

بررسی آزمایشگاهی و عددی تیر بتن مسلح مقاوم‌سازی شده با ورق های CFRP

بابک منصوری *

استادیار گروه مهندسی عمران، واحد فیروزآباد، مرکز میمند، دانشگاه آزاد اسلامی، میمند، ایران.

محمدحسین احمدی

استادیار، گروه مهندسی عمران، واحد بیضا، دانشگاه آزاد اسلامی، بیضا، ایران.

چکیده

متداول ترین روش مقاوم سازی تیرهای بتن مسلح، تقویت خمشی این تیرها با مصالح کامپوزیت می باشد. در مقاله حاضر ابتدا یک تیر تقویت نشده در مقیاس واقعی ساخته شد و در آزمایشگاه تحت بارگذاری چهار نقطه‌ای قرار گرفت. سپس برای تقویت تیر در ناحیه‌ی خمشی، تیر مشابهی با استفاده از یک لایه ورق CFRP در ناحیه‌ی خمشی تقویت شد و پس از انجام آزمایش، ملاک صحت‌سنجی مدل‌های عددی قرار گرفت. در مطالعات عددی ۵ نمونه تیر بتن مسلح با روش‌های تقویتی مختلف با نرم افزار آباکوس مورد بررسی قرار گرفت که نتایج به دست آمده نشان می‌دهد تیر تقویت شده با ورق CFRP سراسری با دورپیچ ممتد U شکل، بهترین روش تقویتی به لحاظ ظرفیت و شروع ترک‌ها می باشد. لازم به ذکر است تقویت تیر در محدوده‌ی میانی تیر بتن مسلح تاثیر چندانی بر ظرفیت تیر نداشته اما باعث خارج شدن خرابی از محدوده‌ی خمشی محض تیر می شود.

واژه‌های کلیدی: مقاوم سازی، تیرهای بتنی مسلح، ورق CFRP.

* نویسنده مسئول: Babak.mansoori@iau.ac.ir

۱- مقدمه

تیر بهترین نتیجه را از نظر افزایش لنگر نهایی پیچشی و زاویه دوران از خود نشان می‌دهد و چیدمان الیاف با زاویه ۴۵ درجه این اطمینان را می‌دهد که از اثر بخشی الیاف به‌طور مؤثر استفاده شده است. [۱۴]. پانچا و همکاران مطالعات آزمایشگاهی بر روی رفتار پیچشی تیرهای بتن مسلح تقویت شده با کامپوزیت FRP انجام دادند. تمام تیرهای تقویت شده با ورق‌های GFRP افزایش قابل توجهی در مقاومت پیچشی و لنگر پیچشی ترک خوردگی و دوران پیچشی را نشان می‌دادند، نتایج نشان داد که با استفاده از ورق‌های GFRP افزایش قابل ملاحظه‌ای در مقاومت نهایی قبل و بعد از ترک خوردگی ایجاد خواهد شد [۱۵]. ودولسکی و همکاران مطالعات خود را بر مبنای آزمایشگاهی روی تعداد ۱۲ نمونه تیر بتن مسلح مقاوم سازی شده با مصالح کامپوزیتی از جنس کربن و شیشه با چهار آرایش مختلف چیدمان لایه‌ها بصورت یک و دولایه تقویت کردند. نتایج تحقیق آنها نشان داد که آرایش نصب دورپیچ کامل بصورت یک و دو لایه FRP از جنس کربن و شیشه بیشترین مقاومت پیچشی و خمشی را از خود نشان می‌دهد [۱۶]. جاریوال و همکاران مطالعات آزمایشگاهی بر روی ۵ عدد تیر بتن مسلح تقویت شده با الیاف CFRP و با موضوع تقویت پیچشی تیرهای بتن مسلح بوسیله الیاف و ورق‌های CFRP انجام دادند. نتایج نشان داد که تقویت با مصالح کامپوزیت باعث بهبود عملکرد کلیه تیرها شده است [۱۷]. نجف قلی پور و همکاران به بررسی عملکرد خمشی تیرهای بتن مسلح، با وصله های پوششی، تحت بارگذاری چرخه ای پرداختند. برای این منظور ۹ تیر بتن مسلح در مقیاس واقعی با آرایش‌های مختلف، طراحی و ساخته شد. نتایج آزمایشگاهی نشان داد که نمونه با وصله پوششی مطابق با مقررات ACI 318-14، نمی‌تواند از بارگذاری چرخه‌ای، شکست خمشی را تحمل کند [۱۸]. گارسیا و همکاران میزان چسبندگی را با استفاده از آزمایشات خمشی بر روی ۱۲ نمونه تیر RC بارگذاری شده در میانه تیر مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد که CFRP سبک باعث افزایش استحکام اتصال پیوند تا ۶۵٪ در مقایسه با نمونه‌های غیر قابل کنترل شد. این موضوع باعث ایجاد پراکندگی زیادی در نتایج و فشار بیش از حد فشار ایجاد شده در CFRP می‌شود [۱۹]. ژانگ و همکاران در تحقیقی عددی و آزمایشگاهی یک تیر مقاوم سازی شده با ورق CFRP را مورد مطالعه قرار دادند. نتایج تحقیق آنها نشان داد که استفاده

در حال حاضر مطالعات گسترده‌ای بر روی پلیمرهای تقویت شده با شیت‌های FRP به‌صورت مقاوم‌سازی سازه‌ها به دو صورت داخلی و خارجی انجام می‌شود [۲۰] مقاومت، تغییر شکل، جابجایی و چکش‌خواری در مقاوم‌سازی انواع سازه‌ها توسط الیاف FRP بررسی و گزارش شده است [۳-۹]. آقابزرگی و خالو در تحقیقی به بررسی عددی تأثیر میلگردهای فشاری GFRP بر مقاومت خمشی و شکل پذیری تیرهای بتنی مسلح پرداختند. نتایج نشان داد که منحنی‌های تغییر مکان-نیرو به‌دست آمده از تحلیل عددی مطابقت خوبی با منحنی‌های حاصل از آزمایشگاه داشته است. همچنین افزایش درصد میلگردهای فشاری GFRP، منجر به جذب انرژی بیشتر و در نهایت شکل پذیری بیشتر تیرهای بتنی GFRP شده است [۱۰]. شریفی و خجسته فر (۱۳۹۷) روشی جهت محاسبه مقاومت و خیز اعضاء خمشی بتن مسلح مقاوم شده با الیاف پلیمری ارائه دادند. نتایج حاصل از فرمول‌بندی این تحقیق در حالت نهایی هماهنگی و انطباق بسیار خوبی با نتایج آزمایشگاهی نسبت به حالت تسلیم فولادهای کششی را نشان داد [۱۱]. بادران و وارسته پور به ارائه روشی جهت جلوگیری از وقوع پدیده شکست زودرس در تقویت خمشی تیرهای بتن‌آرمه مسلح با استفاده از الیاف کربن پرداختند. در این تحقیق تیرهای بتنی علاوه بر تقویت به روش کلاسیک با الیاف CFRP و همچنین تقویت به روش L شکل با الیاف CFRP و GFRP، تحت آزمایش خمشی چهار نقطه‌ای قرار گرفتند که منجر به تعویق این پدیده در تیرهای تقویت شده به روش L شکل نسبت به روش کلاسیک شد [۱۲]. از این رو با توجه به اینکه الیاف FRP مقاومت کششی بسیار بالایی نسبت به آلیاژهای فولادی دارند، اتصال FRP به ناحیه کششی تیر بتنی سبب افزایش ظرفیت خمشی مقطع خواهد شد. عوامل متعددی مانند ابعاد مقطع تیر بتنی، مساحت و مشخصات مکانیکی میلگردهای موجود و FRP مورد استفاده و همچنین مقاومت بتن بکار برده شده، در میزان افزایش مقاومت خمشی سازه‌های بتنی با استفاده از سیستم‌های FRP دخیل می‌باشند [۱۳]. کوک لئونگ و همکاران مطالعات آزمایشگاهی را برای بهبود مقاومت پیچشی تیرهای بتن مسلح بر روی ۱۱ عدد تیر انجام دادند. در این مطالعات از هر دو نوع الیاف شیشه و کربن در یک لایه استفاده شد. نتایج تحقیق آنها نشان داد که چیدمان دور پیچ کامل

از ورق CFRP موجب بهبود عملکرد تیر، کاهش ترک‌ها و افزایش مقاومت می‌شود [۲۰]. در تحقیق‌های گذشته صرفاً در ناحیه‌ی خمش خالص مقاوم سازی صورت گرفته بود. در این مقاله بر روی تیر بتن مسلح با مقیاس واقعی مقاوم سازی با ورق CFRP موضعی انجام شد. با توجه به آزمایش تیر بتن مسلح تقویت شده با CFRP مشاهده گردید که شکست پایانی دقیقاً در انتهای ورق CFRP و در ناحیه خمشی رخ داده است. ظرفیت باربری این تیر با تیر تقویت نشده تفاوت چندانی ندارد. با توجه به مدلسازی عددی جهت بالابردن ظرفیت باربری تیر نیاز به مقاوم‌سازی کل تیر می‌باشد و مقاوم‌سازی ناحیه خمش خالص به تنهایی تأثیری بر روی ظرفیت باربری تیر نخواهد گذاشت.

۲- روش پژوهش

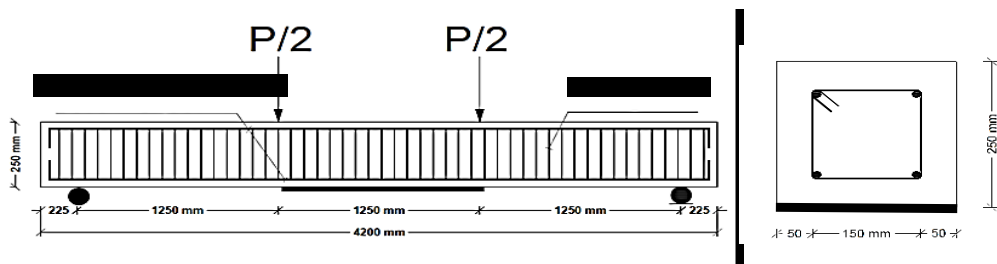
سیستم تحت مطالعه شامل دو تیر بتن مسلح، شاهد و تقویت شده به طول ۴۲۰۰ mm و عرض و ارتفاع ۲۵۰ mm که به وسیله چهار

میلگرد طولی ۱۲Φ و میلگردهای عرضی ۸@80Φ نسبت به یکدیگر مسلح شده‌اند (شکل ۱ و ۲). بتن مورد استفاده جهت ساخت این تیر از نوع C25 (مقاومت فشاری نمونه استوانه ای ۲۵ مگاپاسکال) می‌باشد. مشخصات تیرهای بتنی در جدول شماره ۱ ارائه شده است. تیر بتنی دارای دو تکیه‌گاه ساده و غلتکی در فاصله‌ی ۲۲۵ mm از ابتدا و انتهای تیر بوده که در تمامی مدل‌ها مشابه یکدیگر قرار گرفته است. نمونه تقویت شده با ورق CFRP نیز دارای ابعاد و اندازه نمونه تیر بتنی شاهد با اضافه نمودن یک لایه ورق CFRP جهت بهبود و کنترل ترک‌های خمشی در قسمت تحتانی و در محدوده میانی تیر به طول ۱۲۴۰ mm قرار داده شده است. در این پژوهش سعی گردید تا از وقوع شکست خمشی زود هنگام ناشی از جداشدگی پوشش (کاور بتن) در ناحیه کششی مقطع تیر یا شکست ناشی از ترک‌های میانی تیر به کمک ورق CFRP تا حدودی جلوگیری شود. تیرهای بتن آرمه نیز بر اساس آیین‌نامه ACI318-19 طراحی شده‌اند [۲۱].

جدول ۱- مشخصات تیر های بتنی مورد آزمایش

نام مدل	طول تیر (mm)	عرض تیر (mm)	ارتفاع (mm)	آرماتور طولی	آرماتور عرضی (mm)	تعداد CFRP	طول CFRP (mm)
تیر CB	۴۲۰۰	۲۵۰	۲۵۰	Up Ø 12 Bottom Ø12	Ø ۸ @ ۸۰	-	-
تیر RB	۴۲۰۰	۲۵۰	۲۵۰	Up Ø12 Bottom Ø12	Ø ۸ @ ۸۰	۱	۱۲۴۰

شکل ۱- مدل آزمایشگاهی تیر بدون تقویتی (CB)



شکل ۲- مدل آزمایشگاهی تیر تقویت شده با یک لایه ورق CFRP میانی (RB)

۱-۲- بتن و میلگرد

نمونه‌های آزمون بتن جهت سنجش میزان مقاومت فشاری در سن ۷ و ۲۸ روز به صورت مکعبی ۱۵۰*۱۵۰*۱۵۰ میلیمتر می‌باشد. همچنین آزمون‌های سنجش مقاومت کششی بصورت استوانه‌ای در ابعاد ۱۵۰*۳۰۰ میلیمتر در سن ۲۸ روزه مورد آزمایش برزیلی قرار گرفتند. سایر مشخصه‌های بتن ساخته شده نیز در جدول ۲ ارائه شده است. برای افزایش مقاومت کششی و خمشی تیر بتنی نیز با استفاده از شبکه میلگرد طولی و عرضی نیز مسلح گردیده است. میلگرد بکار رفته جهت تسلیح تیر بتنی نیز از نوع A-3 آجدار می‌باشد. سایر مشخصات فولاد مصرفی در جدول ۳ ارائه شده است.

جدول ۲- طرح اختلاط و مقاومت بتن مورد استفاده جهت ساخت تیرهای آزمایشگاهی

شاخصه	سیمان	شن	ماسه	آب	روان کننده	w/c	sp/c	وزن مخصوص	وزن نمونه	اسلامپ	مقاومت فشاری ۲۸ روزه	مقاومت کششی ۲۸ روزه
واحد	kg/m ³	kg/m ³	kg/m ³	lit/m ³	lit/m ³	%	%	kg/cm ²	gr	mm	Mpa	Mpa
طرح مخلوط بتن	۴۰۰	۸۵۰	۸۰۰	۱۵۲	۲	۰/۳۸	۰/۵	۲۵۳۰	۷۵۲۱	۷۰	۲۵/۲	۳/۹

جدول ۳- مشخصات فیزیکی میلگردهای مورد استفاده جهت ساخت تیرهای آزمایشگاهی

مشخصه	قطر (d)	تنش تسلیم (f _y)	مقاومت کششی (f _u)	کرنش E _t	مدول الاستیسیته E
واحد	mm	Mpa	Mpa		Gpa
میلگرد طولی	۱۲	۴۷۲	۶۱۸	۰/۲۲۴	۲۱۶
خاموت	۸	۳۱۸	۵۲۰	۰/۱۶۱	۲۰۳

۲-۲- ورق CFRP

کامپوزیت CFRP از انواع نمونه‌های ورق‌های FRP هستند که الیاف آن از جنس کربن می‌باشد. این الیاف خاصیت ارتجاعی بالاتری نسبت به نمونه‌های دیگر را دارند. CFRP در مقابل پدیده خستگی مقاومت زیادی دارد و ضریب انبساط گرمایی خطی آن در دماهای بالا و پایین کم است که این خاصیت موجب پایداری آن در دماهای مختلف می‌شود. از دیگر خصوصیات CFRP نسبت بالای مقاومت کششی به وزن کم آن است. این کامپوزیت به شکل خارجی روی اعضای سازه‌ای چسبانده می‌شود [۱]. در مدل آزمایشگاهی تقویت شده با CFRP نیز جهت کنترل ترک‌های خمشی نیز، یک لایه ورق CFRP به طول ۱۲۴۰ میلیمتر در قسمت تحتانی و مرکز تیر نصب گردیده است. سایر مشخصات ورق CFRP مطابق جدول ۴ می‌باشد.

جدول ۴- مشخصات فیزیکی ورق CFRP مورد استفاده در مدل آزمایشگاهی

مشخصه	ضخامت	مدول الاستیک	مدول برشی	مقاومت کششی	ضریب پواسون	تنش تسلیم	کرنش E _t	وزن مخصوص
واحد	mm	Gpa	Mpa	Mpa		Mpa		kg/m ²
ورق CFRP	۰/۱۷	۲۳۰	۳۲۷۰	۹۵۸	۰/۳	۳۹۰۰	۰/۰۱۵	۰/۲۲۵

۳-۲- بارگذاری

در این تحقیق از جک هیدرولیکی با قابلیت اعمال بار تا ۴۰۰ کیلونیوتن استفاده شده است. همچنین یک عدد لود سل ۱۵ تن به انتهای جک وصل شد که اندازه گیری مقدار بار اعمال شده توسط جک به نمونه را در هر لحظه اندازه گیری و با استفاده از دیتا لاگر جهت تحلیل و بررسی نتایج ثبت می‌گردید. تیر بتن مسلح فوق تحت بارگذاری مونوتونیک در آزمایشگاه مورد بررسی قرار گرفت. در حین بارگذاری و در هر مرحله افزایش نیرو نیز میزان جابجایی و تغییر شکل‌های مرکز نمونه توسط تغییر مکان سنج لحاظ شده است (شکل ۳ و ۴).

تیر به حد گسیختگی نزدیک و ترک خورد. در مراحل بعدی و با اعمال بارهای بزرگتر، تعداد ترک‌ها در قسمت میانی تیر افزایش پیدا کرده است که باعث ایجاد رفتار غیر خطی تیر گردیده و شیب منحنی این نمودار دائماً کاهش پیدا نمود. لذا می‌توان نتیجه گرفت که میزان سختی مقطع تیر در حال کاهش است. پس از بارگذاری تیر از ۹۰۰ تا ۱۵۰۰ kg، تعداد ترک‌ها افزایش نداشته و صرفاً عمق ترک‌ها بیشتر شده است. در این حالت تقریباً تمام تنش‌های کششی به‌وجود آمده توسط میلگردهای فولادی مدفون در بتن تحمل گردیده است. همچنین در قسمت مقطع فشاری تیر، حداکثر تنش بوجود آمده ناشی از بارگذاری در دورترین محدوده فشاری به میزان $1/2$ مقاومت فشاری بتن نرسیده که می‌توان نتیجه گرفت، در این محدوده نیز رفتار همچنان خطی می‌باشد. در چنین مواقعی که وضعیت بتن در قسمت کششی دارای ترک و قسمت فشاری دارای رفتار خطی می‌باشد نیز حالت الاستوپلاستیک رخ داده است.

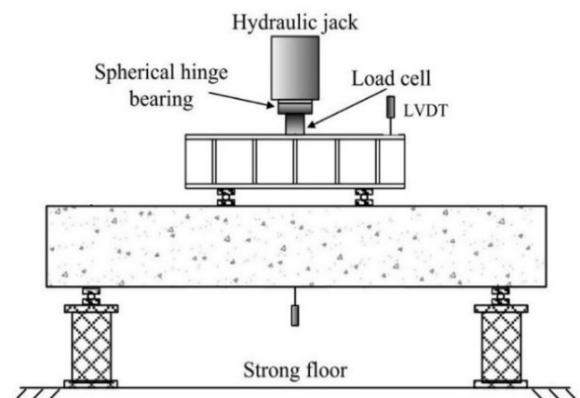
ه) در گام بعدی با افزایش میزان بار وارده و قرار دادن آن در آستانه $1500-2500$ kg نیز، میزان تنش حداکثری در دورترین تار فشاری مقطع از یک دوم مقاومت فشاری بتن بیشتر شده و این محدوده نیز وارد فاز غیر خطی می‌گردد.

ز) در بارگذاری بیش از 2500 kg منحنی بار - تغییر مکان معرف وضعیتی است که تحت آن میزان بار وارده و تغییر شکل خمشی تیر و کرنش فولاد در ناحیه ی کششی به حد تسلیم رسیده است. درحالی که بتن در ناحیه فشاری رفتار غیر خطی دارد در این حالت تار خنثی به شدت به سمت بالا حرکت می‌کند و در نهایت در بارگذاری 3572 kg در دورترین تار فشاری بتن، تقریباً به کرنش بتن رسیده و بنابراین بتن مقاومت فشاری خود را از دست می‌دهد.

پس از بارگذاری، نتایج مطابق با جدول شماره ۵ نشان می‌دهد که تیر کنترل CB با میزان ظرفیت باربری 3572 کیلوگرم و نیز خیز حداکثری در مرکز دهانه به میزان 127 میلی‌متر دچار شکست گردید. همچنین تیر مقاوم سازی شده RF با یک لایه ورق CFRP به میزان 6% دارای افزایش مقاومت فشاری و 19% کاهش خیز نسبت به نمونه CB را کسب کرده است. این در حالی است که این ورق باعث گردیده تا ترک‌های خمشی ایجاد شده در این تیر کمتر از نمونه تیر کنترل باشد



شکل ۳- نحوه ی بارگذاری تیر بتن مسلح در محیط آزمایشگاه



شکل ۴- مدل بارگذاری تیر بتن مسلح تحت خمش چهار نقطه ای

۲-۴- مدل آزمایشگاهی

شکل ۵، نمودار بار-تغییر مکان حاصل از بارگذاری تیر بتنی تقویت شده و تقویت نشده در آزمایشگاه می‌باشد. مراحل بارگذاری در نمونه تقویت نشده به شرح زیر بوده است:

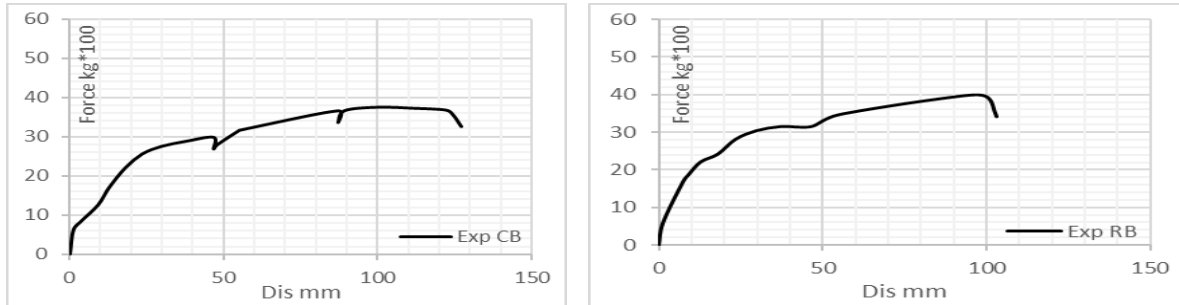
الف) در مرحله اول، تیر مورد آزمایش تحت بارگذاری حداکثر 200 kg قرار گرفت. در این حالت به دلیل کم اثر بودن میزان بار وارده، رفتار تیر کاملاً خطی و ترک خوردگی در محدوده کششی تیر مشاهده نشد.

ب) در مرحله دوم، تیر مورد آزمایش تو تحت بارگذاری حداکثر 350 kg قرار گرفت. در این میزان بارگذاری مقطع هنوز ترک نخورده اما میزان تنش بوجود آمده در دورترین تار کششی، ناشی از خمش قرار گرفته است.

ج) در مرحله سوم، بارگذاری به میزان حداکثر 500 kg انجام شد. در حالی که بار وارده 400 کیلوگرم به نمونه اعمال شد، ترک‌های اولیه در ناحیه کششی تیر بوجود آمد. لذا در این حالت حداکثر میزان تنش ممکن در مقطع کششی تیر ایجاد شده و مقطع کششی

جدول ۵- نتایج حاصل از بارگذاری و شکست تیرهای آزمایشگاهی

نام تیر	بار وارده Kg	جابجایی Mm	مساحت ورق تقویتی mm ²	محل نصب ورق تقویتی
CB	۳۵۷۲	۱۲۷	-	-
RB	۳۹۸۶	۱۰۳	۳۱۲/۵	تحتانی



شکل ۵ - نمودار بار - تغییر مکان تیر بتن مسلح بدون تقویت حاصل از شکست آزمایشگاهی

بارگذاری و مشخصات بتن، میلگرد و صفحات CFRP یکسان در

۲-۵- مدلسازی عددی

نظر گرفته شده است.

در این تحقیق جهت مدلسازی عددی و بهینه‌سازی نمونه تیرهای

همچنین در فواصل مشابه با نمونه آزمایشگاهی تحت بارگذاری

مقاوم سازی شده با ورق CFRP در روش‌های نصب متفاوت در

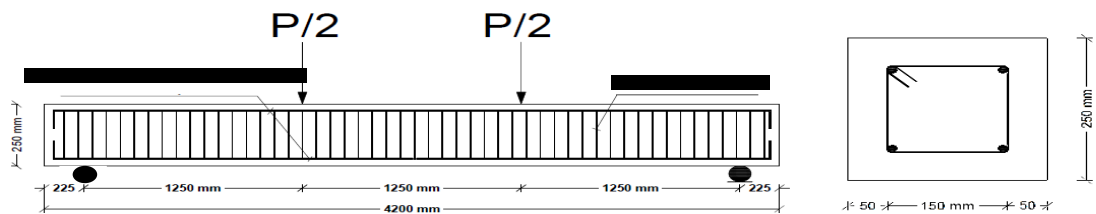
محوری بار - جابجایی قرار داده شده و در نهایت تحت تحلیل

نرم افزار Abaqus اقدامات لازم صورت گرفته است. برای مدل

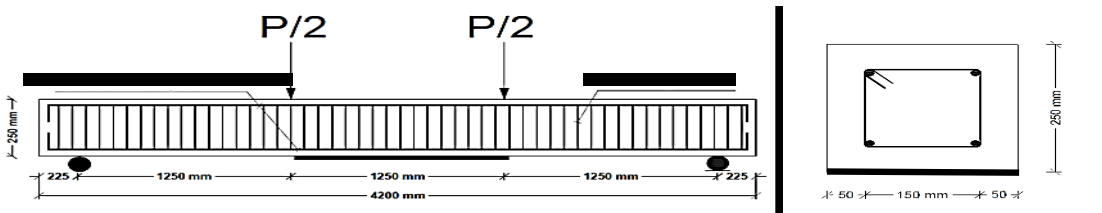
پوش آور قرار گرفته و نمودار بار - تغییر مکان آن استخراج شده

کردن تیر بتن مسلح و تقویت آن با ورق CFRP مجموعاً ۷ مدل

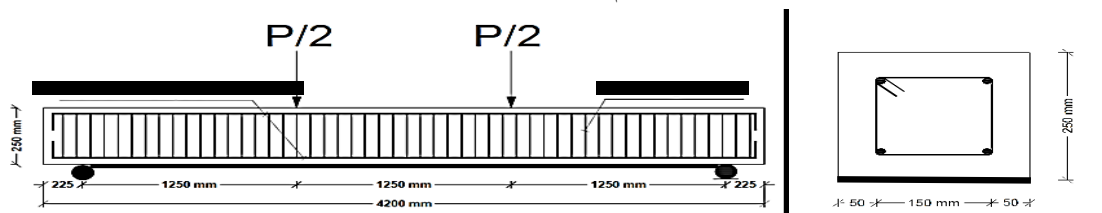
عددی با روش‌های مختلف استفاده از ورق CFRP تحت است.



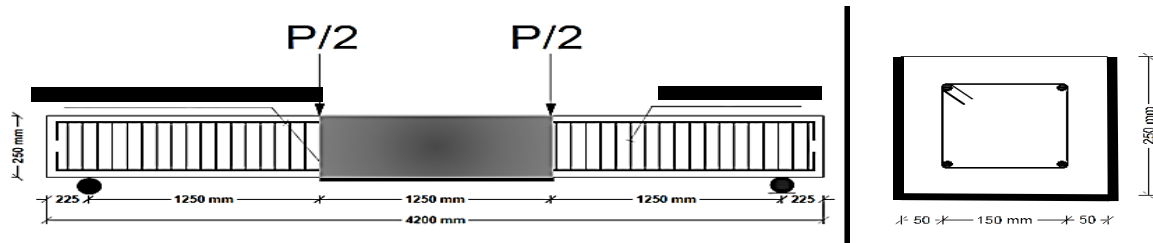
شکل ۷- شماتیک مدلسازی عددی تیر بتن مسلح بدون تقویتی - CB



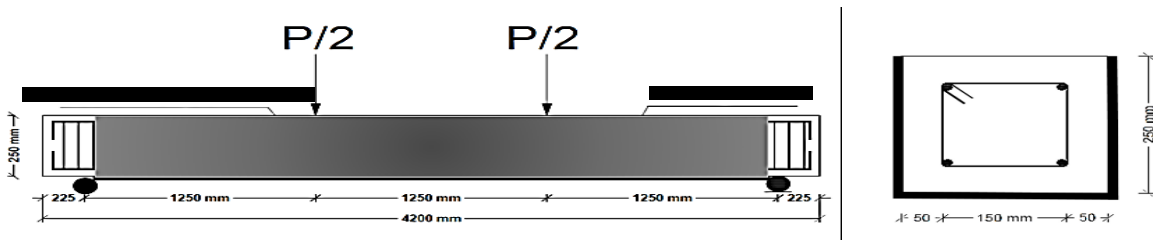
شکل ۸- شماتیک مدلسازی عددی تیر مقاوم سازی شده با یک لایه ورق CFRP تحتانی و میانی - RB



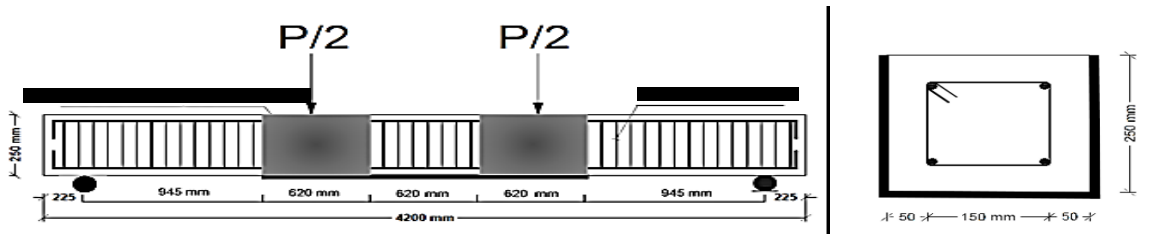
شکل ۹- شماتیک مدلسازی عددی تیر مقاوم سازی شده با ورق CFRP سرتاسری با متد نصب تحتانی - RB2



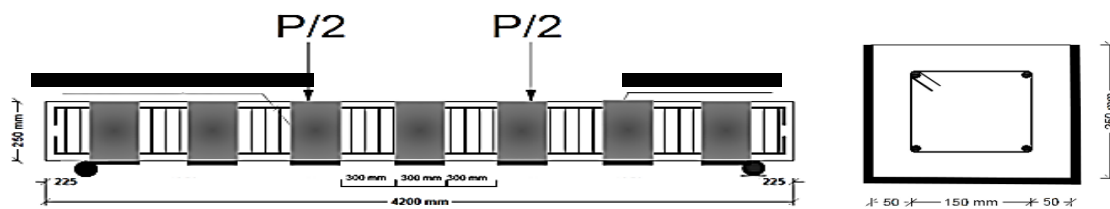
شکل ۱۰- شماتیک مدلسازی عددی تیر مقاوم سازی شده با ورق CFRP میانی با متد نصب U شکل - RB3



شکل ۱۱- شماتیک مدلسازی عددی تیر مقاوم سازی شده با ورق CFRP میانی با متد نصب U شکل - RB4



شکل ۱۲- شماتیک مدلسازی عددی تیر مقاوم سازی شده با ورق CFRP سرتاسری با متد نصب U شکل - RB5



شکل ۱۳- شماتیک مدلسازی عددی تیر مقاوم سازی شده با ورق CFRP ممتد با متد نصب U شکل - RB6

۶-۲- رفتار بتن

ترکیب نمود. برای معرفی رفتار کامل بتن باید علاوه بر پارامترهای

الاستیک (مدول الاستیسیته و ضریب پواسون) با مدل CDP مقادیر عددی پنج پارامتر الاستیک و پارامترهای اختصاصی معرف رفتار بتن در کشش و فشار به نرم افزار آباکوس داده شوند. جدول ۶ مقادیر عددی جهت تعریف رفتار بتن نشان می دهد.

بهترین مدل رفتاری برای شبیه سازی بتن، مدلی است که ترکیبی از رفتار خطی و خرابی پلاستیسیته را نمایش دهد. بر همین مبنا محققان توصیه کردند که رفتار ایزوتروپیک خرابی الاستیک را با مفهوم رفتار ایزوتروپیک پلاستیک در فشار و کشش بتن می توان

جدول ۶ مقادیر عددی جهت تعریف رفتار بتن در نرم افزار آباکوس

چگالی بتن	مقاومت فشاری بتن	زاویه اتساع	خروج از محوریت	f_{b0}/f_{bc}	k	ویسکوزیته	مدول الاستیسیته	ضریب پواسون
۲۵۰۰	۲۵۰	۳۰	۰/۱	۱/۱۶	۰/۵۵	۰/۰۰۱	۲۳/۵	۰/۲

۲-۷- رفتار فولاد

تنها نیروی محوری انتقال یافته و هیچ گونه لنگری ایجاد نمی-
 برای معرفی آرماتورهای طولی و عرضی از المان های خرپایی سه
 بعدی با تغییر شکل های خطی استفاده شد. در این نوع المان ها، آباکوس نشان می دهد.

جدول ۷- مقادیر عددی جهت تعریف رفتار فولاد در نرم افزار آباکوس

کرنش پلاستیک	تنش تسلیم	مدول یانگ	ضریب پواسون	چگالی
۰	۵*۱۰ ^۸	۰/۳	۲*۱۰ ^{۱۱}	۷۵۸۰

۲-۸- رفتار CFRP

جهت، جهت فیبرها با محور صفر هم راستا می باشد. چگالی CFRP،
 جهت شبیه سازی ورق AQUS CFRP در این تحقیق رفتار آن ۱۸۰۰ و ضخامت آن ۰/۱۷ میلی متر می باشد. جدول ۸ و ۹ مقادیر عددی
 به صورت ایزوتروپ و حالت Lamina مدل شده است. در الیاف یک جهت تعیین رفتار CFRP در نرم افزار آباکوس را نشان می دهد.

جدول ۸- مقادیر عددی جهت تعیین رفتار الاستیک CFRP در نرم افزار آباکوس [22]

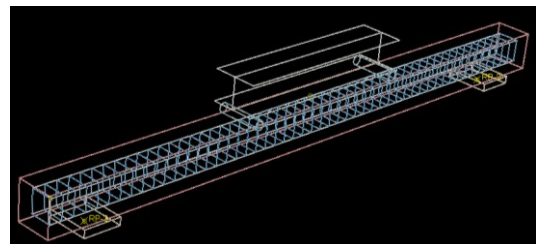
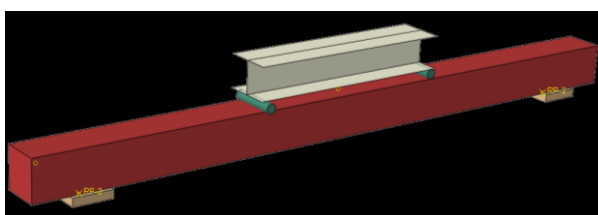
E1	E2	Nu12	G12	G13	G23
۷۰	۷۰	۰/۲۲	۳/۲۷	۳/۲۷	۱/۸۶

جدول ۹- مقادیر عددی جهت تعیین رفتار آسیب پذیری Hashin Damage CFRP در نرم افزار آباکوس

مقاومت کششی	مقاومت فشاری	مقاومت کششی	مقاومت فشاری	مقاومت برشی	مقاومت برشی
طول	طول	عرضی	عرضی	عرضی	عرضی
۴۸*۱۰ ^۶	۹۶*۱۰ ^۶	۷۴*۱۰ ^۶	۷۴*۱۰ ^۶	۹۵*۱۰ ^۶	۹۵*۱۰ ^۶

۲-۹- نوع تحلیل

در روش تحلیل پوش آور، با اعمال یک بار- جابجایی در مرکز
 جرم، دال، به آن فشار به صورت افزون شده وارد می نمایم تا به
 اندازه تغییر مکان معینی (تغییر مکان هدف) جابه جا شود، حال
 نیروهای ایجاد شده در اعضا را محاسبه می کنیم. تحلیل به این
 روش، به پوش آور معروف می باشد. در نرم افزار آباکوس برای
 محاسبه ظرفیت باربری توام با جابجایی از حل گر جنرال استاتیک
 استفاده شده است. نتیجه این تحلیل برای تهیه نمودار بار-تغییر
 مکان که در یک جهت میزان بار تحمل شده را توسط سقف و در
 جهت دیگر میزان جابجایی یا تغییر شکل ناشی از تنش وارده شده
 بر سقف را نشان می دهد. در این روش مینا، تغییر مکان فرض شده
 این است که با وارد شدن به ناحیه غیرخطی این تغییر شکل ها هستند
 که تعیین کننده رفتار سازه می باشند، زیرا با ورود به ناحیه
 غیرخطی یعنی پس از تسلیم عضو، با افزایش نیروهای کوچک
 تغییر شکل های بزرگ خواهیم داشت. شکل ۱۴ مدلسازی عددی
 تیر بتنی را نشان می دهد.



شکل ۱۴- مدلسازی عددی تیر بتنی و شرایط تکیه گاهی و بار گذاری در محیط نرم افزار آباکوس

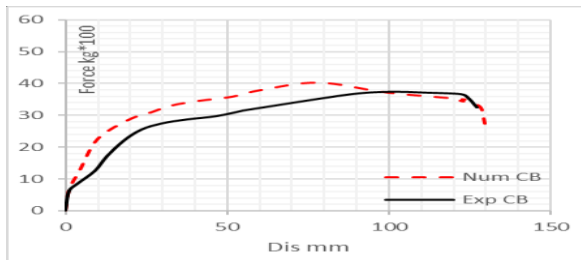
۱۰-۲- صحت سنجی

است، می توان نتیجه گرفت که مقاوم سازی در محدوده خمش تأثیری بر ظرفیت باربری تیر نخواهد داشت و فقط باعث دور شدن ترک ها از این ناحیه می شود.

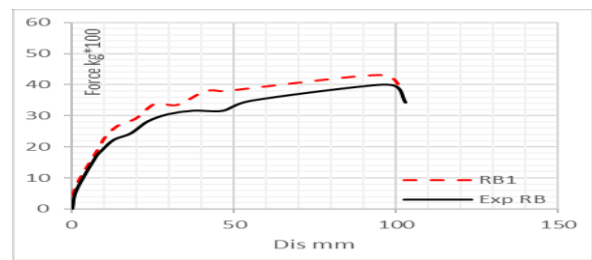
جهت اعتبار سنجی نتایج حاصل از مدل سازی عددی با نمونه های آزمایشگاهی در مرحله اول تیرهای CB و RB در نرم افزار آباکوس اعتبار سنجی شدند. مطابق با نمودار ۱۵ و ۱۶ می توان اذعان کرد که نتایج از دقت خوبی برخوردار است. میزان اختلاف اندکی که در نتایج به وجود آمده است ناشی از غیر قابل پیش بینی بودن دقیق رفتار بتن در محدوده ی پلاستیک می باشد. همچنین در شکل ۱۷ و ۱۸ مقایسه ترکهای دو تیر آزمایشگاهی و عددی نشان داده شده است. شکل ۱۸-الف ترک های تیر در بارگذاری های مختلف و شکل ۱۸-ب مکانیسم شکست تیر در انتهای تقویت تیر بتنی مسلح با ورق یک لایه CFRP را نشان داده است. با توجه به اینکه در محدوده خمش این شکست اتفاق افتاده

۳- یافته ها

در این تحلیل پس از قرار دادن بار-جابجایی در مرکز تمامی تیرهای مورد پژوهش، حداکثر میزان جابجایی مدل عددی در مرکز تیر CB ۱۲۷ میلی متر و میزان ظرفیت باربری آن ۳۷۴۲ کیلوگرم بوده است. در تیر کنترل، تمرکز تنش ها در مرکز تیر بوده و شکست آن به صورت خمشی اتفاق می افتد. با عنایت به مقاوم سازی با ورق یک لایه CFRP در یک سوم میانی، میزان ظرفیت باربری آن در مقایسه با تیر شاهد ۶٪ افزایش و خیز آن ۱۱٪ مقدار کاهش یافت.



شکل ۱۶- صحت سنجی نتایج مدل سازی عددی و آزمایشگاهی تیر بتن مسلح بدون تقویتی CB



شکل ۱۵- صحت سنجی نتایج مدل سازی عددی و آزمایشگاهی تیر بتن مسلح مقاوم سازی شده با ورق CFRP تحتانی و میانی RB1



شکل ۱۸- الف مقایسه بین ترک های ایجاد شده در مدل سازی عددی و آزمایشگاهی تیر مقاوم سازی شده RB1



شکل ۱۷ مقایسه بین ترک های ایجاد شده در مدل سازی عددی و آزمایشگاهی تیر بتن مسلح بدون تقویت CB



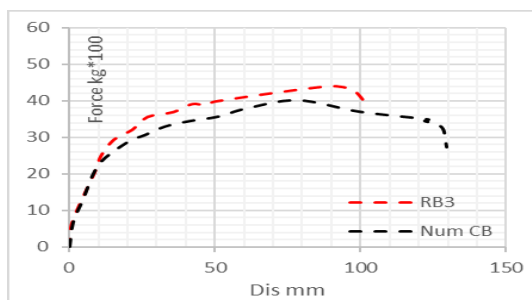
شکل ۱۸-ب- ترک سرتاسری زیر تیر بتن مسلح در قسمت انتهایی ورق CFRP

این نمونه به جهت افزایش سختی تیر ناشی از اتصال ورق CFRP تحتانی علاوه بر میزان اندکی در ظرفیت باربری، شاهد شکست خمشی

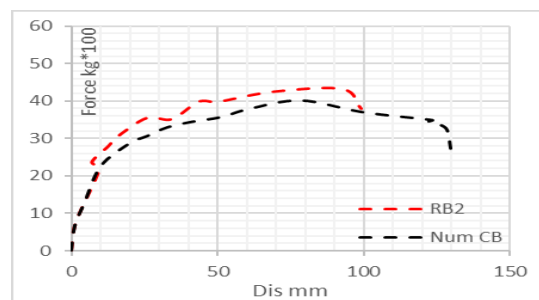
در نمونه RB2 مشخص گردید که ظرفیت باربری آن در مقایسه با تیر کنترل ۱۵٪ افزایش و میزان جابجایی آن ۳۳٪ کاهش داشته است. در

تیر که با عنوان RB5 نامگذاری شده شاهد افزایش میزان ظرفیت باربری ۲۳٪ درصدی و کاهش خیز میانی ۲۶٪ درصدی نسبت به نمونه CB بوده ایم. در این نمونه ترک‌های خمشی به میزان حداقل رسیده اما شاهد ترک برشی نیز هستیم. میزان آسیب پذیری این نمونه در قسمت‌های برشی بیشتر از میانه تیر یا ترک‌های خمشی است. در نهایت نمونه RB6 با اتصال ورق CFRP بصورت یک در میان و هر کدام به اندازه ۳۰۰ میلی‌متر با روش نصب U شکل در طول تیر شاهد افزایش ۲۲٪ میزان ظرفیت باربری و کاهش ۳۱٪ خیز تیر نسبت به نمونه شاهد هستیم. در این روش تقویت، ترک‌ها برشی از بین رفته و در یک سوم طول تیر شاهد، شکست تیر تحت بار گذاری بالا بوده و می‌توان اذعان داشت که میزان ترک‌های بوجود آمده در این مدل نیز مانند تیر RB4 به حداقل میزان دست یافته در مقایسه با سایر مدل‌ها می‌باشد. شکل ۱۹ الی ۲۳، نمودار بار - تغییر مکان، شکل ۲۵ الی ۳۱، انواع ترک‌های خمشی و آسیب‌های پلاستیسته و شکل ۲۴ نمودار بار - تغییر مکان در نرم افزار آباکوس، ارائه شده است.

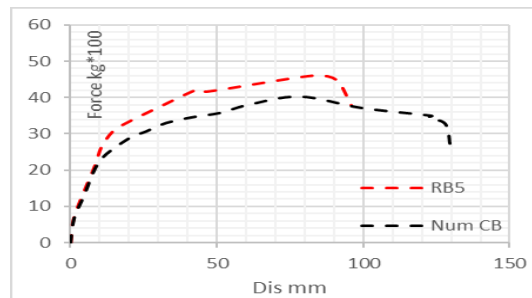
و برشی در تیر هستیم. تیر RB3 با اتصال ورق CFRP در قسمت تحتانی و جانبی به میزان ۱۲۴۰ میلی‌متر با روش U شکل باعث افزایش میزان باربری به ۱۷٪ و کاهش ۲۱٪ درصدی میزان جابجایی در مقایسه با نمونه شاهد گردید. ترک و شکست‌های رخ داده در این مدل عمدتاً خمشی بوده و در مناطقی که محل اتصال ورق CFRP بوده است این ترک‌ها حداقل است و در واقع ترک از قسمت میانی تیر تا حدودی دور شده است. با تحلیل تیر RB4 که با ورق CFRP سرتاسری در قسمت فوقانی و جانبی بصورت U شکل محصور شده است، میزان ظرفیت باربری به میزان ۳۰٪ درصد افزایش و میزان جابجایی یا تغییر شکل مرکز تیر ۳۵٪ کاهش در مقایسه با نمونه CB داشته است. همچنین در این تحلیل مشاهده گردید که شکست‌ها و ترک‌ها تا میزان زیادی کنترل شده و ترک‌های بتن به حداقل رسیده است. در این مدل هیچ گونه ترک برشی رخ نداده است. نمونه عددی تیر بتنی مسلح مقاوم سازی شده با ورق CFRP به صورت ترکیبی از روش تحتانی به طول ۱۸۶۰ میلی‌متر و استفاده از دو صفحه U شکل هر کدام به اندازه ۶۲۰ میلی‌متر در میانه



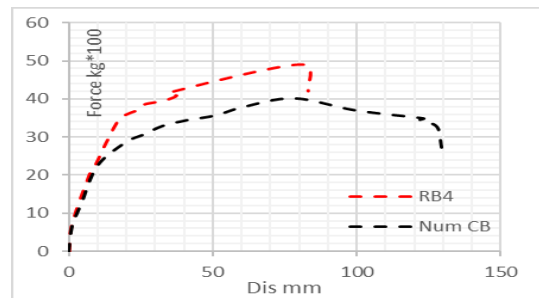
شکل ۲۰ مقایسه نمودار بار - تغییر مکان مدل عددی تیر RB3 با مدل CB



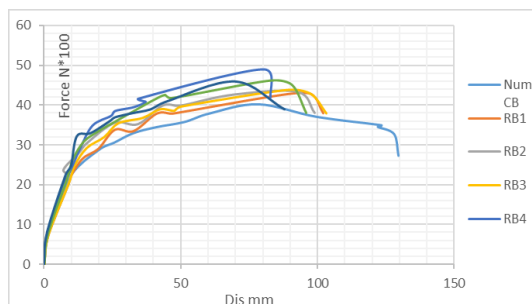
شکل ۱۹ مقایسه نمودار بار - تغییر مکان مدل عددی تیر RB2 با مدل CB



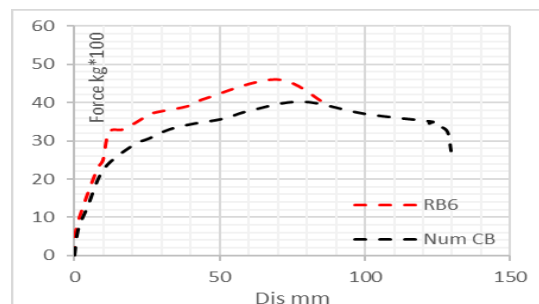
شکل ۲۲ مقایسه نمودار بار - تغییر مکان مدل عددی تیر RB5 با مدل CB



شکل ۲۱ مقایسه نمودار بار - تغییر مکان مدل عددی تیر RB4 با مدل CB



شکل ۲۴ مقایسه نمودار بار - جابجایی تیر های مدل سازی شده در نرم افزار آباکوس



شکل ۲۳ مقایسه نمودار بار - تغییر مکان مدل عددی تیر RB6 با مدل CB



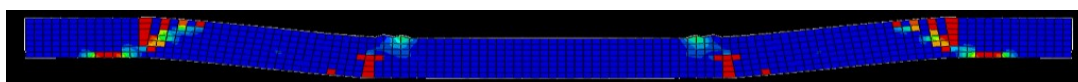
شکل ۲۴- ترک های خمشی و آسیب های پلاستیسیته بتن در تیر CB



شکل ۲۵- ترک های خمشی و آسیب های پلاستیسیته بتن در تیر RB1



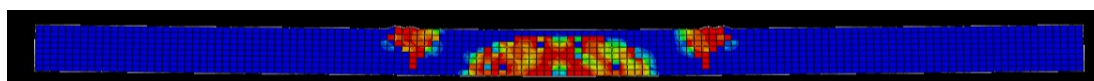
شکل ۲۶- ترک های خمشی و آسیب های پلاستیسیته بتن در تیر RB2



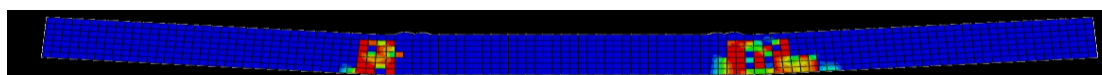
شکل ۲۷- ترک های خمشی و آسیب های پلاستیسیته بتن در تیر RB3



شکل ۲۸- ترک های خمشی و آسیب های پلاستیسیته بتن در تیر RB4



شکل ۲۹- ترک های خمشی و آسیب های پلاستیسیته بتن در تیر RB5



شکل ۳۰- ترک های خمشی و آسیب های پلاستیسیته بتن در تیر RB6

۴- بحث و نتیجه گیری

شکست برشی رخ نداده است.

۴. میزان ظرفیت باربری تیرهای تقویت شده با ورق CFRP بصورت U شکل بیشتر از تیرهای تقویت شده با ورق CFRP بصورت تحتانی تنها می باشد و علت آن محصور شدگی تیر توسط صفحات CFRP بوده که باعث استفاده حداکثری از ظرفیت خمشی این تیرها شده است.

۶. با توجه به نتایج تیرهای RB1 و RB2 می توان اذعان نمود که افزایش طول صفحات CFRP در نواحی نزدیک به مرکز تیر تاثیری در افزایش ظرفیت باربری و یا کنترل ترک ها ندارد. در واقع ابعاد و اندازه ورق CFRP مذکور توانایی مقاومت در برابر خیز ناشی از بارگذاری در مرکز تیر را ندارد.

۷. در تیر کنترل CB تغییر شکل ها و خیز میانی بیشتری تجربه می - گردد که تفاوت عمده در خاصیت پلاستیک فولاد است زیرا فولاد پس از رسیدن به تنش تسلیم به رفتار خود در ناحیه پلاستیک ادامه می دهد. (رفتار غیر خطی دارد) اما میزان باربری آن کمتر از نمونه

۱. تقویت تیرهای بتنی با ورق CFRP بصورت تحتانی با تقویتی U شکل، باعث افزایش ظرفیت باربری تیر می گردد اما شکل پذیری تیر، بدلیل شکننده و ترد بودن در مترال CFRP باعث می شود تا رفتار تیر بتنی تردتر گردد.

۲. با بررسی نتایج به دست آمده از تحلیل تیرهای تقویت شده در مدلسازی عددی می توان دریافت که بهترین محل نصب برای اتصال CFRP بصورت U شکل و سرتاسری است اما بهینه ترین آن در مقایسه با عملکرد تیرهای مورد مطالعه نیز استفاده از ورق CFRP بصورت متناوب در مدل RB6 می باشد که یکی از دلایل آن محصور شدگی تیر بتنی در قسمت جانبی و پیرامونی و همچنین وجود تنش برشی ماکزیمم در این ناحیه می باشد.

۳. در تمامی تیرهای مورد مطالعه در این تحقیق، شاهد شکست برشی و خمشی بوده، به استثنای مدل های RB4 و RB6 که به دلیل استفاده بهینه از ترکیب ورق های CFRP مشاهده گردید که

Composites in Infrastructure National Science Foundation National Science Foundation, 1996.

[10] Aghabozorgi, P., Khaloo, A. Numerical investigation of the effects of compression GFRP reinforcement on the flexural strength and ductility of reinforced concrete beams. *Journal of Concrete Structures and Materials*, 2018. 5(1), 31-45.

[11] Sharifi, Y., Khojastefar, E. A method to assess capacity and deflection of flexural reinforced concrete members retrofitted with FRP. *Journal of Concrete Structures and Materials*, 2018. 3(2), 77-88.

[12] Baderan, M., Varaste Poor, H. An experimental method to prevent fast fracture phenomenon in bending of carbon and glass reinforced concrete beams. *Journal of Concrete Structures and Materials*, 2016. 1(2), 73-82.

[13] Talebzadeh, M., Rostamian, M. Modeling of reinforced beams with FRP sheet and its validation with laboratory results, *Conference on Civil Engineering, Architecture and Urban Planning of the Islamic World*, 2018.

[14] Kok S Leong, Effect Of Beam Size & FRP Thickness On Interfacial Shear Stress Concentration & Failure Mode In FRP Strengthened Beam, MS Thesis, Singapor, 2017.

[15] Pancha S., Norris T, Saadatmanesh H, Ehsani M. Improving The Serviceability Of Concrete Beams Using Carbon Fiber Reinforced Polymer (CFRP) Sheets. *Federal Highway*, 2016.

[16] Podoloski S., Taqieddin ZN Elasto-Plastic And Damage Modeling Of Reinforced Concrete, Ph.D. Dissertation, Dept. Civil & Environmental Engineering, Louisiana State Univ. Baton Rouge LA, 2018.

[17] Jarival M., Obaidat YT, Heyden S, Dahlblom O "The Effect Of CFRP And CFRP/ Concrete Interface Models When Modeling Retrofitted RC Beams With FEM" *Journal Of Composite Structures*, 2018.

[18] Najafgholipour, S.M. Dehghan, M. Khani, A. Heidari (2018). The performance of lap splices in RC beams under inelastic reversed cyclic loading. *Structures* 24 July, 2018.07.011.

[19] Garsia G., Heyden S, Dahlblom O "The Effect Of Cfrp And Cfrp/ Concrete Interface Models When Modeling Retrofitted Rc Beams With Fem" *Journal Of Composite Structures*. 2019.

[20] ZHANG, Yafang, et al. Experimental and numerical study on multi-impact performance of pre-damaged beams strengthened with CFRP. *Engineering Structures*, 2023, 285: 116034.

[21] ACI 318-19. Building Code Requirements for Structural Concrete. Reported By ACI Committee 318.

های تقویت شده با صفحات CFRP می باشد.

۸. بکارگیری ورق CFRP در نواحی خمش خالص برای افزایش ظرفیت باربری، توصیه نمی شود. به این علت که با توجه به آزمایش تیر بتن مسلح تقویت شده با CFRP مشاهده گردید که شکست پایانی دقیقاً در انتهای ورق CFRP و در ناحیه خمشی رخ داده است. ظرفیت باربری این تیر با تیر تقویت نشده تفاوت چندانی ندارد. با توجه به مدلسازی عددی جهت بالابردن ظرفیت باربری تیر نیاز به مقاوم سازی کل تیر می باشد و مقاوم سازی ناحیه خمش خالص به تنهایی تاثیری بر روی ظرفیت باربری تیر نخواهد گذاشت.

۵- مراجع

[1] ACI Committee 440. Guide for the design and construction of externally bonded FRP systems for strengthening concrete structures: ACI 440.2 R-17. American Concrete Institute, 2017.

[2] American Concrete Institute. Committee 440. Guide for the Design and Construction of Structural Concrete Reinforced with FRP Bars: ACI 440.1 R-06. American Concrete Institute, 2006.

[3] Saliha H, Bennetta C, Matamorosb A. Evaluation of novel combined CFRP-steel retrofit for repairing distortion-induced fatigue, *Journal of Constructional Steel Research*, 182: 106642, 2021.

[4] Eslamia A, Shayeghb H R, Moghavema A, Ronaghc H R, Experimental and analytical investigations of a novel end anchorage for CFRP flexural retrofits, *Composites Part B: Engineering*, 176: 107309, 2019.

[5] Falah Hassana H, et al, Flexural performance of concrete beams reinforced by gfrp bars and strengthened by cfrp sheets, *Case Studies in Construction Materials*, 13: e00417, 2020.

[6] Ali H, Assih J, Li A, Flexural capacity of continuous reinforced concrete beams strengthened or repaired by CFRP/GFRP sheets, *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 104:102759, 2021.

[7] Elbana A, Junaid M T, Determination of flexural capacity for GFRP-reinforced concrete beams retrofitted using external CFRP sheet, *Structures*, 27: 1384-1395, 2020.

[8] Benmokrane B, Masmoudi R. Flexural response of concrete beams reinforced with FRP reinforcing bars. *Struct J.*, 1996;93:46-55.

[9] M'Bazaa I, Missihoun M, Labossiere P. Strengthening of reinforced concrete beams with CFRP sheets. *First International Conference on*

Investigation of Experimental and Numerical Reinforced Concrete Beam Retrofitted by CFRP Sheets

Babak Mansouri*

Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Firoozabad Branch, Meymand center, Islamic Azad University, Meymand, Iran.

Mohammad Hossein Ahmadi

2. Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Beyza Branch, Islamic Azad University, Beyza, Iran.

Abstract

One of the conventional retrofitting methods for reinforced concrete beams is flexural strengthening of beams with CFRP materials. In this study, a full scale reinforced concrete beam was constructed and evaluated under four-point flexural test. Afterward, a same beam was retrofitted in flexural region by monolayer of CFRP. These experimental tests were carried out to be the basis of verification for numerical specimens. For numerical study, ABAQUS software was used for modeling and analysis of totally five retrofitted reinforced concrete beams. The results show that the fully retrofitted beam with CFRP laminate and U-shape wraps has the best performance in terms of capacity and delay for emergence of cracks. It is worth to say, flexural strengthening in the middle of beam has not notable result in capacity, though, could convey the failure mechanism to out of pure bending region.

Keywords: Retrofit, Flexural strength, Concrete beams, CFRP Sheet.

* Corresponding Author: Babak.mansoori@iau.ac.ir

