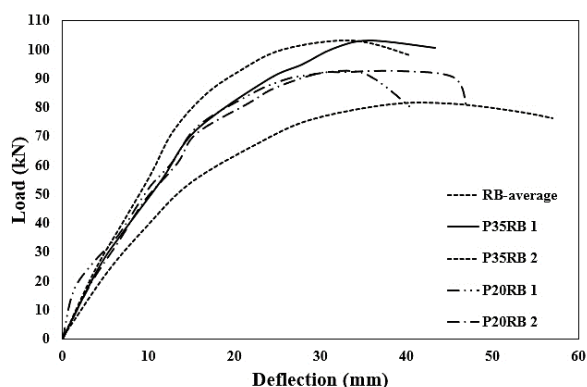
۳-۳- نحوه آزمایش

برای یافتن ظرفیت باربری تیرهای کنترلی و مقاوم‌سازی شده، از آزمایش بار چهار نقطه‌ای فزاینده با دهانه خالص ۲۷۶۰ میلی‌متر استفاده شده است. در این آزمایش از جک هیدرولیکی ۲۵ تن و بازشدگی ۲۰۰ میلی‌متر و LVDT با ظرفیت بازشدگی ۱۰۰ میلی‌متر و حساسیت ۰/۰۱ میلی‌متر برای اندازه‌گیری تغییر مکان میانه دهانه استفاده شده است. شکل ۸ تصویر شماتیکی آزمایش تیرها را نشان می‌دهد. بارگذاری به صورت تدریجی و با سرعت ۲/۵ kN/min اعمال شده است تا خرابی نمونه‌ها طی ۲۵ الی ۳۰ دقیقه پس از شروع بارگذاری رخ دهد.

۳-۴- نتایج آزمایش

شکل ۹ نمودار بار- تغییر مکان وسط دهانه تیرهای کنترلی (CB) و مقاوم‌سازی شده با CFRP بدون پیش‌تندگی (RB) را نشان می‌دهد.

۹۲ kN بوده است.



شکل ۱۱- مقایسه نمودارهای بار- تغییر مکان وسط دهانه برای نمونه‌های مقاوم‌سازی شده با CFRP با و بدون پیش‌تنیدگی

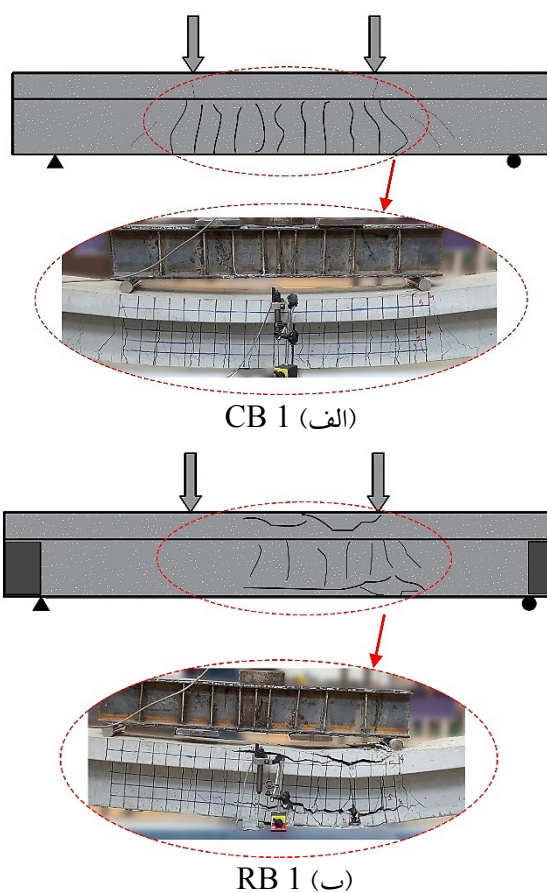
به علاوه، میانگین ظرفیت نهایی تیر تقویت شده توسط CFRP‌های پیش‌تنیده به میزان ۳۵٪، حدود ۱۰۲ kN بود که نشان دهنده افزایش تقریبی ۷۲٪ و ۲۴٪ در بار نهایی در مقایسه با تیرهای کنترلی (CB) و تقویت شده RB می‌باشد. جدول ۷ نتایج بدست آمده از آزمایش را نشان می‌دهد.

جدول ۷- نتایج بدست آمده از آزمایش برای تیرهای P20RB و P35RB

نمونه	ترک اولیه		بار حداکثری		
	جابجایی (mm)	بار (kN)	جابجایی (mm)	بار (kN)	
P20RB 1	۹/۹۶	۵۱/۸۹	۳۴/۷۹	۹۲/۱۶	۸۱/۱۰
P20RB 2	۹/۵۵	۴۷/۸۷	۳۸/۹۱	۹۲/۵۷	۸۱/۴۶
P35RB 1	۱۱/۳۱	۵۴/۷۴	۳۵/۶۷	۱۰۳/۱۲	۹۰/۷۴
P35RB 2	۱۰/۵۷	۵۷/۰۲	۳۳/۷۸	۱۰۲/۹۷	۹۰/۶۱

مشاهده می‌شود که مقاوم‌سازی با استفاده از CFRP پیش‌تنیده، خیز در لحظه ترک اولیه و بار مربوطه را نسبت به تیرهای تقویت شده با CFRP بدون پیش‌تنیدگی افزایش داده است. با این حال، خیز در بار حداکثر برای هر دو سری P20RB و P35RB در مقایسه با سری RB کاهش یافته است. شکل ۱۲ حالت خرابی تیرها را نشان می‌دهد. برای نمونه‌های P20RB و P35RB، اولین ترک در ناحیه خمشی مشاهده شد. درحالی‌که حالت شکست نمونه‌های P20RB با جدا شدن ناگهانی ورق CFRP آغاز شد، حالت شکست نمونه‌های P35RB با خرابی و

ترتیب به طور متوسط ۵۳٪ و ۱۷٪ افزایش داده است. برای تیرهای کنترلی، اولین ترک در ناحیه خمشی با زاویه ترک ۸۰ تا ۹۰ درجه مشاهده شد. این الگوی ترک خوردگی ادامه یافته تا اینکه آزمایش به دلیل آسیب‌های خمشی گسترده متوقف شد. از طرفی حالت خرابی غالب تیرهای RB 1 و RB 2، گسیختگی پوشش بتنی بوده است. مشابه تیرهای کنترلی، اولین ترک در ناحیه خمشی سری RB مشاهده شد. با این وجود، آزمایش با جدایش پوشش بتنی به پایان رسید. لازم به ذکر است که هیچ لغزشی بین CFRP و ناحیه مهارتی انتهایی مشاهده نشده است. شکل ۱۰ نحوه خرابی تیرهای مذکور را نشان می‌دهد.



شکل ۱۰- شکل شماتیک و ترک خوردگی برای تیرهای CB و RB

شکل ۱۱ نمودار بار- تغییر مکان وسط دهانه تیرهای مقاوم‌سازی شده با CFRP پیش‌تنیده را در مقایسه با میانگین تیرهای RB نشان می‌دهد. میانگین ظرفیت باربری نهایی تیرهای RB و RB 1 برابر ۷۹ کیلونیوتن بود، درحالی‌که میانگین ظرفیت باربری نهایی تیر تقویت شده توسط CFRP پیش‌تنیده به میزان ۲۰٪، حدود

فشاری در حالت بارگذاری دومحوره به تک‌محوره $(\frac{f'_{bo}}{f'_c})$ ، زاویه اتساع (ψ) ، نسبت نامتغیر دوم تنش در کشش و فشار (K) ، خروج از مرکزیت سطح تسلیم (e) و قاعده سخت شوندگی در فشار و کشش می‌باشد. محدوده تغییرات زاویه اتساع در نرم‌افزار ABAQUS مابین 5° الی 50° می‌باشد که مقدار 25° پس از انجام آنالیز حساسیت برای این پارامتر برای تمامی مدل‌ها در نظر گرفته شده است [28]. در ادامه، از رابطه زیر برای محاسبه نسبت $\frac{f'_{bo}}{f'_c}$ استفاده شده است [32]:

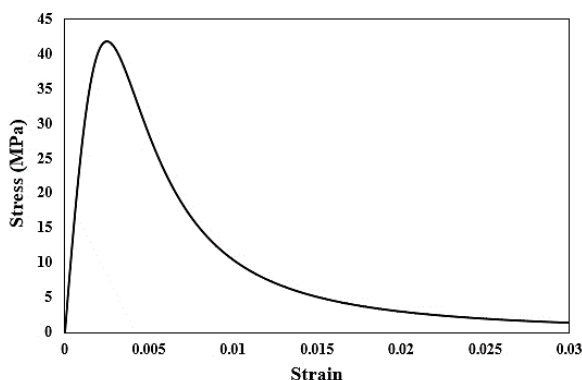
$$\frac{f'_{bo}}{f'_c} = 1.5(f'_c)^{-0.075} \quad (3)$$

مقادیر $0/1$ و $0/667$ به ترتیب برای پارامترهای e و K در نظر گرفته شده‌اند [33]. برای مدل‌سازی رفتار بتن در فشار از رابطه زیر استفاده شده است [34]:

$$\sigma_c = \frac{E_c \varepsilon_c}{1 + (R + R_E - 2) \left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_0}\right) - (2R - 1) \left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_0}\right)^2 + R \left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_0}\right)^3} \quad (4)$$

$$E_0 = \frac{f'_c}{\varepsilon_0}; R_E = \frac{E_c}{E_0}; R = \frac{R_E(R_E - 1)}{(R_E - 1)^2}$$

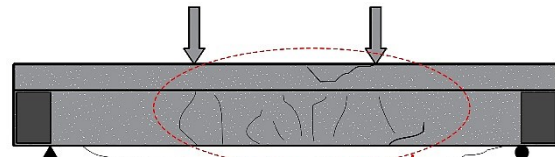
که در آن $1 < R_\sigma < 8$ و $2 < R_E < 8$ پارامترهای رفتاری بتن بوده که بیشترین تأثیر را به ترتیب در شیب دیاگرام و تنش پسماند بتن دارند. مقدار 4 برای هر دو پارامتر مذکور پیشنهاد گردیده است [34]. ε_0 برابر با $0/0025$ مین کرنش متناظر با مقاومت حداکثری بتن می‌باشد. همچنین، رفتار بتن تا $0.4f'_c$ به صورت رفتار تقریباً الاستیک توسط رابطه (4) تخمین زده می‌شود. شکل 13- نمودار تنش- کرنش فشاری در نظر گرفته شده برای بتن را نشان می‌دهد.



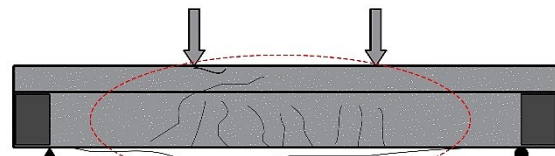
شکل 13- نمودار تنش- کرنش فشاری در نظر گرفته شده برای بتن برای تمامی تحلیل‌ها

همچنین، از روش انرژی گسیختگی (Fracture energy) برای

به دنبال آن پارگی ادامه یافت. لازم به ذکر است که هیچ لغزشی بین CFRP و ناحیه مهاری مشاهده نشد.



الف) P20RB 1



ب) P35RB 1

شکل 12- شکل شماتیک و ترک خوردگی برای تیرهای P35RB و P20RB

4- مدل‌سازی عددی

هدف این بخش بیان روشی برای مدل‌سازی عددی رفتار تیرهای بتنی مقاوم‌سازی شده با استفاده از CFRP پیش‌تینده بر اساس تحلیل عناصر محدود (FEA) می‌باشد. تمامی مدل‌سازی‌ها در نرم‌افزار عناصر محدود ABAQUS standard با روش انتگرال‌گیری ضمنی (Implicit) و روش تکراری نیوتن - رافسون انجام شده است. مقادیر پیش‌فرض نرم‌افزار برای تمامی تحلیل‌ها در نظر گرفته شده است.

4-1- مصالح

4-1-1- بتن

از مدل آسیب پلاستیک بتن (CDP) برای شبیه‌سازی رفتار بتن استفاده شده است. پارامترهای این مدل رفتاری شامل نسبت تنش

$$d\epsilon^{uexpan} = \beta dT \quad (6)$$

که در آن dT تغییرات نموی کرنش حرارتی و β ضریب حرارتی (در اینجا $\beta = 1$) است. dT را می توان بر اساس تنش حرارتی که شبیه سازی کننده اثرات پیش تنیدگی بوده، باز نویسی کرد. در این صورت، رابطه زیر را برای dT می توان برقرار کرد:

$$dT = -\frac{P}{\beta EA} dt = -\frac{\sigma}{\beta E} dt \quad (7)$$

که در آن σ مقدار پیش تنیدگی (بر اساس درصدی از UTS) بوده، E مدول یانگ و dt تغییرات زمان است. در ابتدا، متغیرهای حالت توسط ABAQUS تعیین می شوند. پس از آن، تغییرات پیش تنیدگی محاسبه شده و به عنوان کرنش در ماده ایجاد می شود. از آنجایی که مصالح پیش تنیده از هر دو انتها مهار می باشد، کرنش های ایجاد شده نیروی پیش تنیدگی را تولید می کنند.

۴-۱-۳-۲- خرابی مصالح CFRP

CFRPها به صورت مصالح خطی ارتوتروپیک تا لحظه خرابی فرض شده اند. از معیار خرابی Hashin سه بعدی برای مدل سازی خرابی های ایجاد شده در مصالح CFRP استفاده شده و معیار مذکور به صورت کد UMAT در نرم افزار ABAQUS پیاده سازی شده است. با توجه به صرف نظر نمودن از مقاومت فشاری کامپوزیت بر اساس توصیه ACI440 [36]، معیار مذکور به صورت زیر بیان می شود [37]:

$$\frac{\sigma_{11}}{\sigma_f} \leq 1 \quad ; \quad \left(\frac{\sigma_{11}}{\sigma_f}\right)^2 + \frac{1}{T_f}(\sigma_{12}^2 + \sigma_{13}^2) \leq 1$$

$$\frac{1}{\sigma_f^2}(\sigma_{22}^2 + \sigma_{33}^2) + \frac{1}{T_f^2}(\sigma_{23}^2 - \sigma_{22}\sigma_{33}) + \frac{1}{T_f^2}(\sigma_{12}^2 + \sigma_{13}^2) \leq 1 \quad (8)$$

که در آن σ_f و T_f به ترتیب مقاومت کششی الیاف و مقاومت برشی الیاف می باشند. همچنین، مقدار $0.1\sigma_f$ برای مقاومت برشی الیاف پس از انجام آنالیز حساسیت پارامتر مذکور در نظر گرفته شده است. فلوجارت کد مذکور به صورت شکل ۱۴ می باشد.

۴-۱-۴- چسبندگی میان بتن و CFRP

چسبندگی میان بتن و CFRP که مبین چسب اپوکسی می باشد، توسط المان Cohesive با ضخامت یک میلی متر در نرم افزار ABAQUS شبیه سازی شده است. دیاگرام رفتاری مدل مذکور از نوع تنش- پارگی و به صورت شکل ۱۵ می باشد.

مدل سازی رفتار بتن در کشش استفاده است. بدین منظور مقدار و انرژی آزاد شده پس از ترک خوردگی (G_f) و تنش حداکثر کششی بتن (f_t') از روابط زیر محاسبه شده اند [35]:

$$G_f = 73 (f_{ck})^{0.18}$$

$$f_{t,min} = 0.21 (f_{ck})^{\frac{2}{3}} \quad (5)$$

۴-۱-۲- فولاد

آرماتورهای فولادی از نوع مصالح الاستوپلاستیک در فشار و کشش و به صورت مدفون در بتن مدل شده اند. همچنین مدول یانگ و ضریب پواسون فولاد به ترتیب برابر 200 GPa و 0.3 در نظر گرفته شده است.

۴-۱-۳- مصالح CFRP

۴-۱-۳-۱- ایجاد پیش تنیدگی در CFRP

در ABAQUS، تابع موجود برای مدل سازی تنش اولیه در یک ماده، الگوی STRESS* می باشد. در صورت استفاده از الگوی مذکور، نیروی پیش تنیدگی را می توان از مدل عناصر محدود دیگری به مدل موجود وارد کرده و یا به طور مستقیم، به عنوان مثال در جهت طولی، تعریف کرد. با این حال، الگوی مذکور دارای چندین محدودیت می باشد. اگر نیروی پیش تنیدگی مستقیماً در یک جهت تعریف شود، سایر مولفه های تنش که در حین پیش تنیدگی ایجاد می شوند (تنش های عمودی)، نادیده گرفته می شوند. علاوه بر این، وارد کردن حالت کلی یک ماده پیش تنیده می تواند باعث ناپایداری سیستم شود که منجر به خطاهای عددی می شود؛ زیرا مجموعه نیروهای وارد شده، برهمکنش قابل توجهی با سیستم ایجاد می کنند. بنابراین، وجود یک گزینه عملی که به تدریج نیروی پیش تنیدگی را با شرایط مرزی/نیروی صحیح به سیستم معرفی می کند، ضروری به نظر می رسد. در این راستا می توان از سابروتین UEXPAN به طور مؤثر استفاده کرد. سابروتین مذکور یک الگوریتم وابسته به زمان است که برای محاسبه انقباض و انبساط یک نقطه مادی استفاده می شود. الگوریتم مذکور یک چارچوب گام به گام برای مدل سازی تغییرات مختلف، مانند اثرات پیش تنیدگی را فراهم می کند. در سابروتین مذکور، رابطه زیر برای تعریف کرنش های نموی استفاده می شود [33]:

۴-۲- اجزاء مدل عددی

نوع تحلیل در نظر گرفته شده Static/General بوده و برای تمامی رواداری‌ها، مقادیر پیش فرض نرم افزار در نظر گرفته شده است. تیر بتنی، آرماتورهای طولی و CFRP با استفاده از عناصر هشت وجهی C3D8 با انتگرال گیری تام (Full Integration) مدل سازی شده‌اند. به علاوه، آرماتورهای برشی با استفاده از عناصر تیری (Beam) مدل شده‌اند. همچنین، صفحات بارگذاری و تکیه گاه‌ها با استفاده از عناصر صلب (Rigid) مدل سازی شده و ناحیه مهاری همانند نمونه آزمایشگاهی مدل سازی شده‌اند.

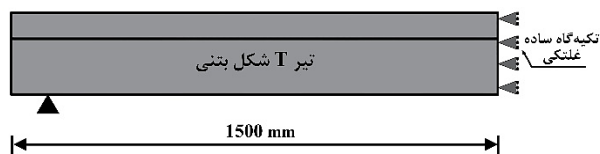
۴-۳- نتایج مدل سازی عددی

در این قسمت نتایج صحت سنجی مدل عددی برای تیرهای بتنی مدل سازی شده ارائه می‌شوند. در این راستا، از نتایج آزمایشگاهی پژوهش حاضر و نیز نتایج آزمایشگاهی ارائه شده توسط Garden و همکاران [39] جهت صحت سنجی مدل عددی استفاده شده است.

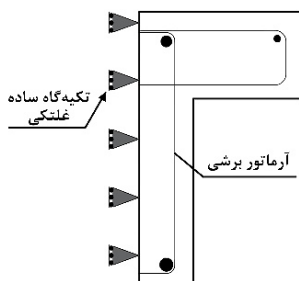
۴-۳-۱- صحت سنجی مدل عددی با نتایج پژوهش

حاضر

بدلیل وجود تقارن در راستای طولی نمونه‌ها، یک چهارم از تیرها با شرایط تکیه گاهی مناسب مطابق شکل ۱۶ جهت ساده سازی و نیز کاهش زمان تحلیل‌ها در نرم افزار مدل شده است.



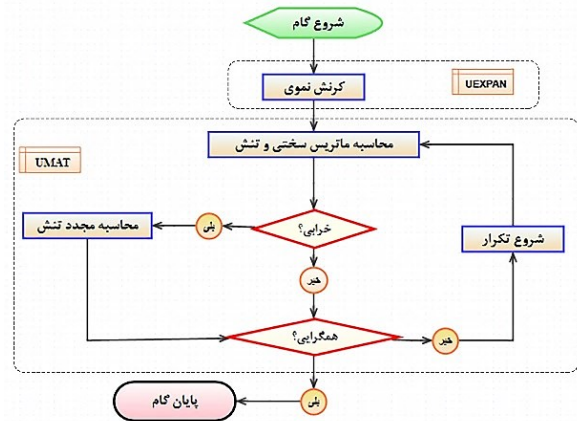
(الف)



(ب)

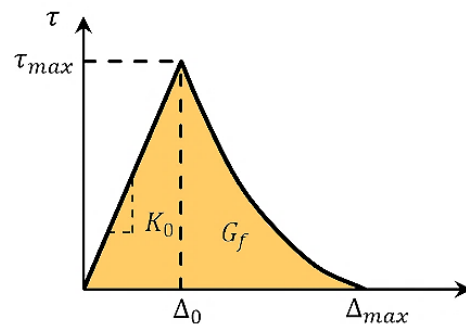
شکل ۱۶- شرایط مرزی تیرهای مدل سازی شده؛ الف) شرایط

مرزی در طول تیر، ب) شرایط مرزی در مقطع تیر



شکل ۱۴- فلوچارت محاسبه تنش و خرابی در کامپوزیت با

استفاده از کدنویسی سابروتین‌ها



شکل ۱۵- دیاگرام تنش- پارگی [33]

بر اساس رابطه مذکور، مقادیر K_0 ، τ_{max} و G_f به صورت زیر تعیین می‌شوند [38]:

$$K_0 = \frac{1}{\frac{t_f}{G_i} + \frac{t_c}{G_c}}; G_f = 0.308 \beta_w^2 \sqrt{f_t};$$

$$\tau_{max} = \alpha_1 \beta_w f_t \quad (9)$$

$$\beta_w = \sqrt{(2.25 - \frac{b_f}{b_c}) / (1.25 + \frac{b_f}{b_c})}$$

که در آن b_c برابر عرض مقطع بتنی، b_f برابر عرض مقطع CFRP، G_c مدول برشی بتن، G_i مدول برشی چسب، t_f ضخامت چسب و t_c ضخامت بتن درگیر با چسب می‌باشند. در این پژوهش، ضخامت بتن برابر ۵ میلی‌متر در نظر گرفته شده است. از معیار انرژی گسیختگی B-K برای مدل سازی رفتار پس از خرابی چسب استفاده شده است. معیار مذکور به صورت بیان می‌شود [33]:

$$G_n^c + (G_s^c - G_n^c) \left\{ \frac{G_s}{G_T} \right\}^\eta = G^c \quad (10)$$

که در آن $G_T = G_n + G_s$ و $G_s = G_s + G_t$ انرژی گسیختگی در راستاهای برشی می‌باشند.

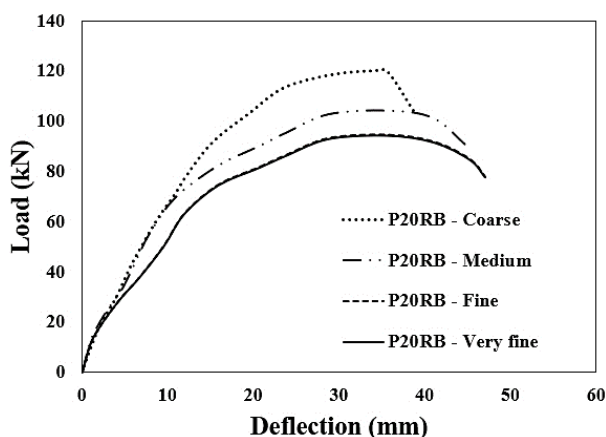
میلی متر برای تمامی عناصر در نظر گرفته شده است.

جدول ۹- نتایج آنالیز حساسیت مش برای نمونه P20RB

اندازه مش	درشت (۲۵ mm)	متوسط (۱۵ mm)	ریز (۱۰ mm)	بسیار ریز (۵ mm)	آزمایش
تعداد عنصر	۴۲۸۵	۱۲۳۳۱	۴۲۳۰۳	۲۹۳۱۰۷	-
بار حداکثری (kN)	۱۲۰/۲	۱۰۲/۸	۹۴/۸	۹۴/۶	۹۲
زمان تحلیل* (ساعت)	۱	۲	۶	۲۱	-

* زمان تحلیل برای سیستم با پردازنده Intel i7-12700H اندازه گیری شده است.

نمودارهای بار- تغییر مکان تیرهای T شکل کنترلی، تیرهای T شکل تقویت شده با استفاده از CFRP با و بدون پیش تنیدگی بدست آمده از تحلیل عناصر محدود (FEA) ارائه شده است.



شکل ۱۸- نمودارهای بار- تغییر مکان در وسط دهانه برای

اندازه های مختلف مش برای نمونه P20RB

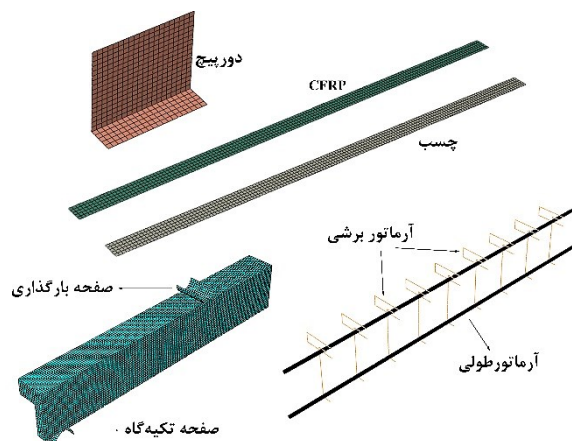
اشکال ۱۹ و ۲۰ به ترتیب نمودارهای بار- تغییر مکان در وسط دهانه و نحوه خرابی را برای تیر کنترلی (CB) و تیر تقویت شده با CFRP بدون پیش تنیدگی (RB) که از مدل سازی عددی بدست آمده اند را نشان می دهند. جدول ۱۰ مقایسه نتایج بدست آمده از آزمایش و تحلیل عددی برای میانگین بار حداکثری و میانگین خیر متناظر آن را ارائه می دهد. همانطور که مشاهده می شود، روش پیشنهادی بخوبی ظرفیت باربری و نحوه خرابی تیرهای مقاوم سازی شده را تخمین زده و خطای موجود برای تمامی پارامترها زیر ۱۰٪ می باشند.

با توجه به مقاومت فشاری مشخصه بتن در پژوهش حاضر، مقدار $1/13$ برای $\frac{f_{bo}}{f_c'}$ و مقادیر $2/52$ MPa و $0/14$ mJ به ترتیب برای تنش حداکثر کششی و انرژی ترک خوردگی بتن برای تحلیل ها در نظر گرفته شده است. همچنین، مقادیر در نظر گرفته شده برای مدل سازی چسبندگی بتن به CFRP در جدول ۸ آورده شده است.

جدول ۸- مقادیر در نظر گرفته شده برای چسبندگی بتن به CFRP برای پژوهش حاضر

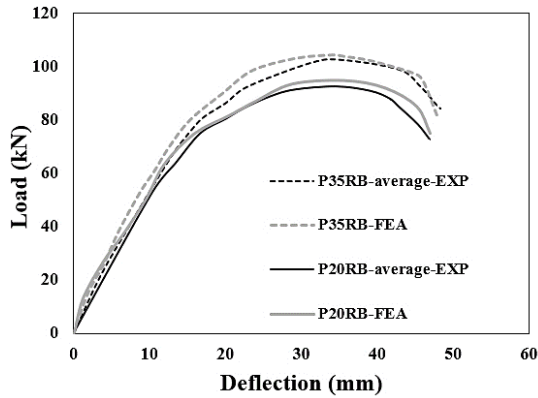
ضخامت (mm)	K_0 (GPa/mm)	تنش برشی (MPa)	انرژی شکست ($N \cdot mm^{-1}$)	η
۱	۸۲۱	۲/۶	۰/۳۱۶	۲/۱

شکل ۱۷ اجزای مدل عناصر محدود تیرهای مقاوم سازی شده را نشان می دهد. جهت به دست آوردن اندازه مش مناسب در تحلیل های عناصر محدود، آنالیز حساسیت مش بر روی تمامی مدل ها انجام شده است. در ادامه، نتایج حاصل برای نمونه P20RB آورده شده است. نتایج آنالیز حساسیت مش شامل تعداد عناصر مدل، بار حداکثری و زمان تحلیل در جدول ۹ ارائه شده است.

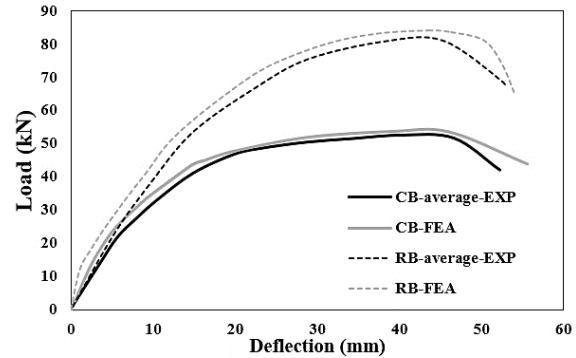


شکل ۱۷- اجزای مدل عناصر محدود تیرهای مدل سازی شده

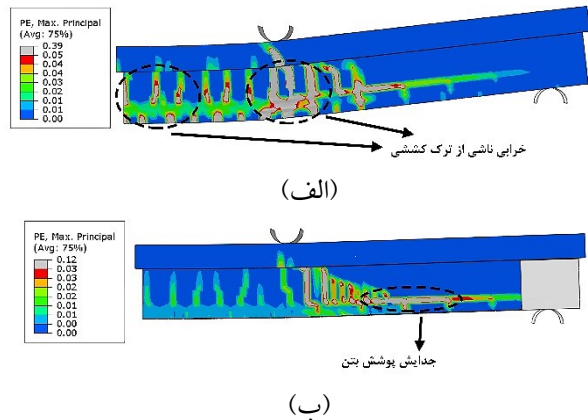
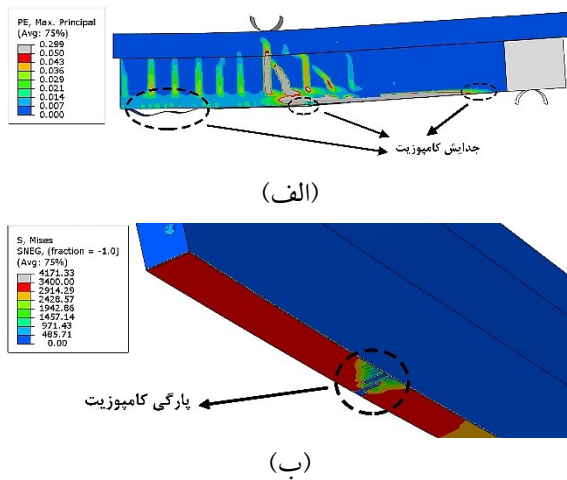
همچنین، نمودارهای بار- تغییر مکان در وسط دهانه برای اندازه های مش مختلف برای نمونه های P20RB در شکل ۱۸ نشان داده شده است. با اینکه اندازه مش های ریز و بسیار ریز نتایج مناسبی را در مقابل نتایج آزمایشگاهی ارائه می دهند، اندازه مش بسیار ریز نیازمند زمان محاسباتی قابل توجهی می باشد. بنابراین، اندازه مش کلی ۱۰



شکل ۲۱- مقایسه نمودارهای بار- تغییر مکان وسط دهانه برای تیرهای P35RB و P20RB بدست آمده از FEA و آزمایش



شکل ۱۹- مقایسه نمودارهای بار- تغییر مکان وسط دهانه برای تیرهای CB و RB بدست آمده از FEA و آزمایش



شکل ۲۰- مود خرابی تیرهای مدل سازی شده؛ الف) CB، ب) RB

شکل ۲۲- مود خرابی تیرهای مدل سازی شده؛ الف) P20RB، ب) P35RB

جدول ۱۱ مقایسه نتایج بدست آمده از آزمایش و تحلیل عددی برای میانگین بار حداکثری و میانگین خیر متناظر آن را ارائه می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود، روش پیشنهادی بخوبی ظرفیت باربری و نحوه خرابی تیرهای مقاوم‌سازی شده را تخمین زده و خطای موجود برای تمامی پارامترها زیر ۱۰٪ می‌باشند.

جدول ۱۱- مقایسه نتایج بدست آمده از آزمایش و تحلیل عددی برای تیرهای P35RB و P20RB

نمونه	بار حداکثری (kN)		خیز متناظر با بار حداکثری (mm)			
	خطا (%)	FEA	EXP	FEA		EXP
P20RB	+۲/۶	۹۴/۸۰	۹۲/۳۶	۳۵/۶۸	۳۶/۸۵	-۳/۱
P35RB	+۱/۴	۱۰۴/۵۷	۱۰۳/۰۴	۳۴/۰۷	۳۴/۷۲	-۱/۸

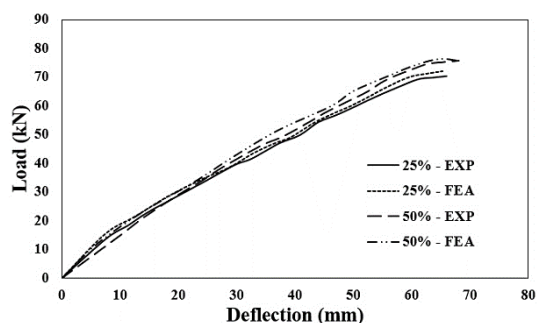
جدول ۱۰- مقایسه نتایج بدست آمده از آزمایش و تحلیل عددی برای تیرهای CB و RB

نمونه	بار حداکثری (kN)		خیز متناظر با بار حداکثری (mm)			
	خطا (%)	FEA	EXP	FEA		EXP
CB	+۳/۴	۵۳/۷۱	۵۱/۹۲	۳۹/۱۸	۳۷/۰۶	+۵/۷
RB	+۵/۲	۸۴/۱۰	۷۹/۹۲	۴۳/۴۹	۴۳/۴۴	+۱/۱

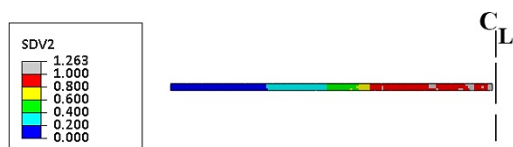
در ادامه، اشکال ۲۱ و ۲۲ به ترتیب نمودارهای بار- تغییر مکان در وسط دهانه و نحوه خرابی تیرهای مدل‌سازی شده توسط CFRP با پیش‌تندگی (P35RB و P20RB) که از مدل‌سازی عددی بدست آمده‌اند را نشان می‌دهند.

در شکل (۲۲- ب)، CFRP با رسیدن به حداکثر ظرفیت خود دچار گسیختگی شده که با نتایج آزمایشگاهی مطابقت خوبی دارد.

کامپوزیت را با توجه به معیار Hashin نشان می دهد. همانطور که نشان داده شده است، هر مقدار بالاتر از عدد یک نشان دهنده خرابی در کامپوزیت می باشد.



شکل ۲۴- منحنی های بار-تغییر مکان بدست آمده از پژوهش Garden و همکاران [39] و تحلیل عددی



شکل ۲۵- خرابی ایجاد شده در کامپوزیت برای تیر مقاوم سازی شده با CFRP پیش تنیده به میزان ۵۰٪

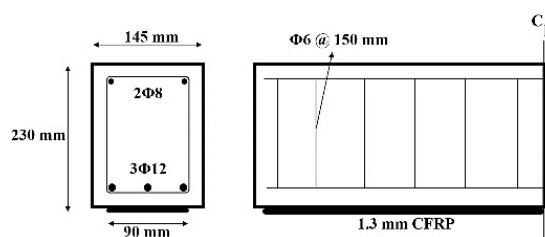
همانطور که مشاهده می شود، نتایج عددی با آزمایش مطابقت داشته و می توان از مدل های عددی ارائه شده برای پژوهش های بیشتر استفاده نمود.

۵- شکل پذیری و سختی

در این مطالعه، تحلیل شکل پذیری برای تیرهای کنترلی و تیرهای تقویت شده پژوهش حاضر انجام شده است. در این راستا، شاخص شکل پذیری تغییر شکل (DDI) برای تیرهای T شکل استخراج شده است. مطابق شکل ۲۶، شاخص DDI نسبت خیز تیر در لحظه ای که افت بار برابر ۸۵٪ بار حداکثری بوده، به خیز تسلیم (Δ_y) را نشان می دهد [40,41]. در شکل ۲۶، نقطه تسلیم مبین لحظه تسلیم آرماتورهای طولی در تیرهای بتنی می باشد. علاوه بر این، ضرایب صلیب (Rigidity) تیرهای T شکل با توجه به سختی اولیه (Initial slope)، سختی در نقطه تسلیم محاسبه شده است [42]. شکل ۲۷ نحوه محاسبه ضرایب صلیب برای تیرها را نشان می دهد. در شکل ۲۷، سختی در نقطه تسلیم از تقسیم میزان بار در لحظه جاری شدن آرماتورهای طولی (P_y) بر خیز متناظر آن بدست می آید.

۴-۳-۲- صحت سنجی مدل عددی با نتایج پژوهش Garden و همکاران

Garden و همکاران [39] یک سری آزمایش بارگذاری چهار نقطه ای با دهانه بارگذاری ۲/۲ متر بر روی تیرهای بتن آرمه مقاوم سازی شده با CFRP پیش تنیده (به میزان ۲۵٪ و ۵۰٪ از UTS) انجام دادند. طول تیرها برابر ۴/۵ متر و مقطع آن برابر ۱۴۵×۲۳۰ میلی متر بوده است. جزئیات آرماتورگذاری تیرها به صورت شکل ۲۳ می باشد.



شکل ۲۳- جزئیات آرماتورگذاری تیرها [39]

جدول ۱۲- جزئیات در نظر گرفته شده برای مدل سازی عددی

مقدار	مشخصه	مولفه
۴۷	مقاومت فشاری (MPa)	
۲/۷۳	مقاومت کششی (MPa)	
۳۵/۸۰	مدول یانگ (GPa)	بتن
۰/۱۴	انرژی شکست (mJ)	
۱/۱۲	$\frac{f'_{bo}}{f'_c}$	
۵۵۶	تنش تسلیم (MPa)	فولاد
۱۲۸۶	مقاومت کششی (MPa)	CFRP
۱۱۵	مدول یانگ (GPa)	
۴۸۲	سختی اولیه (GPa/mm)	
۲/۵۴	مقاومت (MPa)	لایه چسبی
۰/۴۴	انرژی شکست (mJ)	

جزئیات مدل سازی عددی در جدول ۱۲ آورده شده است. به دلیل وجود تقارن، یک چهارم تیرها مشابه شرایط مرزی ارائه شده در بخش ۳-۳-۱ و با اندازه مش کلی ۱۰ میلی متر در نرم افزار مدل سازی شده است. شکل ۲۴ منحنی های بار-تغییر مکان بدست آمده از آزمایش (EXP) و تحلیل عددی (FEA) را نشان می دهد. به علاوه، طبق گزارش Garden و همکاران [39] حالت شکست تیر مقاوم سازی شده با CFRP پیش تنیده به میزان ۵۰٪، خرابی کششی ورق کامپوزیت بوده است. شکل ۲۵ حالت شکست

جدول ۱۴- محاسبه ضرایب صلیبیت

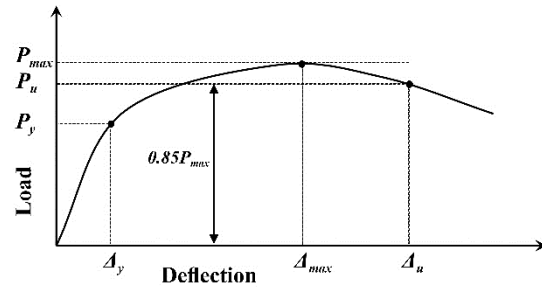
سختی اولیه (kN/mm)		سختی در نقطه تسلیم (kN/mm)		نمونه
FEA	آزمایش	FEA	آزمایش	
۳/۱۶	۳/۲۲	۳/۵۱	۳/۶۶	CB 1
	۳/۰۹		۳/۱۸	CB 2
۳/۹۱	۳/۶۸	۴/۹۲	۴/۵۲	RB 1
	۴/۰۱		۵/۰۳	RB 2
۵/۵۲	۵/۵۹	۶/۰۳	۵/۸۱	P20RB 1
	۵/۴۰		۶/۰۱	P20RB 2
۵/۷۷	۵/۷۸	۶/۰۴	۶/۲۹	P35RB 1
	۵/۷۴		۵/۸۶	P35RB 2

علاوه بر این، بدیهی است که تقویت تیرهای بتنی با CFRP (پیش تنیده و غیر پیش تنیده) سختی اولیه را افزایش می‌دهد. برای نمونه‌های RB، سختی در نقاط تسلیم (P_y) تقریباً ۲۳٪ در مقایسه با نمونه‌های CB افزایش یافته است. همچنین، افزایش سختی در نقطه تسلیم برای سری P20RB و P35RB در مقایسه با نمونه‌های RB قابل توجه بوده است (به ترتیب به طور متوسط ۴۱٪ و ۴۷٪). علاوه بر این، نتایج حاصل از تجزیه و تحلیل عناصر محدود تطابق خوبی را با نتایج تجربی از خود نشان داده است.

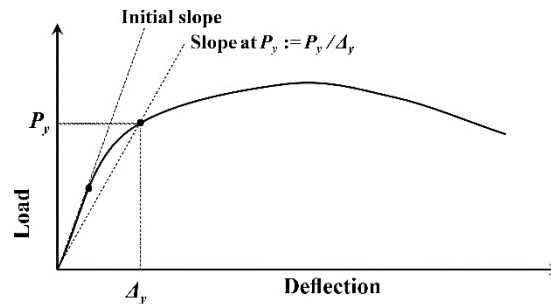
۶- نتایج

در پژوهش حاضر، آزمایش‌های بارگذاری خمشی چهار نقطه‌ای بر روی تیرهای T شکل بتن‌آرمه مقاوم‌سازی شده با صفحات CFRP با و بدون پیش‌تنیدگی انجام شد و رفتار خمشی و شکل‌پذیری تیرها مورد بررسی قرار گرفت. علاوه بر این، یک روش عددی برای اعمال مناسب نیروی پیش‌تنیدگی به صفحات CFRP جهت مقاوم‌سازی تیرهای بتنی ارائه شده و دقت روش مذکور با نتایج آزمایشگاهی مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج زیر از پژوهش حاصل شده است:

- ایجاد پیش‌تنیدگی در صفحات CFRP نسبت به حالت بدون پیش‌تنیدگی کامپوزیت، سبب بهبود مکانیزم خرابی تیرها با به تاخیر انداختن یا جلوگیری از ایجاد پدیده جدایش مابین صفحات CFRP و سطح بتن می‌شود. علاوه بر این، ایجاد پیش‌تنیدگی در کامپوزیت باعث کاهش شکل‌پذیری تیرها می‌شود؛ ولیکن این



شکل ۲۶- نحوه تعریف شاخص DDI



شکل ۲۷- نحوه محاسبه ضرایب صلیبیت

ضرایب شکل‌پذیری و صلیبیت تیرهای T شکل در جداول ۱۳ و ۱۴ آورده شده است. مشاهده می‌شود که تقویت تیرهای بتنی با CFRP‌های پیش‌تنیده، خیز را در نقاط تسلیم کاهش داده است. در مقایسه با نمونه‌های RB، کاهش ضریب شکل‌پذیری برای سری P20RB و P35RB به طور متوسط به ترتیب ۱/۷٪ و ۸/۷٪ می‌باشد.

جدول ۱۳- محاسبه DDI برای تیرها

نمونه	$(\Delta u)_{EXP}$ (mm)	$(\Delta y)_{EXP}$ (mm)	$(\Delta u)_{EXP}$ (mm)	میزان کاهش $\left(\frac{\Delta u}{\Delta y}\right)_{EXP}$	خطا $\left(\frac{\Delta u}{\Delta y}\right)_{FEA}$
CB 1	۱۲/۱۱	۵۲/۱۱	۴/۳۰	-	۲/۴۲
CB 2	۱۲/۹۰	۵۲/۵۹	۴/۰۷	-	۲/۴۲
RB 1	۱۸/۴۹	۵۳/۸۹	۲/۹۱	۰/۳۱	۲/۹۸
RB 2	۱۷/۹۵	۵۰/۶۷	۲/۸۲	۰/۳۱	۲/۹۸
P20RB 1	۱۵/۷۳	۴۰/۵۵	۲/۵۷	۰/۳۲	۲/۹۷
P20RB 2	۱۵/۵۵	۴۷/۶۹	۳/۰۶	۰/۳۲	۲/۹۷
P35RB 1	۱۵/۶۱	۴۳/۳۲	۲/۷۷	۰/۳۷	۲/۷۲
P35RB 2	۱۶/۴۳	۴۰/۵۷	۲/۴۶	۰/۳۷	۲/۷۲

*اندازه‌گیری شده نسبت به نمونه‌های کنترلی

□ اندازه‌گیری شده نسبت به میانگین‌ها

- [6] Esfahani MR, Kianoush MR, Tajari AR. "Flexural behaviour of reinforced concrete beams strengthened by CFRP sheets". Eng. Struct., 29,2428-44,2007.
- [7] Sokairge H, Elgabbas F, Rashad A, Elshafie H. "Long-term creep behavior of basalt fiber reinforced polymer bars". Constr. Build. Mater., 260,120437,2020.
- [8] Aram MR, Czaderski C, Motavalli M. "Debonding failure modes of flexural FRP-strengthened RC beams". Compos. Part B Eng., 39,826-41,2008.
- [9] Gao P, Gu X, Mosallam AS. "Flexural behavior of preloaded reinforced concrete beams strengthened by prestressed CFRP laminates". Compos. Struct., 157,33-50,2016.
- [10] Yang DS, Park SK, Neale KW. "Flexural behaviour of reinforced concrete beams strengthened with prestressed carbon composites". Compos. Struct., 88,497-508,2009.
- [11] Aslam M, Shafigh P, Jumaat MZ, Shah SNR. "Strengthening of RC beams using prestressed fiber reinforced polymers - A review". Constr. Build. Mater., 82,235-56,2015.
- [12] El-Hacha R, Wight R, Green M. "Prestressed fibre-reinforced polymer laminates for strengthening structures". Prog. Struct. Eng. Mater., 3,111-21,2001.
- [13] Kim YJ, Gordon Wight R, Green MF. "Flexural Strengthening of RC Beams with Prestressed CFRP Sheets: Using Nonmetallic Anchor Systems". J. Compos. Constr., 12,44-52,2008.
- [14] ACI committee 440. Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Concrete Structures. American Concrete Institute; 2017.
- [15] Poudel P, Belarbi A, Dawood M, Gencturk B, Acun B. "Prestressing bridge girders with carbon fiber-reinforced polymer: State of knowledge and research needs". Adv. Struct. Eng., 21,598-612,2018.
- [16] Woo SK, Nam JW, Kim JHJ, Han SH, Byun KJ. "Suggestion of flexural capacity evaluation and prediction of prestressed CFRP strengthened design". Eng. Struct., 30,3751-63,2008.
- [17] Hong S, Park SK. "Effect of prestress levels on flexural and debonding behavior of reinforced concrete beams strengthened with prestressed carbon fiber reinforced polymer plates". J. Compos. Mater., 47,2097-111,2013.
- [18] Abdulhameed SS, Wu E, Ji B. "Mechanical Prestressing System for Strengthening Reinforced Concrete Members with Prestressed Carbon-Fiber-Reinforced Polymer Sheets". J. Perform. Constr.

کاهش با افزایش میزان پیش تنیدگی کامپوزیت به ۳۵٪ نسبت به حالت بدون پیش تنیدگی، کمتر از ۱۰٪ می باشد.

- ایجاد پیش تنیدگی در CFRP نسبت به حالت بدون پیش تنیدگی، سبب افزایش محسوس ظرفیت باربری، سختی اولیه و سختی در نقطه تسلیم تیرهای T شکل شده است. با توجه به نتایج مطالعات پیشین و نتایج پژوهش حاضر، بازه ۲۰٪ الی ۳۵٪ برای پیش تنیدگی صفحات CFRP جهت بهبود کارایی سیستم مقاوم سازی در تیرهای بتنی توصیه می شود.

- دورپیچ های U شکل کامپوزیتی عملکرد مناسبی را از خود در حفظ ناحیه مهاری نشان دادند. در نتیجه، استفاده از دورپیچ های مذکور برای درصدهای پایین الی متوسط پیش تنیدگی CFRP جهت کاهش هزینه ها توصیه می شود.

- در این پژوهش، یک روش عددی برای مدل سازی صحیح ایجاد پیش تنیدگی در صفحات CFRP برای مقاوم سازی تیرهای بتنی با استفاده از سابروتین ها با در نظرگیری پارگی در کامپوزیت در نرم افزار ABAQUS ارائه گردید. نتایج بدست آمده نشان می دهند که مدل عددی پیشنهادی با دقت مناسبی رفتار خمشی تیرهای بتنی مقاوم سازی شده را شبیه سازی کرده و می تواند برای پژوهش های آینده مورد استفاده قرار گیرد.

۷- مراجع

- [1] Sanginabadi K, Yazdani A, Mostofinejad D, Czaderski C. "Bond behavior of FRP composites attached to concrete using EBROG method: A state-of-the-art review". Compos. Struct., 299,116060,2022.
- [2] Mostofinejad D, Shameli SM. "Externally bonded reinforcement in grooves (EBRIG) technique to postpone debonding of FRP sheets in strengthened concrete beams". Constr. Build. Mater., 38,751-8,2013.
- [3] Kachlakev D, McCurry DD. "Behavior of full-scale reinforced concrete beams retrofitted for shear and flexural with FRP laminates". Compos. Part B Eng., 31,445-52,2000.
- [4] Obaidat YT, Heyden S, Dahlblom O, Abu-Farsakh G, Abdel-Jawad Y. "Retrofitting of reinforced concrete beams using composite laminates". Constr. Build. Mater., 25,591-7,2011.
- [5] Ashour A., El-Refaie S., Garrity S. "Flexural strengthening of RC continuous beams using CFRP laminates". Cem. Concr. Compos., 26,765-75,2004.

- sensitive plasticity constitutive model for concrete in triaxial compression". *Int. J. Solids Struct.*, 44,7021–48,2007.
- [33] SIMULIA, Abaqus Analysis User's Manual, version 2016. The Dassault Systemes, Realistic Simulation, USA; 2015.
- [34] Saenz L. "Discussion of "Equation for stress-strain curve of concrete" by Desayi P. Krishnan S.". *ACI J.*, 61,1229–35,1964.
- [35] Model Code 2010. *fédération internationale du béton (FIB)*; 2010.
- [36] ACI 440.2R-17: Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Concrete Structures. 2017.
- [37] Hashin Z. "Failure Criteria for Unidirectional Fiber Composites". *J. Appl. Mech.*, 47,329–34,1980.
- [38] Lu XZ, Teng JG, Ye LP, Jiang JJ. "Bond-slip models for FRP sheets/plates bonded to concrete". *Eng. Struct.*, 27,920–37,2005.
- [39] Garden HN, Hollaway LC, Thorne AM. "The strengthening and deformation behaviour of reinforced concrete beams upgraded using prestressed composite plates". *Mater. Struct. Constr.*, 31,247–58,1998.
- [40] Zhang Y, Li D. "Seismic behavior and design of repairable precast RC beam–concrete-filled square steel tube column joints with energy-dissipating bolts". *J. Build. Eng.*, 44,103419,2021.
- [41] Aykac B, Aykac S, Kalkan I, Dundar B, Can H. "Flexural behavior and strength of reinforced concrete beams with multiple transverse openings". *ACI Struct. J.*, 111,267–77,2014.
- [42] Arslan MH, Yazman Ş, Hamad AA, Aksoylu C, Özkılıç YO, Gemi L. "Shear strengthening of reinforced concrete T-beams with anchored and non-anchored CFRP fabrics". *Structures*, 39,527–42,2022.
- Facil.*, 29,1–9,2015.
- [19] Havez AA, Al-Mayah A. "Flexural Strengthening of Concrete Structures Using Externally Bonded and Unbonded Prestressed CFRP Laminates—A Literature Review". *J. Compos. Constr.*, 27,2023.
- [20] Wang W, Dai J, Zhang L. "Experimental study and analytical modeling of prestress losses of reinforced concrete beams strengthened with post-tensioned CFRP sheets". *Tumu Gongcheng Xuebao/China Civ. Eng. J.*, 45,88–94,2012.
- [21] You YC, Choi KS, Kim J. "An experimental investigation on flexural behavior of RC beams strengthened with prestressed CFRP strips using a durable anchorage system". *Compos. Part B Eng.*, 43,3026–36,2012.
- [22] Pellegrino C, Modena C. "Flexural strengthening of real-scale RC and PRC beams with end-anchored pretensioned FRP laminates". *ACI Struct. J.*, 106,319–28,2009.
- [23] Wang J, Jia Y, Zhang G, Han J, Liu J. "Experimental study on prestressed concrete hollow slabs in service strengthened with prestressed CFRP plates". *Int. J. Struct. Integr.*, 9,587–602,2018.
- [24] El-Hacha R, Wight RG, Green MF. "Innovative system for prestressing fiber-reinforced polymer sheets". *ACI Struct. J.*, 100,305–13,2003.
- [25] Kim YJ, Hyun SW, Kang JY, Park JS. "Anchorage configuration for post-tensioned NSM CFRP upgrading constructed bridge girders". *Eng. Struct.*, 79,256–66,2014.
- [26] Rezazadeh M, Costa I, Barros J. "Influence of prestress level on NSM CFRP laminates for the flexural strengthening of RC beams". *Compos. Struct.*, 116,489–500,2014.
- [27] Wang X, Zhou C. "Numerical investigation for the flexural strengthening of reinforced concrete beams with external prestressed HFRP sheets". *Constr. Build. Mater.*, 189,804–15,2018.
- [28] Aghani K, Afshin H, Abedi K. "Finite element-based prediction of the long-term deflection of reinforced concrete beams strengthened with prestressed fiber-reinforced polymers". *Structures*, 43,358–73,2022.
- [29] AASHTO LRFD Bridge Design Specifications. American Association of State Highway and Transportation Officials; 2012.
- [30] ACI 209R: Prediction of Creep, Shrinkage and Temperature Effects in Concrete Structures. American Concrete Institute; 2008.
- [31] Al Chami G, Thériault M, Neale KW. "Creep behaviour of CFRP-strengthened reinforced concrete beams". *Constr. Build. Mater.*, 23,1640–52,2009.
- [32] Papanikolaou VK, Kappos AJ. "Confinement-

Investigation on the flexural behavior and ductility of reinforced concrete T-beams strengthened with prestressed CFRP sheets

Kian Aghani

Ph.D. candidate of civil engineering, Civil engineering faculty, Sahand University of Technology.

Hassan Afshin *

Associate Professor, Civil engineering faculty, Sahand University of Technology.

Karim Abedi

Professor, Civil engineering faculty, Sahand University of Technology.

Abstract

CFRP composites are considered as the one of the most effective methods in strengthening reinforced concrete (RC) members. Although this method has many privileges, the results show that CFRPs use only 30% ~ 40% of their capacity during the loading of a retrofitted concrete beam or slab and suffer from debonding before reaching their maximum capacity. To overcome this issue, prestressing the CFRP composite is proposed and utilized. The aim of this research is to investigate the effect of this strengthening method on the flexural behavior and ductility of RC T-beams. In this regard, eight scaled RC T-beams with dimensions (250×300×3000 mm) in four series, control samples, beams strengthened with non-prestressed CFRP, beams strengthened with CFRP prestressed by 20% and 35%, were produced. For CFRP prestressing, an innovative mechanical arrangement was utilized. Furthermore, the beams were subjected to a four-point bending test and their behavior was investigated. The results indicate that prestressing the composite has significantly increased the bearing capacity of the strengthened beams and improved their failure mechanism compared those of the strengthened by non-prestressed CFRP. Also, the results show that the decrease in beam ductility, when the composite is prestressed by 35%, is less than 10% compared to that of strengthened beam with non-prestressed CFRP. In addition, a numerical method for simulating the behavior of reinforced concrete beams with prestressed CFRP using subroutine coding in ABAQUS is presented.

Keywords: CFRP Composite, Prestressed, Concrete T-beam, strengthening; ABAQUS.

* Corresponding Author: hafshin@sut.ac.ir

