



www.cpjournals.com

نشریه عمران و پروژه
Civil & Project Journal (CPJ)

Optimization of reinforced concrete beams with FRP rebars and sheets in different installation methods by finite element method

Saeed Radmanesh^{۱*}, Amirhossein Bazae^۲, Roozbeh Agha Majidi^۳

^{۱*}- Master of Structural Engineering, Department of Civil Engineering, Tabnak Lamerd Non-Profit Institute, Fars, Iran
Email: saeedrad.۷۱@gmail.com

^۲- Instructor, Department of Civil Engineering, Islamic Azad University, Meymand Branch, Fars, Iran
Email: Amirhosseinbazae@gmail.com

^۳- Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Islamic Azad University, Sepidan Branch, Fars, Iran
Email: roozbeh.۱۳۸۱@yahoo.com

ABSTRACT

Flexural reinforcement of reinforced concrete beams with composite materials is one of the most common methods of structural reinforcement. Composite materials have several advantages such as ease of implementation, easy access, relatively low cost, increased bearing capacity, low weight, etc., but despite all these advantages, the use of these materials also has disadvantages, which can be Premature and sudden bending failure in beams reinforced with these materials, which occurs due to premature rupture of composite materials or even deterioration of the joint area due to lack of attention to the stability of epoxy adhesive from the concrete surface in the tensile zone of the beam, noted. In this paper, by designing a computational program with Abacus software, ۷ examples of reinforced concrete beam reinforcement design with GFRP rebar by near-surface installation method (NSM) and its integration with various FRP sheet enclosure cases taken from a This is a laboratory study, an attempt was made to prevent premature failure of the reinforced beam and to be able to use the maximum capacity of GFRP rebar. It is noteworthy that in modeling this reinforcement design with composite materials, the effect of ultimate adhesion resistance and failure or deterioration of epoxy adhesive between NSM rebar and concrete surface is important, so in this modeling of the joint area which is epoxy adhesive modeling and its behavior Has been examined. The use of this reinforcement method with four NSM rebars and FRP sheets increased the final bearing capacity by more than ۶۰٪ compared to conventional reinforced concrete beams.

Keywords: Reinforcement, flexural reinforcement, reinforced concrete beam, GFRP rebar, NSM method.

All rights reserved to Civil & Project Journal.



www.cpjournals.com

نشریه عمران و پروژه
Civil & Project Journal (CPJ)

بهینه سازی تیر مسلح بتنی تقویت شده با میلگرد و ورق FRP در متدهای نصب

مختلف به روش اجزاء محدود

سعید رادمنش^{۱*}، امیرحسین بازایی^۲، روزبه آقامجیدی^۳

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی سازه، گروه مهندسی عمران، موسسه غیرانتفاعی تابناک لامرد، فارس، ایران
پست الکترونیکی: saeedrad.071@gmail.com

۲- مربی، گروه مهندسی عمران، دانشگاه آزاد اسلامی واحد میمند، فارس، ایران
پست الکترونیکی: Amirhosseinbazaee@gmail.com

۳- استادیار، گروه مهندسی عمران، دانشگاه آزاد اسلامی واحد سپیدان، فارس، ایران
پست الکترونیکی: roozbeh1381@yahoo.com

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۲/۲۴

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۱/۲۴

چکیده

مقاوم سازی خمشی تیرهای بتن مسلح با مصالح کامپوزیت از متداول ترین روش های تقویت سازه می باشد. مصالح کامپوزیت دارای مزایای متعددی مانند سهولت در اجرا، دسترسی آسان، هزینه نسبتاً پایین، افزایش میزان ظرفیت باربری، وزن کم و غیره می باشد، اما علرغم تمامی این مزایا نیز بکارگیری این مصالح دارای معایبی هم می باشند که از جمله می توان به شکست زود هنگام و ناگهانی خمشی در تیرهای مقاوم سازی شده با این مصالح که در اثر گسیختگی زودرس مصالح کامپوزیت و یا حتی زوال ناحیه اتصال ناشی از عدم توجه به پایداری چسب اپوکسی از سطح بتن در ناحیه ی کششی تیر اتفاق می افتد، اشاره نمود. در این مقاله با ایجاد طرح ریزی یک برنامه ی محاسباتی با نرم افزار آباکوس، تعداد ۷ نمونه طرح مقاوم سازی تیر بتن مسلح با میلگرد GFRP به روش نصب نزدیک به سطح (NSM) و ادغام آن با انواع حالات محصورشدگی ورق FRP که برگرفته از یک مطالعه آزمایشگاهی است، تلاش گردید تا از وقوع شکست زودرس تیر مقاوم سازی شده جلوگیری شود و بتوان از حداکثر ظرفیت میلگرد GFRP استفاده نمود. قابل ذکر است که در مدلسازی این طرح مقاوم سازی با مصالح کامپوزیت، تاثیر مقاومت نهایی چسبندگی و خرابی یا زوال چسب اپوکسی بین میلگرد NSM و سطح بتن دارای اهمیت می باشد، لذا در این مدلسازی ناحیه اتصال که چسب اپوکسی می باشد مدلسازی و رفتار آن مورد بررسی قرار گرفته شده است. استفاده از این روش مقاوم سازی با چهار میلگرد NSM و ورق FRP سبب شد تا میزان ظرفیت باربری نهایی نسبت به تیر بتن مسلح معمولی بیش از ۶۰٪ افزایش پیدا کند.

کلمات کلیدی: مقاوم سازی، تقویت خمشی، تیر بتن مسلح، میلگرد GFRP، روش NSM.

۱- مقدمه

یکی از روش های رایج در مقاوم سازی و یا تقویت بتن جهت تحمل نیرو های کششی، استفاده از مصالح کامپوزیت است. از میلگرد و صفحات کامپوزیت می توان در تقویت خمش و برش در تیر، ستون و دال های بتنی استفاده نمود. از مزایای این ماده می توان دوام بالا، نسبت مقاومت به وزن، مقاومت در برابر خوردگی، مقاومت در برابر ضربه، مقاومت الکتریکی بالا و مقاومت در برابر شرایط و عوامل محیطی اشاره کرد. به دنبال فرسوده شدن سازه های زیربنایی و نیاز به تقویت سازه ها برای برآورده کردن شرایط سخت گیرانه ی طراحی، طی دو دهه ی اخیر تأکید فراوانی بر روی تعمیر و مقاوم سازی سازه ها در سراسر جهان، صورت گرفته است. (ح. ایزدی، ۱۳۹۷) از طرفی، بهسازی لرزه ای سازه ها به خصوص در مناطق زلزله خیز، اهمیت فراوانی یافته است. در این میان تکنیک های استفاده از مواد مرکب FRP به عنوان مسلح کننده خارجی به دلیل خصوصیات منحصر به فرد آن، از جمله مقاومت بالا، سبکی، مقاومت شیمیایی و سهولت اجرا، در مقاوم سازی و احیاء سازه ها اهمیت ویژه ای پیدا کرده اند. همچنین این تکنیک ها به دلیل اجرای سریع و هزینه های کم جذابیت ویژه ای یافته اند. کامپوزیت ها مصالحی سبک، با دوام و مقاوم هستند که امروزه به راحتی در دسترس عموم قرار گرفته اند. مصالح کامپوزیت در محیط های مغناطیسی عایق می باشند و مشکل خوردگی ندارند، بنابراین با استفاده از این مصالح از مشکل خوردگی سازه های بتنی می توان اجتناب نمود. (ارفعی، ۱۳۹۵) مواد مرکب FRP در ابتدا به عنوان مواد مقاوم کننده ی خمشی برای پل های بتن مسلح و همچنین به عنوان محصورکننده در ستون های بتن مسلح مورد استفاده قرار می گرفتند، اما به دنبال تلاش های تحقیقاتی اولیه، از اواسط دهه ۱۹۸۰ توسعه ی بسیار زیادی در زمینه ی استفاده از مواد FRP در تقویت سازه های مختلف مشاهده شد. اجزاء سازه ای مختلفی شامل تیرها، دال ها، ستون ها، دیوارهای برشی، اتصالات، دودکش ها، طاق ها، گنبدها و خرپاها تاکنون توسط مواد FRP مقاوم شده اند. (ح. ایزدی، ۱۳۹۷) از سیستم های FRP برای بهسازی یک عضو سازه ای خسارت دیده و یا مقاوم سازی یک عضو سالم و یا رفع اشکالات در حال ساخت بهره گرفته می شود. هم اکنون تعداد زیادی از محققان و پژوهشگران صنعت سازه در سراسر جهان در حال بررسی، مطالعه و انجام آزمایشات تقویت سازه ها با کامپوزیت های FRP می باشند. (ارفعی، ۱۳۹۵)

لورنزو^۱ و همکاران در سال ۲۰۱۶ میلادی فرمولاسیونی برای پیش بینی جدا شگی زودرس در کامپوزیت های پایه پلیمری بر اساس مدل ناحیه چسبنده ارائه دادند. در این مدل چسب به صورت المان های صفحه ای بدون ضخامت بین المان های سه بعدی کامپوزیت مدل شد. رفتار این المان ها به این گونه است که با افزایش نیرو تا یک نقطه مشخص نیرو را تحمل می کنند، اما پس از آن متناسب با جابجایی خواص مکانیکی آن ها افت می کند. در این تحقیق انواع روابط ساختاری برای پیش بینی رفتار چسب طبق مدل ناحیه چسبنده مورد استفاده قرار گرفت و محرز گردید که ضعف اتصال در سازه عامل محدود کننده مهمی در استفاده از اتصالات چسبی است. روش های متنوعی برای استحکام بخشی اتصالات چسبی پیشنهاد شده است. استفاده از پودر نانو و استفاده از سیم های فلزی در فصل مشترک اتصال کارهایی بوده که برای تقویت چسب انجام شده است. تحقیق آن ها همچنین نشان داد میزان افزایش اتصال در کامپوزیت ها به جهت گیری الیاف در لبه اتصال بستگی دارد. (Lorenzis, 2016) آمنه سلیمانی کیا و همکاران در سال ۱۳۹۶ به مطالعه مدل سازی لایه چسب به منظور پیش بینی شکست زودرس در تیرهای بتنی تقویت شده با صفحات FRP پرداختند. آن ها به تاثیر مستقیم افزایش ظرفیت خمشی تیرهای بتنی با ایجاد چند لایه ورق FRP اشاره داشتند و همچنین اثبات کردند که مدل سازی المان چسب به نسبت قید Tie در آباکوس، اعداد خروجی را به نتیجه ی آزمایش نزدیک تر می کند. (اسلیمانی، ۱۳۹۶) شاراکی^۲ و همکاران در سال ۲۰۱۷ میلادی، چهار دال کامپوزیتی بتن با FRP را مورد آزمایش قرار دادند. مشاهدات آزمایشگاهی آن ها نشان داد که جداشدگی ورق های FRP و دال بتنی برای نمونه های کامپوزیتی با چسب اپوکسی نسبت به نمونه های با مهارهای برشی نوارهای FRP کمتر است. (Sharaky, 2017) سرون^۳ و همکاران در سال

^۱ Lorenzo^۲ Sharaky^۳ cerony

۲۰۱۶ میلادی، آزمایش‌هایی روی تیرهای تقویت شده با ورق FRP در بارگذاری های استاتیکی انجام دادند. متغیرهای آزمایش های استاتیکی شامل مقاومت بتن، تعداد لایه های تقویت شده با ورق های FRP و موقعیت چسباندن ورق ها بر روی تیر بود که نتایج آزمایش ها نشان داده که تقویت با ورق FRP باعث افزایش عمر خستگی، سختی و ظرفیت خمشی تیرها می شود. (Ceroni, 2017)

۲- اهداف

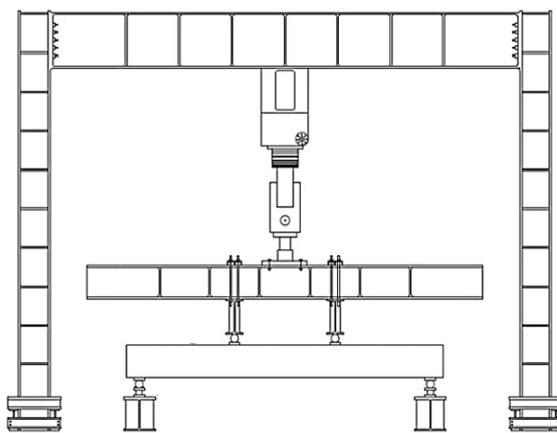
در این مقاله تلاش گردید تا از وقوع شکست‌های زودرس ناشی از جداشدگی ورق‌های FRP از سطح بتن و جداشدگی پوشش (کاور بتن) در ناحیه کششی مقطع تیر یا جداشدگی میلگرد GFRP ناشی از ضعف ناحیه اتصال و زوال چسب اپوکسی تحت بارگذاری شدید نیز جلوگیری شود و همچنین این عارضه در مدلسازی عددی با نرم افزار آباکوس نمایش داده شود و مدل ساختاری صحیحی برای آن ارائه شود. همچنین در ادامه جهت برطرف نمودن این عارضه بتوان روش و راهکار مناسبی را ضمن تقویت المان سازه‌ای و افزایش ظرفیت باربری توام با بهینه سازی اقتصادی ارائه نمود. در نتیجه با بکارگیری مصالح کامپوزیت مانند میلگرد GFRP به روش کاشت NSM و نیز استفاده از ورق FRP با متغیرهای تعداد و مساحت مختلف در الگوهای شکلی متفاوت نیز به بررسی و مقایسه نتایج پرداخته شد. نتایج بدست آمده از تحلیل عددی نیز با مطالعه آزمایشگاهی انجام شده توسط شاراکی^۴ (Sharaky, 2017) مورد مقایسه و صحت سنجی قرار گرفته است.

۳- معرفی سیستم تحت مطالعه

سیستم تحت مطالعه بر اساس یک مطالعه آزمایشگاهی و عددی صورت گرفته می باشد که در سال ۲۰۱۷ توسط شاراکی^۵ و همکاران مورد بررسی قرار گرفته است. (Sharaky, 2017) مدل فوق به بررسی تقویت تیر بتنی با میلگرد GFRP می پردازد که به روش نصب نزدیک در سطح (NSM) در الگوهای نصب و شکلی مختلف به مقایسه و اثر گذاری آن ها می پردازد. این تیر بوسیله جک هیدرولیکی تحت بارگذاری خمشی قرار می گیرد و با یک کرنش سنج (LVDT) نسبت مقاومت به تغییر شکل آن اندازه گیری می شود. مقاوم سازی این تیر بتنی بوسیله ۲ عدد میلگرد طولی GFRP که موقعیت قرارگیری آن‌ها در قسمت جانبی Side-Nsm می‌باشد. مدل آزمایشگاهی این مطالعه متشکل از تیر بتنی با مقاومت فشاری ۲۸ روزه ۲۵ مگاپاسکال می باشد، که توسط میلگردهای GFRP در شیارهای ۲۰*۲۰ میلیمتر در موقعیت های مذکور توسط چسب اپوکسی قرار گرفته اند. میزان کاور بتن ۳ میلیمتر در نظر گرفته شده است. تیر بتنی دارای دو تکیه گاه ساده و غلتکی در فاصله ی ۱۰ سانتیمتری از لبه خود می باشند که در تمامی مدل ها مشابه یکدیگر می باشد.



تصویر ۲ نحوه ی بارگذاری تیر بتن مسلح در محیط آزمایشگاه [۱]



تصویر ۲ مدل بارگذاری تیر بتن مسلح تحت خمش چهار نقطه ای [۱]

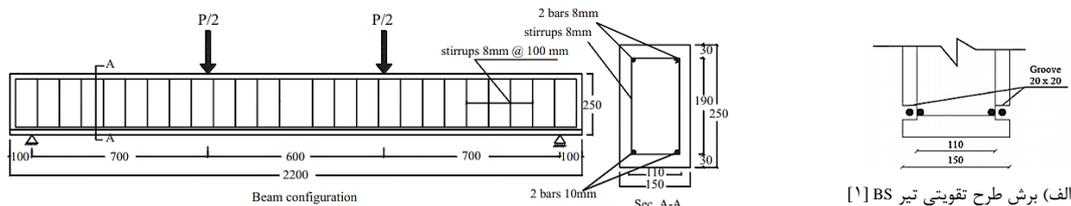
۴- معرفی نمونه های تحلیلی

تیر بتنی مورد مطالعه به سه گروه A, B, C تقسیم بندی شده است که در تمامی گروه‌ها تیر بتن مسلح دارای طول ۲/۲۰ متر، عرض ۰/۱۵ متر و عمق ۰/۲۵ متر است که توسط دو میلگرد فولادی ۱۰Ø در قسمت فوقانی و دو میلگرد فولادی ۸Ø در قسمت تحتانی مسلح شده است. همچنین میلگردهای فولادی مذکور توسط خاموت‌های ۸Ø در فاصله‌ی ۱۰ سانتیمتری محصور شده‌اند. سایر جزئیات و اندازه گذاری‌ها مطابق تصویر شماره ۳ می‌باشد. گروه A این مطالعه شامل یک تیر بتن مسلح تقویت نشده با عنوان تیر کنترل Beam (Control) یا مختصراً BC و در ادامه آن نیز یک تیر بتن مسلح تقویت شده به روش نصب نزدیک سطح (NSM) با بهره‌گیری از دو میلگرد GFRP با قطر ۱۴ میلیمتر به طول ۱۸۰۰ میلیمتر که در سطح جانبی تیر نصب و با چسب اپوکسی پر شده است. این تیر تحت عنوان (Side-Beam) یا مختصراً BS نامگذاری شده است. تیرهای گروه A در این مقاله نیز مطابق با نمونه آزمایشگاهی انجام شده در مطالعه رفرنس^۶ (Sharaky, ۲۰۱۷) می‌باشد که جهت صحت سنجی نتایج آن با نرم افزار آباکوس مدل‌سازی شده‌اند. در ادامه جهت بررسی و ادامه روند این تحقیق در گروه B به بررسی دو تیر بتن مسلح با ابعاد و ضوابط طراحی مشابه با گروه A با تغییر در محل و تعداد المان‌های تقویتی سعی بر افزایش میزان ظرفیت باربری آن‌ها شده است. مدل (Beam-Bottom) یا مختصراً BB با دو میلگرد GFRP به روش NSM در قسمت تحتانی تیر، مطابق با تصویر شماره ۴ طراحی شده است. مدل BT بصورت ترکیبی از مدل BB و BS یعنی با قرارگیری دو میلگرد NSM در قسمت تحتانی و دو میلگرد NSM در قسمت جانبی تیر مطابق با تصویر شماره ۵ کارگذاری و طراحی شده است. همچنین در گروه C جهت جلوگیری از شکست زودرس ناشی از جداسازی میلگرد GFRP و زوال چسب اپوکسی از سطح بتن در اثر نیروهای وارده و نیز بهبود ترک‌های خمشی احتمالی در تیر بتن مسلح، با بهره‌گیری از ورق‌های FRP در اشکال و روش‌های نصب متفاوت در تیر بتنی بکارگرفته شده است. نمونه‌های فوق در گروه C شامل سه عدد تیر تقویت شده مشابه تیر BT با افزودن ورق FRP بصورت نواری و موازی با راستای طولی میلگرد GFRP و نیز روش U شکل با جزئیات مطابق با تصویر شماره ۶ الی ۸ طراحی شده است. ابعاد و اندازه و مشخصات طراحی هر کدام از تیرها در جدول شماره ۱ آورده شده است.

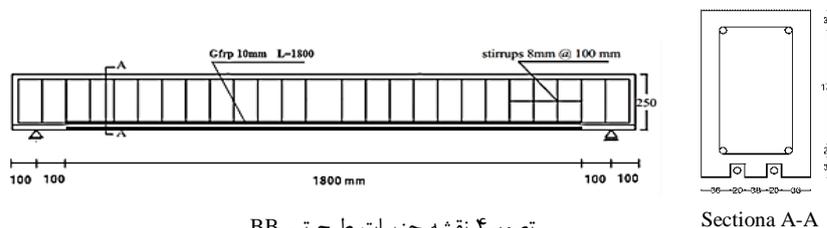
جدول ۱ جزئیات طرح مقاوم سازی و نامگذاری تیرهای مورد مطالعه

| گروه | نام تیر | ابعاد تیر mm | میلگرد طولی mm | میلگرد عرضی mm | تعداد میلگرد GFRP total | ابعاد FRP mm | مساحت FRP | روش نصب ورق FRP |
|--------|------------------|-----------------|-------------------------|-------------------|----------------------------|------------------------|----------------|-----------------|
| | | | | | | | m ² | |
| گروه A | BC | ۲۲۰۰×۱۵۰×۲۵۰ | UP Ø ۸ BOTTOM ۲ Ø ۱۰ | Ø ۸ @ ۱۰۰ | - | - | - | - |
| | BS | | | | ۲ | - | - | |
| | BB | | | | ۲ | - | - | |
| گروه B | BT | ۲۲۰۰×۱۵۰×۲۵۰ | UP Ø ۸ BOTTOM ۲ Ø ۱۰ | Ø ۸ @ ۱۰۰ | ۴ | - | - | - |
| | BTF _۱ | | | | ۴ | ۱۸۰۰×۸۰۰ | ۰/۲۸۸ | نواری |
| گروه C | BTF _۲ | ۲۲۰۰×۱۵۰×۲۵۰ | UP Ø ۸ BOTTOM ۲ Ø ۱۰ | Ø ۸ @ ۱۰۰ | ۴ | ۱۸۰۰×۱۵۰ | ۰/۲۷ | نواری |
| | BTF _۳ | | | | ۴ | ۴×۳۰۰×۲۵۰ ۲×۳۰۰×۱۵۰ | ۰/۳۹ | U شکل |

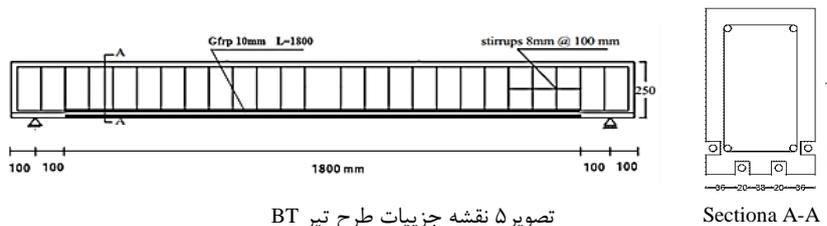
^۶ refrence



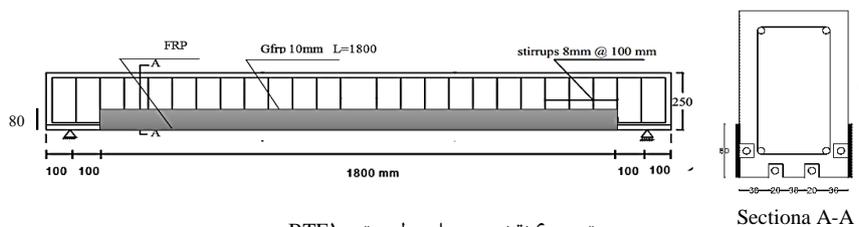
تصویر ۳ نقشه جزییات طرح تیر کنترل BC مطابق با برنامه آزمایشگاهی [۱]



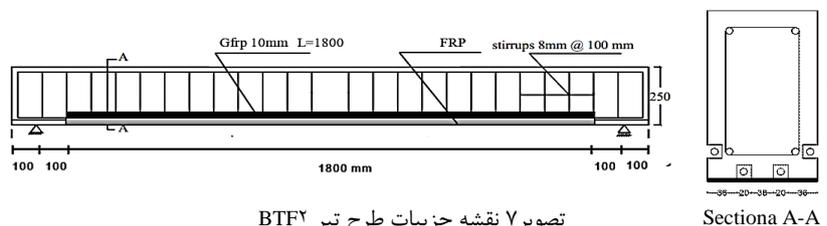
تصویر ۴ نقشه جزییات طرح تیر BB



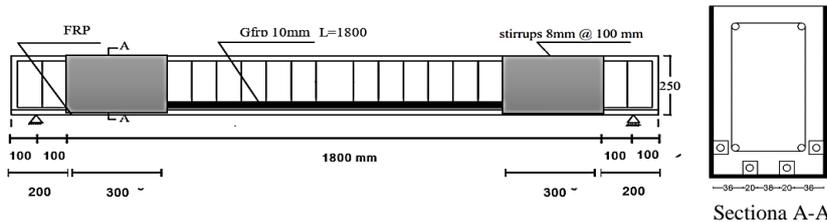
تصویر ۵ نقشه جزییات طرح تیر BT



تصویر ۶ نقشه جزییات طرح تیر BTF^۱



تصویر ۷ نقشه جزییات طرح تیر BTF^۲



تصویر ۸ نقشه جزییات طرح تیر BTF^۳

۵- مدلسازی عددی

در این مقاله برای مدلسازی عددی و صحت سنجی آن با نتایج حاصل از کار آزمایشگاهی و همچنین در ادامه آن جهت بهینه سازی تیرهای مقاوم سازی شده نیز با بهره گیری از نرم افزار آباکوس^۷ اقدامات لازم صورت گرفته است. برای مدل کردن تیر بتن مسلح و تقویت آن با میلگرد GFRP و ورق FRP مجموعاً تعداد ۷ نمونه مدل عددی با روش های مختلف نصب تحت بارگذاری چهارنقطه ای خمشی (نیرو-تغییر مکان) قرار گرفته شد. همچنین جهت استخراج نمودار پوش آور از تحلیل استاتیکی غیر خطی استفاده شده است. سایر مشخصات مدلسازی و خصوصیات رفتاری مصالح بکار برده شده مطابق بند ۱-۵ تا ۵-۵ می باشد.

۵-۱- بتن

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 ترکیب نمود. در مدل Concrete Damaged Plasticity (CDP) این نرم افزار برای بتن، رفتار پلاستیک (در کشش و فشار) تعریف شده است که می توان با وارد کردن پارامترهای مناسب، میزان خرابی دل خواه برای کشش و فشار را جهت شبیه سازی با نمونه آزمایشگاهی وارد نمود. (ارفعی، ۱۳۹۵)

جدول ۲ خصوصیات رفتار مصالح بتن جهت مدلسازی عددی در نرم افزار آباکوس [۱]

| چگالی بتن | مقاومت فشاری بتن | مدول الاستیسیته | ضریب پواسون |
|-----------------|------------------|-----------------|-------------|
| کیلوگرم/مترمکعب | مگاپاسکال | گیگاپاسکال | |
| ۲۵۰۰ | ۲۵ | ۲۳/۵ | ۰/۲ |

۵-۲- فولاد

میلگرد بکار رفته جهت تسلیح تیر بتنی نیز از نوع A-۳ آجدار می باشد. برای معرفی آرماتورهای طولی و عرضی از المان های سیمی سه بعدی با تغییر شکل های غیر خطی استفاده می شود. در این نوع المان ها، تنها نیروی محوری انتقال یافته و هیچ گونه لنگری ایجاد نمی شود. آرماتورها به صورت یک جا با المان های بتن تعریف شده و المان های خرپایی در بتن جاسازی می شوند. رفتار المان Solid بتن بسته به میزان آرماتوری که در آن قرار می گیرد، تغییر کرده و المان معادلی بین رفتار بتن و آرماتور ایجاد می شود. (ارفعی، ۱۳۹۵)

جدول ۳ خصوصیات رفتار مصالح فولاد جهت مدلسازی عددی در نرم افزار آباکوس [۱]

| وزن مخصوص | مدول الاستیسیته | نسبت پواسون | FY/Mpa | Fu/Mpa |
|-----------|-----------------|-------------|--------|--------|
| ۷۸۵۰ KG | 2×10^6 | ۰/۳ | ۳۲۵ | ۴۹۶ |

۵-۳- ورق FRP

در این مقاله رفتار FRP بصورت ایزوتروپ و حالت Lamina مدل شده است. در این مدل مدول الاستیسیته و تنش گسیختگی در جهت های مختلف الیاف به نرم افزار معرفی می شود. از آنجا که FRP مصالح ترد محسوب می شود، نیازی به تعریف Damage Evolution نمی باشد و فقط برای آن Hashin Damage تعریف می نمایم. (آ. سلیمانی، ۱۳۹۶) خصوصیات ورق های کامپوزیتی پلیمری از نوع SY00T در نظر گرفته شده است. الیاف فوق از نوع دو جهته و از جنس شیشه است که در بسیاری از پروژه های بهسازی و مقاوم سازی استفاده می شود. در الیاف دو جهته، جهت فیبر ها با محور افقی و عمودی هم راستا می باشد، به همین دلیل پارامترهای طولی و عرضی یکسان در نظر گرفته می شود. چگالی ورق FRP، نیز ۱۷۸۰ کیلوگرم در هر متر مکعب و ضخامت آن ۱ میلیمتر می باشد. (Ceroni, ۲۰۱۷)

جدول ۴ خصوصیات رفتار مصالح کامپوزیت جهت مدلسازی عددی در نرم افزار آباکوس [۶]

| مقاومت کششی طولی | مقاومت فشاری | مقاومت برشی | مدول الاستیسیته | تنش تسلیم |
|------------------|------------------|------------------|-----------------|-----------|
| Mpa | Mpa | Mpa | Gpa | Mpa |
| 96×10^6 | 74×10^6 | 95×10^6 | ۲۳۱ | ۴۶۶۰ |

۵-۴- میلگرد GFRP

در این پژوهش میلگرد GFRP مدل شده به صورت ایزوتروپیک و الاستیک خطی در نظر گرفته شده است. بنابراین از آنجا که GFRP مصالح ترد محسوب می شود، نیازی به تعریف رفتار غیر خطی ندارد. (آ. سلیمانی، ۱۳۹۶) میلگردهای GFRP مورد استفاده در نمونه ها از نوع شیشه و رزین می باشد. قطر این میلگردها ۱۴ میلیمتر است. تنش نهایی و مدول الاستیسیته میلگردهای GFRP به ترتیب ۹۹۰ و 55×10^6 می باشد. سایر پارامترهای عددی آن مطابق با جدول شماره ۵ می باشد. المان ترسیمی میلگرد GFRP بصورت مدل سیمی Wire و نوع مش بندی آن Beam می باشد. (Sharaky, ۲۰۱۷)

جدول ۵ خصوصیات رفتار مصالح GFRP جهت مدلسازی عددی در نرم افزار آباکوس [۱]

| نسبت پواسون | مدول الاستیسیته | وزن مخصوص | قطر میلگرد GFRP |
|-------------|------------------|-----------|-----------------|
| ۰/۲۶ | 55×10^6 | ۲۱۰۰ KG | ۱۴ mm |

۵-۵- چسب اپوکسی

برای تعریف رفتار لایه چسب به نرم افزار نیاز به تعریف بخش الاستیک و بخش خرابی چسب می باشد. رفتار آغازین لایه چسب در شروع خرابی به شکل رفتار الاستیک-خطی تعریف می شود. در نرم افزار، در بخش تعریف خصوصیات مکانیکی، الاستیک، نوع کشش (traction) انتخاب می شود و می بایست بردار سختی اولیه برای آن تعریف شود. (آ. سلیمانی، ۱۳۹۶) مطابق جدول شماره ۶ نیز t ضخامت چسب، E مدول الاستیسیته چسب، G1 و G2 مدول برشی چسب در جهات دوم و سوم صفحه Knn, Kss, Ktt مقدار سختی اولیه در جهات عمود و دو جهت اصلی دیگر می باشند. (آ. سلیمانی، ۱۳۹۶) چگالی چسب ۱۲۵۰ و ضخامت آن ۱ میلیمتر می باشد.

جدول ۶ پارامترهای عددی جهت وارد نمودن رفتار چسب در نرم افزار آباکوس [۸]

| E / Knn | G1/Kss | G/Ktt |
|--------------------|-------------------|-------------------|
| 1824×10^6 | 622×10^6 | 622×10^6 |

تعریف بخش خرابی به نرم افزار، شامل رفتار آغاز خرابی و گسترش خرابی می‌باشد. برای تعریف رفتار شروع خرابی، پارامترهای σ_s و σ_t که عبارتند از مقادیر حداکثر تنش های کششی و برشی ماکزیمم چسب و G_t , G_s , G_n جهت های مؤلفه های تنش در محدوده الاستیک، معرفی می‌شوند. فرضیه گسترش خرابی چسب با توجه به انرژی آزاد شده، بیان شده است. توصیف این مدل در کتابخانه مصالح نرم افزار آباکوس موجود است. در این نرم افزار، وابستگی انرژی شکست به مود ترکیبی براساس معیار گسیختگی BK تعریف شده است. (آ.سلیمانی، ۱۳۹۶)

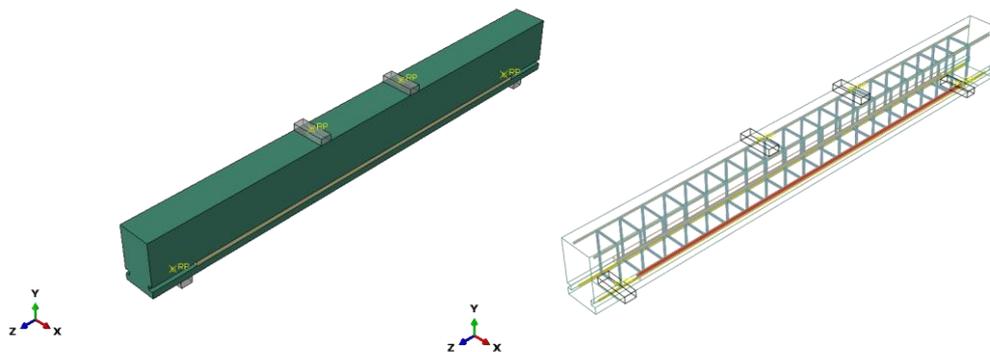
جدول ۷ پارامترهای عددی جهت وارد نمودن آسیب چسب در نرم افزار آباکوس [۸]

| σ_n | σ_s | σ_t | G_n | G_s | G_t |
|--------------------|--------------------|--------------------|--------|-------|-------|
| $3/17 \times 10^6$ | $1/78 \times 10^6$ | $1/78 \times 10^6$ | ۱۱۱/۵۲ | ۹۰۰ | ۹۰۰ |

۶- نوع تحلیل

در این مقاله جهت تعیین میزان ظرفیت باربری و تغییر شکل های ایجاد شده نیز از تحلیل استاتیکی غیر خطی استفاده شده است. (Sharaky, ۲۰۱۷) تحلیل استاتیکی غیرخطی پوش آور یک نوع تحلیل افزایشی است که نیرو به صورت فزاینده زیاد می شود و باعث تغییر شکل سازه می گردد. این افزایش بارگذاری تا جایی ادامه می یابد تا اولین مفصل پلاستیک در سازه ایجاد گردد. اما در این هنگام سازه همچنان مقاوم است و می تواند در برابر افزایش میزان باربری نیز وارد تغییر شکل پلاستیک شود و این تغییر شکل تا جایی ادامه خواهد یافت که که سازه دچار فرو ریزش شود. (اسفندیاری، ۱۳۹۷) در نرم افزار آباکوس برای محاسبه ظرفیت باربری توام با جابجایی از حلگر جنرال استاتیک^۸ استفاده شده است. نتیجه این تحلیل برای ترسیم نمودار بار-تغییر مکان مورد استفاده قرار می گیرد که از یک سو میزان ظرفیت باربری توسط تیر و از سوی دیگر میزان جابجایی یا تغییر شکل ناشی از تنش وارد شده بر تیر را نشان می دهد. در این روش مبنا، 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.

^۸ General static



تصویر ۹ مونتاز تیر بتن مسلح تقویت شده تحت بارگذاری خمشی چهار نقطه ای در محیط آباکوس

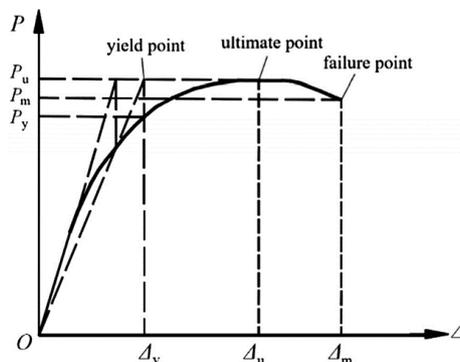
۸- نسبت شکل پذیری

میزان شکل پذیری یک المان سازه‌ای نشان دهنده توانایی یک عضو در جذب نیرو و ایجاد تغییر شکل در اثر بارهای وارده در محدوده خطی و غیر خطی می باشد. قابلیت یک سازه در داشتن تغییر مکان بالاتر از حد خطی و جذب انرژی در تغییر شکل های بزرگ به وسیله رفتار غیر خطی را نسبت شکل پذیری می گویند. (اسفندیاری، ۱۳۹۷) نسبت شکل پذیری از رابطه شماره ۱ تعیین می گردد.

$$\mu = \frac{\Delta_m}{\Delta_y} \quad (1)$$

Δ_m : تغییر شکل نهایی عضو (ناحیه گسیختگی)

Δ_y : تغییر شکل حد جاری شدن (ناحیه خطی)

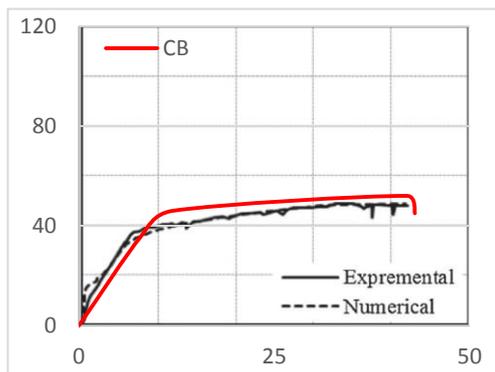


تصویر ۱۰ نشانه گذاری نقاط ارتجاعی، ماکزیمم و گسیختگی در نمودار پوش آور [۴]

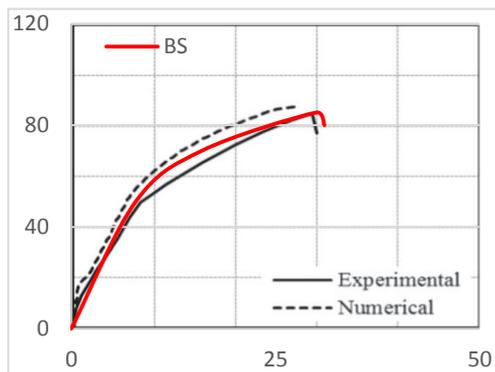
۷- صحت سنجی

برای اعتبار سنجی نتایج مدلسازی عددی و مقایسه آن با نمونه‌های آزمایشگاهی در مرحله اول تیرهای گروه A در نرم افزار آباکوس اعتبار سنجی شدند. مطابق با نمودار شماره ۱، منحنی نیرو - تغییر مکان تیرهای مورد مطالعه ترسیم و میزان اختلاف نتایج مدلسازی عددی با نتایج آزمایشگاهی مقایسه شد. می توان اذعان کرد که نتایج از دقت خوبی برخوردار است. میزان اختلاف اندکی که در نتایج بوجود آمده ناشی از غیر قابل پیش بینی بودن دقیق رفتار بتن در محدوده ی پلاستیک می باشد. همچنین در شکل های ۱۱، ۱۲، ۱۳ مقایسه ترکها و شکست های بوجود آمده در تیرهای BC و BS در محیط نرم افزار آباکوس و آزمایشگاهی نشان داده شده است.

نتایج بدست آمده از مدلسازی عددی تیر کنترل BC تحت بارگذاری خمشی چهار نقطه، نشان داد که تیر مذکور با ایجاد ترک و گسیختگی در محدوده خمشی دچار شکست شده است. این ترک‌ها که در محدوده میانی تیر و به صورت عمودی می باشد نیز تیر را دچار شکست نرم نموده. در نهایت حداکثر میزان ظرفیت باربری این تیر ۵۰ کیلو نیوتن و خیز ایجاد شده میانی نیز ۴۳ میلی‌متر می باشد که پس از آن منجر به شکست تیر می‌گردد. مطابق با نمودار ۱-الف تیر مشاهده شد که پس از جاری شدن میلگردهای کششی (فولادی) هیچ گونه مقاومتی در برابر افزایش بار وارده ایجاد نشده و با کمی افزایش بار وارده، تیر دچار خیز یا تغییر شکل پلاسیسیته شده است. تحلیل نتایج تیر BS مشخص نمود که میزان حداکثر ظرفیت باربری در این تیر برابر با ۸۴ کیلو نیوتن و میزان خیز نهایی آن برابر با ۲۹ میلی‌متر می باشد. ظرفیت باربری تیر BS در مقایسه با تیر کنترل BC به میزان ۴۰٪ افزایش داشته است. با عنایت به نمودار شماره ۱-ب مشخص گردید که نصب دو میلگرد GFRP در سطح جانبی تیر، باعث تردتر شدن رفتار و شکل پذیری تیر می‌گردد. در نهایت میزان شکل‌پذیری تیر BS در مقایسه با تیر کنترل BC حدود ۴۳٪ کاهش پیدا نموده است. مطابق تصویر شماره ۱۳-الف جداولگی میلگرد GFRP از سطح بتن بیانگر آن است که این گسیختگی ناشی از زوال اتصال بین میلگرد NSM از سطح بتن می باشد. مطابق با تصویر شماره ۱۲ عمده ترک‌های ایجاد شده در تیر مذکور خمشی و در میانه تیر می باشد. قابل ذکر است که رفتار ترد این تیر بدلیل خطی بودن رفتار میلگرد GFRP می باشد، بطوریکه پس از گسیختگی و جداولگی میلگرد GFRP عملاً تیر بتن مسلح هیچ گونه مقاومتی در برابر بار وارده نداشته و با افزایش خیز میانی، به سرعت دچار شکست می‌گردد. همچنین جداولگی زودرس میلگرد GFRP از سطح بتن باعث گسیختگی



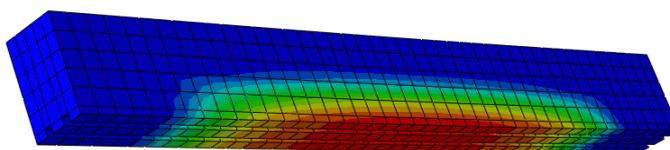
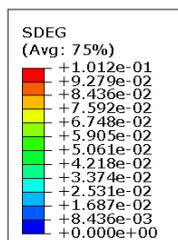
الف) نمودار پوش آور تیر کنترل BC



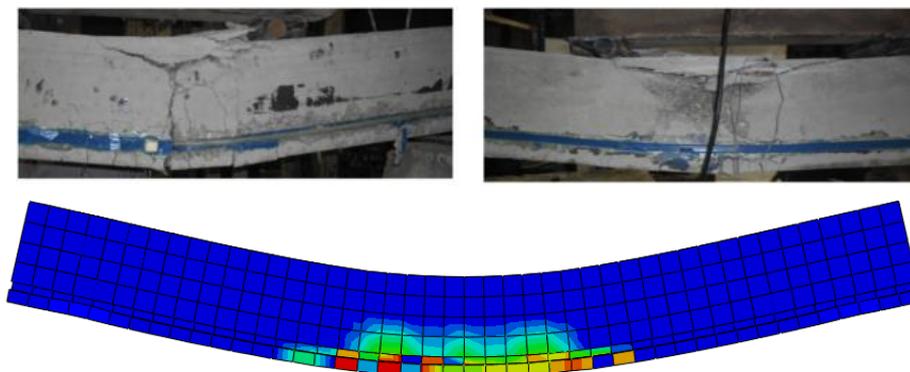
ب) نمودار پوش آور تیر BS

نمودار ۱- منحنی نیرو-تغییر مکان (پوش آور) تیرهای BC,BS و مقایسه آن با نمودار بدست آمده در نتایج تحقیق رفرنس [۱]

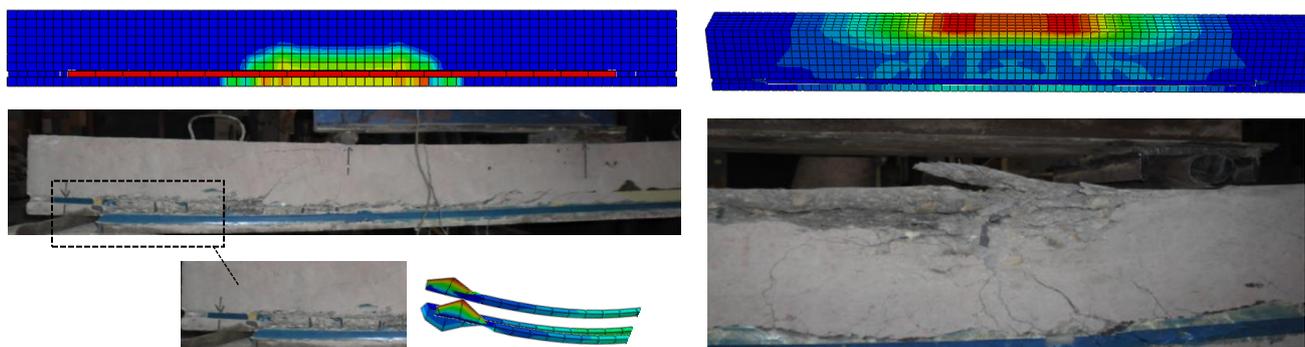
زودرس این تیر شده است.



تصویر ۱۱ صحت سنجی و تطابق نتایج آزمایشگاهی و مدلسازی عددی



تصویر ۱۲ صحت سنجی و تطبیق شکست خمشی بوجود آمده در مرکز تیر BS



الف) زوال چسب اپوکسی و ایجاد گسیختگی زودرس در تیر BS

تصویر ۱۳ صحت سنجی و تطابق نواحی گسیخته و شکستگی های رخ داده در نتایج آزمایشگاهی و مدل سازی عددی

۹- یافته‌ها

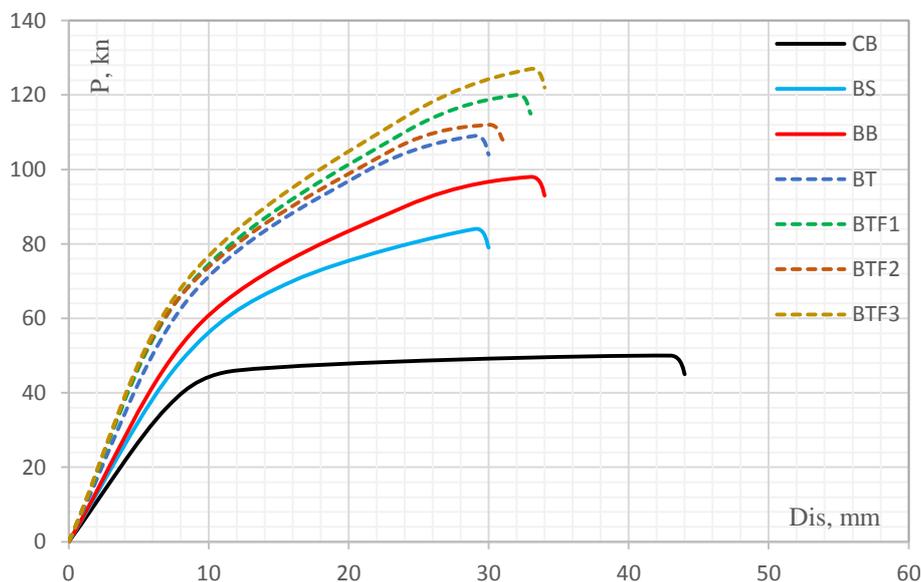
نتایج بدست آمده از مدل سازی عددی تیر BB که توسط دو میلگرد NSM در سطح زیرین تقویت شده است، نشان می‌دهد که حداکثر میزان ظرفیت باربری آن در مقایسه با تیر کنترل ۴۸٪ افزایش داشته و پس از تحمل باربری ۹۸ کیلو نیوتن گسیخته می‌شود. همچنین میزان خیز این تیر در مقایسه با تیر کنترل رفتار تردتری داشته، بطوریکه میزان شکل پذیری آن ۳۰٪ کاهش پیدا نموده، اما میزان خیز میانی آن در مقایسه با تیر BS نیز ۱۲٪ افزایش داشته است. گسیختگی تیر BB بر خلاف تیر BS به دلیل شکست میلگردهای GFRP رخ داده است. تعبیه میلگردهای GFRP در قسمت تحتانی تیر باعث افزایش شکل پذیری و نیز میزان ظرفیت باربری شده است، اما بدلیل ضعف میلگردهای GFRP در برابر نیروی وارده، ظرفیت تیر بتن مسلح در ناحیه خمشی کافی نبوده، لذا مقاوم سازی این تیر در محدوده بحرانی اهمیت دارد. تیر BT با عنایت به افزایش تعداد میلگردهای NSM به چهار عدد نیز از ظرفیت باربری بیشتری در مقایسه با تیرهای موجود در گروه A برخوردار می‌باشد. میزان ظرفیت باربری این تیر در مقایسه با نمونه تیر کنترل ۵۴٪ افزایش یافته است که پس از آن تیر گسیخته می‌شود. میزان تغییر شکل این تیر در مقایسه با تیر کنترل نیز ۴۸٪ کاهش یافته و رفتار تردتری را از خود به نمایش گذاشته است. در این تیر گسیختگی زودرس ناشی از جداسازی میلگردهای GFRP از سطح جانبی بتن بدلیل زوال چسب اپوکسی، عامل

شکست تیر می باشد. این عارضه نشان دهنده آن است که ظرفیت برشی سطح مشترک بین بتن و ناحیه اتصال یا همان چسب رزین اپوکسی در محدوده انتهای میلگردهای طولی، کمتر از میزان تنش‌های وارده می باشد. بنابراین جهت جلوگیری از گسیختگی زودرس باید ظرفیت برشی این محدوده را به روش مقاوم سازی مطابق آنچه در تیرهای گروه C آورده شده نیز افزایش داد.

نتایج بدست آمده از گروه C با عنایت به مدلسازی عددی صورت گرفته در تیر BTF₁ که با اضافه شدن ورق FRP جهت پوشش میلگرد NSM در سطح جانبی تیر انجام شد، نیز مشخص نمود که میزان ظرفیت باربری این تیر در مقایسه با تیر کنترل ۵۶٪ افزایش یافته و همچنین میزان خیز نهایی آن ۱۹٪ کاهش یافته است. همچنین میزان شکل پذیری و ظرفیت باربری این تیر در مقایسه با نمونه BT نیز افزایش داشته که علت آن اضافه نمودن ورق FRP می باشد. بکارگیری ورق FRP در قسمت جانبی تیر برای تقویت میلگردهای طولی NSM در افزایش میزان ظرفیت باربری و شکل پذیری تیر موثر واقع شده است، چرا که این افزایش مقاومت به سبب جلوگیری از جداشدگی زود هنگام میلگرد NSM جانبی از سطح بتن حاصل شده، اما ورق FRP موجب به تعویق افتادن شکست خمشی در سطح زیرین تیر بتنی نگردیده است. در تیر BTF₂ ظرفیت باربری نهایی آن نسبت به تیر کنترل ۵۵٪ افزایش و میزان خیز میانی آن ۴۳٪ کاهش یافته است. استفاده از الیاف FRP برای تقویت میلگردهای طولی NSM موثر واقع شده و شکست تیر را به تعویق می اندازد، اما همچنان مانع از وقوع جداشدگی زودرس میلگردهای طولی NSM از سطح جانبی بتن نمی گردد. قابل عنوان است که ظرفیت باربری و شکل پذیری این تیر در مقایسه با تیر BT دارای تغییر محسوسی نمی باشد. نهایتاً نتایج بدست آمده از تحلیل تیر BTF₃ نشان داد که میزان ظرفیت نهایی آن در مقایسه با تیر کنترل ۶۰٪ افزایش و همچنین میزان تغییر شکل آن ۳۰٪ کاهش یافته است، لذا ثابت گردید که با محصور شدگی میلگرد NSM توسط ورق FRP بصورت دورپیچ می توان تا حدود موثری مانع از گسیختگی زودرس ناشی از زوال اتصال بین مصالح کامپوزیت از سطح بتن در این روش مقاوم سازی گردید. استفاده از صفحه FRP به روش دورپیچ (U شکل)، در انتهای میلگردهای طولی NSM و در فاصله‌ی یک پنجم لبه تیر در محلی که تنش‌های برشی ماکزیمم می باشد بهترین حالت نصب جهت تعبیه صفحات کامپوزیت می باشد. بهینه سازی با ورق FRP در این الگوی شکلی و محل قرارگیری، شکست تیرها را به تعویق انداخته و ظرفیت باربری و میزان تغییر شکل تیر را افزایش می دهد.

جدول ۸ مقایسه نتایج میزان ظرفیت باربری و میزان خیز بدست آمده پس از انجام تحلیل عددی

| نام گروه | نام تیر | محدوده خطی | | محدوده گسیختگی | | شکل پذیری |
|----------|------------------|------------|------|----------------|-------|-----------|
| | | Kn | Dis | Kn | Dis | |
| Group A | CB | ۷ | ۳۶/۲ | ۴۳ | ۵۰/۵ | ۶/۱۴ |
| | BS | ۷/۹ | ۴۸/۴ | ۲۹/۱ | ۸۴/۴ | ۳/۶۸ |
| Group B | BB | ۸ | ۵۹/۱ | ۳۳/۲ | ۹۸/۲ | ۴/۱۵ |
| | BT | ۸/۲ | ۶۵/۵ | ۲۹/۱ | ۱۰۹/۱ | ۳/۵۴ |
| Group C | BTF ₁ | ۸/۳ | ۶۶/۳ | ۳۲/۴ | ۱۲۰/۴ | ۳/۹۰ |
| | BTF ₂ | ۸/۲ | ۶۵/۲ | ۳۰/۳ | ۱۱۲/۷ | ۳/۶۹ |
| | BTF ₃ | ۸/۳ | ۶۷/۷ | ۳۳/۲ | ۱۲۷/۶ | ۴ |

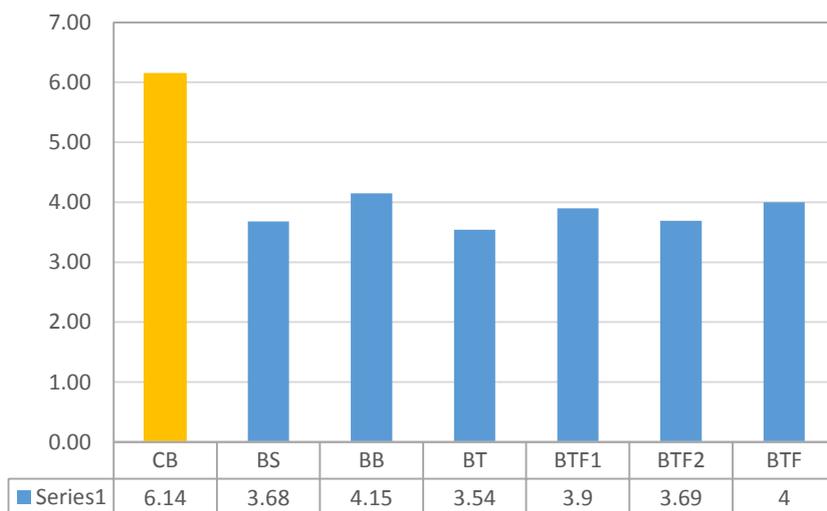


نمودار ۲ مقایسه منحنی نیرو-تغییر مکان (پوش آور) تیرهای مورد مطالعه

در این تحقیق ثابت گردید که استفاده از ورق FRP و همچنین محل نصب آن در بهینه سازی و تقویت ظرفیت باربری و کنترل خیز تیر، ارتباط مستقیم دارد. با محصورشدگی میلگردهای فولادی و همچنین میلگردهای NSM توسط ورق FRP شاهد تاثیر بسزایی در افزایش میزان ظرفیت باربری و کاهش شکل پذیری یا خیز میانی تیر خواهیم بود. در روش مقاوم سازی با میلگرد NSM در سطح جانبی نیز بدلیل زوال چسب اپوکسی و جداسازی میلگرد GFRP از سطح بتن نیاز به تقویت و محصور شدگی تیر در این ناحیه ضرورت دارد. در واقع در این روش نصب، جز چسب اپوکسی مانعی برای جلوگیری از جداسازی زود هنگام وجود ندارد. در روش مقاوم سازی با میلگرد NSM در سطح زیرین تیر بتنی بدلیل سطح مقطع درگیری بیشتری که میلگرد GFRP با قسمت تحتانی تیر بتنی دارد، از ظرفیت خمشی بیشتری بهره می برد، اما در این الگوی نصب نیز تیر بتنی در اثر بارگذاری خمشی، بدلیل شکستگی میلگرد NSM سبب گسیختگی تیر می شود. در تیر مقاوم سازی با افزایش میلگرد NSM به چهار عدد نیز بدلیل افزایش تعداد میلگردهای GFRP و تنوع قرار گیری آنها که هم در قسمت تحتانی و هم در قسمت جانبی تیر قرار دارند، شاهد افزایش ظرفیت باربری هستیم، اما در این روش نیز بدلیل زوال چسب اپوکسی در قسمت جانبی تیر، پدیده جداسازی یا گسیختگی زودرس سبب می گردد، تا کماکان نتوان از حداکثر ظرفیت خمشی تیر بتنی تقویت شده بهره گرفت. لکن در نمونه های گروه C خصوصاً در مدل BTF3 بدلیل محصور شدگی میلگردهای NSM توسط ورق FRP که سبب جلوگیری از گسیختگی زودرس ناشی از جداسازی میلگرد NSM از سطح بتن یا زوال اپوکسی می گردد، نهایتاً اجازه می دهد تا میلگردهای GFRP به حد نهایی ظرفیت باربری خود برسند. اما شکست تیر در گروه C ناگهانی و بدون نشانه رخ می دهد.

در نمونه هایی که نسبت شکل پذیری (μ) آن در مقایسه با سایرین افزایش یافته است، بیانگر آن است که المان سازه ای در مقاوم سازی لرزه ای از پتانسیل بیشتری در مستهلک نمودن انرژی وارده ناشی از بارهای جانبی برخوردار است. اما بالعکس این حالت یعنی با کاهش نسبت شکل پذیری نیز به دلیل تردتر بودن رفتار سازه و عدم تنزل مقاومت و افت سختی در تناوب بار وارده در سازه ها خصوصاً در تیرها، نیز باعث کاهش ترک های خمشی و جلوگیری از گسترش آن به دیوارهای زیرین می گردد. در نتیجه با توجه به نوع کاربری سازه و

انتظار طراح از عملکرد سازه، نیز باید میزان شکل پذیری سازه کنترل و انتخاب شود. نهایتاً با توجه به نتایج بدست آمده محرز گردید که استفاده از مصالح کامپوزیت مانند میلگرد GFRP بدلیل ترد و شکننده بودن رفتار آن‌ها نیز باعث افزایش سختی تیر بتن مسلح و کاهش شکل پذیری آن می‌گردد.



نمودار ۳ مقایسه نسبت شکل پذیری تیرهای مورد مطالعه

۱۰- نتیجه گیری

- برای مقاوم سازی تیرهای بتن مسلح و افزایش میزان ظرفیت باربری، استفاده از میلگرد GFRP به روش NSM تاثیر بسزایی دارد، اما محل قرارگیری میلگردهای NSM نسبت به تعداد آن‌ها از اهمیت بیشتری برخوردار است.
- استفاده از میلگرد GFRP بدلیل تردپذیری و خطی بودن رفتار آن نیز باعث کاهش شکل‌پذیری و افزایش سختی تیر بتن مسلح می‌گردد.
- ظرفیت باربری تیرهای تقویت شده با میلگرد GFRP و ترکیب آن با ورق FRP (گروه C) بیشتر از تیرهای تقویت شده با تیرهای گروه A و B می‌باشد که علت آن محصور شدگی میلگرد GFRP توسط صفحات FRP بوده که باعث استفاده حداکثری از ظرفیت خمشی این میلگردها می‌گردد.
- شکست تیرهای مقاوم‌سازی شده با میلگرد NSM در سطح جانبی ناشی از جداشدگی زودهنگام این میلگرد از سطح بتن می‌باشد، که این پدیده نشان دهنده آن است که ظرفیت برشی سطح مشترک بین بتن و چسب رزین اپوکسی در محدوده انتهای میلگردهای طولی NSM، کمتر از تنش‌های برشی وارده می‌باشد. در نتیجه برای جلوگیری از وقوع جداشدگی انتهای میلگردهای GFRP از سطح بتن باید ظرفیت برشی این ناحیه افزایش داده شود که یکی از روش‌های آن محصور نمودن آن با صفحات FRP می‌باشد.

- با توجه به نتایج بدست آمده از تحلیل تیرهای BTF_۱ و BTF_۲ می توان اذعان نمود که افزایش مساحت ورق FRP در افزایش مقاومت تیر بتنی تاثیر مستقیم ندارد و آنچه مهم است موقعیت قرارگیری و محل الصاق ورق FRP می باشد.
- با بررسی نتایج بدست آمده از گروه A می توان دریافت که مدل BB با توجه به جانمایی میلگردهای طولی NSM که در قسمت تحتانی تیر قرار گرفته اند بدلیل برخورداری از سطح مقطع یا درگیری بیشتر با تیر بتنی، از شکل پذیری و ظرفیت باربری بیشتری در مقایسه با نمونه تیر BS که از سطح مقطع کمتری برخوردار است، بهره می برد. در نمونه تیر BS میلگرد طولی GFRP قبل از رسیدن به حداکثر ظرفیت باربری و تغییر شکل بیشتر، دچار گسیختگی زودرس می گردد.

سپاسگزاری

قدردانی فراوان از دپارتمان فنی و مهندسی موسسه آموزشی "ماهرشو..." برای همکاری در روند مدلسازی عددی تیرهای مورد مطالعه و همکاری های موثر و لازم که جهت ثمربخش بودن این تحقیق داشته اند.

مراجع

- [۱] I.A. Sharaky, R.M. Reda, M. Ghanem, M.H. Seleem, H.E.M. Sallam, Experimental And Numerical Study Of RC Beams Strengthened With Bottom And Side NSM GFRP Bars Having Different End Conditions, Compos. B Eng. ۱۰.۱۰۱۶- J.Conbuildmat. ۲۰۱۷. ۰۵. ۱۹۲
- [۲] L. De Lorenzis, A. Rizzo, A. La Tegola, A Modified Pull-Out Test For Bond Of Near Surface Mounted FRP Rods In Concrete, Compos. B Eng. ۳۳ (۸) (۲۰۱۶) ۵۸۹-۶۰۳.
- [۳] I.A. Sharaky, L. Torres, M. Baena, C. Mias, An Experimental Study Of Different Factors Affecting The Bond Of NSM FRP Bars In Concrete, Compos. Struct. ۹۹ (۲۰۱۵) ۳۵۰-۳۶۵.
- [۴] I.A. Sharaky, L. Torres, M. Baena, I. Vilanova, Effect Of Different Material And Construction Details On The Bond Behavior Of NSM FRP Bars In Concrete, Constr. Build. Mater. ۳۸ (۲۰۱۸) ۸۹۰-۹۰۲.
- [۵] L. De Lorenzis, A. Nanni, Characterization Of FRP Rods As Near Surface Mounted Reinforcement, J. Compos. Constr. (۲۰۱۶) ۱۱۴-۱۳۵.
- [۶] F. Ceroni, M. Pecce, A. Bilotta, E. Nigro, Bond Behavior Of FRP NSM Systems In Concrete Elements, Compos. B ۴۳ (۲۰۱۶) ۹۹-۱۰۹.
- [۷] I.A. Sharaky, L. Torres, H.E.M. Sallam, Experimental And Analytical Investigation Into The Flexural Performance Of RC Beams With Partially And Fully Bonded NSM FRP Bars/Strips, Compos. Struct. ۱۲۲ (۲۰۱۵) ۱۱۳-۱۲۶.
- [۸] Ameneh Soleimani Kia, Hamid Varastehpour (۲۰۱۷), "Adhesive Layer Modeling To Predict Premature Failure In Reinforced Concrete Beams With FRP Plates", ۵th Annual National Iranian Concrete Conference, Tehran. (persian)
- [۹] Amir Rafei, Seyed Vahid Razavi Tusi (December ۲۰۱۶), "Analysis Of Finite Element Seating Of Reinforced Concrete Reinforced With CFRP Carbon Polymer Sheets", National Conference On Structural Engineering - Tehran. (persian)
- [۱۰] Hossein Izadi, Hamid Pesran Behbani (October ۲۰۱۸), "Study Of Behavior Of Reinforced Concrete Slab Reinforced With Carbon Polymer (Strips (CFRP) And Glass (GFRP) By Finite Element Numerical Analysis", ۴th Fourth Conference On New Technologies In Civil Engineering, Iran-Tehran. (persian)
- [۱۱] Mehdi Esfandiari, Fakhreddin Danesh "Flexural reinforcement of reinforced concrete columns using composite rebars buried in the surface", Amirkabir Civil Engineering Journal, Volume ۵۱, Number ۱, ۲۰۱۷, Pages ۱۱۹-۱. (persian)