

## مطالعه عددی تاثیر موقعیت و فواصل ورق‌های FRP بر رفتار تیرهای بتنی تحت بار پیچشی

نادر عباسی

کارشناس ارشد مهندسی سازه گروه عمران، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد مراغه، مراغه، ایران

مسعود پوربابا\*

استادیار گروه عمران، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد مراغه، مراغه، ایران

mpourbaba@yahoo.com

تاریخ دریافت: ۹۶/۰۲/۲۷ تاریخ پذیرش نهایی: ۹۶/۰۶/۰۵

### چکیده:

با توجه به زلزله‌های اخیر و خسارات وارده بر سازه‌ها و تغییرات آیین‌نامه‌ای نیاز به مقاوم‌سازی بیش از پیش ضروری به نظر می‌رسد. یکی از بهترین گزینه‌ها برای این منظور سیستم کامپوزیتی پلیمری الیافی مسلح (FRP) می‌باشد. اولین کاربرد این سیستم برای مقاوم‌سازی خمشی تیر بتن مسلح می‌باشد. در این مقاله به مطالعه تیر بتنی تحت بار پیچشی با اضافه کردن ورق FRP در اشکال و موقعیت‌های نرم‌افزار ABAQUS پرداخته شده است. ده نمونه تیر بتنی تحت بار پیچشی با اضافه کردن ورق FRP در اشکال و موقعیت‌های مختلف با مساحت یکسان در نظر گرفته شده، نهایتاً مشخص گردید که با تقویت وسط تیر با ورق FRP نسبت به حالات دیگر رفتار بهتری حاصل شده و وجود ورق‌های FRP ایجاد ترک‌های برشی قطری در جداره‌های تیر بتنی را به تعویق انداخته و باعث افزایش مقدار لنگر پیچشی و کاهش مقدار تنش‌های برشی در جداره‌های تیر بتنی می‌شود [۱].

**کلید واژگان:** بارگذاری پیچشی، کامپوزیت FRP، تیر بتنی تحت بار پیچشی

Otsuka نتایج FEM را برای تیرهای RC با خمش و برش و پیچش چرخه‌ای با استفاده از معادله متشکله که بوسیله نویسنده پیشنهاد شده است بدست آورده‌اند، که با نتایج آزمایش مطابقت داشتند. پژوهشی که مربوط به ترکیب بار شامل بارگذاری پیچشی باشد و اطلاعات قبلی در مورد ویژگی‌های حلقه پسماند در اعضا RC که شامل ترکیب بارگذاری باشد کم است [۳-۴].

Belarbi در سال ۲۰۰۹ یک مطالعه آزمایشگاهی در دانشگاه علمی-تکنولوژی میسروریا برای فهمیدن رفتار تیرهای مربعی RC پل‌ها تحت ترکیب بارگذاری شامل پیچش انجام یافته، داده است. متغیرهای اصلی مقاله نسبت لنگر پیچشی به لنگر خمشی بوده و رفتار متفاوت تیرهای RC با مقطع مربع تحت ترکیب بارگذاری در این مقاله مورد بحث قرار گرفته است [۵].

در سال ۲۰۱۳ میلادی، L. S. Jayagopal, D. Tensing طی تحقیقاتی، ۴۸ تیر بتنی با الیاف فولادی با درصد حجمی ۰٪، ۰/۵٪ و ۱٪ حجم بتن تقریبی طول به قطر ۶۰ مورد بررسی مقاومت خمشی و پیچشی در شرایط مختلف مورد نیاز برای ایجاد حالت‌های گسیختگی طبق تئوری خمش مقطع مورب مورد آزمایش قرار گرفت.

مقطع تیرهای آزمایشگاهی ۲۳۰۰ سانتی متر طول، ۱۵ سانتی متر عرض، ۲۳ سانتی متر ارتفاع می‌باشد. آن‌ها در آزمایشگاهی که انجام دادند به این نتیجه رسیدند که با حضور ۱ درصد الیاف فولادی، مقاومت خمشی ۲۴٪ افزایش یافته و در صورت وجود پیچش، انحراف تیر در مقایسه با تیر بدون الیاف کاهش چشم گیری داشته است [۶]. اخیراً Belarbi در سال ۲۰۰۸، گزارشی از حالت جزء به جزء بر روی رفتار تیرهای RC تحت ترکیب بارگذاری‌ها و هدف برای تحقیقات آتی را ارائه کردند. آنها فهمیدند که اثر کاهش مقاومت بتن در وجود بارهای برشی و پیچشی است و محصور شدن هسته بتن بدلیل خاموت عرضی عمدتاً در مقاومت نهایی مقطع بتن تحت ترکیب بارگذاری موثر است. آنها همچنین مدل‌های ترکیب شده ساده برای ترکیب اثرات نرمی و محصور پیشنهاد کردند [۷].

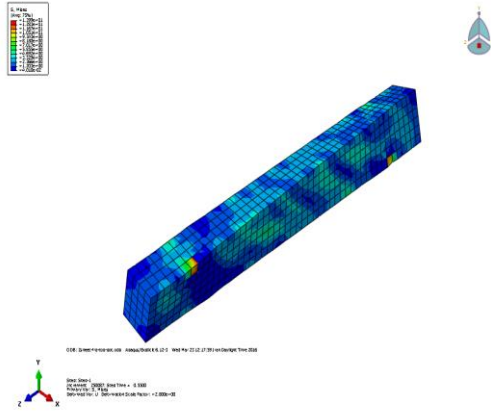
در سالهای اخیر لزوم توجه به اثر پیچش و طراحی برای آن مورد تاکید فراوان قرار گرفته و ضوابط خاص مربوط به آن در هر آیین‌نامه ای بخش قابل توجهی را به خود اختصاص داده است. نظر به اهمیت و تاثیرگذاری پیچش در سازه‌ها بررسی اعضای بتنی تحت بار پیچشی و با توجه به اینکه اعضای بتنی بعد از بارگذاری احتمال ترک خوردگی و افت مقاومت در سیکل‌های متناوب بارگذاری را دارند، نحوه تقویت و بهسازی این اعضا با فن‌آوری جدید کامپوزیتی اهمیت بررسی این ساختار را بیش از پیش نمایان می‌کند.

سازه‌های بتنی به دلایلی همچون اشتباهات طراحی، اشتباهات اجرایی، حملات سولفاتی و... مورد تهدید واقع می‌شوند. که در این بین سهم اشتباهات اجرایی و طراحی بیشتر بروز می‌نماید. بنابراین مقاوم‌سازی این اعضا می‌تواند یکی از بهترین راه‌حل‌ها باشد. استفاده از پوشش‌های FRP برای تقویت پیچش اعضای بتنی در دو دهه اخیر مطرح شده است که با توجه به سختی‌های روش‌های پیشین مانند افزایش سطح مقطع اتصال با بتن‌ریزی مجدد، محصور کردن ناحیه اتصال با آرماتورهای برشی و غیره، به ویژه ملاحظات معماری از جایگاه ویژه‌ای برخوردار است.

تیرهای بتنی به عنوان مهم‌ترین عضو از اعضا یک ساختمان بتن‌آرمه هستند. ضعف سازه‌های بتنی در مقابل ارتعاشات و نیروهای وارده از طرف زلزله باعث شده که این نقاط ضعف ستون‌های بتن‌آرمه شناخته و اصلاح گردد. در اغلب سازه‌های بتنی، تیرها به دلیل ناکارآمدی در شکل‌پذیری خمشی یا پیچشی در مقاطع بحرانی که عمدتاً ناشی از کمبود آرماتورهای عرضی یا طول وصله می‌باشد، آسیب پذیرترین اعضا بوده، بخصوص اگر این تیرها دارای دهانه‌های بزرگ باشند این نگرانی دو چندان می‌شود. محققین سعی می‌کنند با بررسی رفتار و عملکرد تیرهای بتنی تحت بارگذاری‌های مختلف از جمله پیچش این عیب را به حداقل برسانند و این تیرها را در مقابل نیروها مقاوم کنند. در گذشته برای بسیاری از شرایط طراحی، لنگرهای خمشی و نیروی برشی بعنوان آثار اولیه در نظر گرفته می‌شد، در صورتی که پیچش به عنوان عامل ثانویه مورد توجه است. پیچش در سازه‌های بتن‌آرمه معمولاً در اثر یکپارچگی و پیوستگی اعضا بوجود می‌آید. به همین علت در ابتدای امر این مساله کمتر مورد توجه طراحان سازه‌های بتن‌آرمه قرار می‌گرفت. در نتیجه تاثیر آن در طراحی تنها به صورت اتکا به ضریب اطمینان بزرگی که معمولاً در روشهای محاسباتی به کار می‌رفت مشاهده می‌شد [۱].

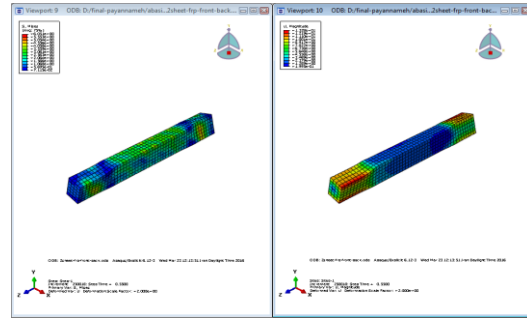
بنابراین به اندازه‌ای که رفتار تحت خمش و برش مورد مطالعه بوده، رفتار پیچشی اعضای RC مورد مطالعه قرار نگرفته است. بعد از آنکه اولین بار هانسن تحقیقات زیادی در مورد اتصالات بتن‌آرمه انجام دادند، از آن به بعد این موضوع توسط محققینی در کشورهای آمریکا، کانادا، ژاپن مورد بررسی و مطالعه قرار گرفت، اگرچه اهداف تحقیق متفاوت بوده ولی تاکید اصلی این مطالعات بررسی رفتار مهاری فولادهای تیر و ایجاد رفتار شکل‌پذیر در بارگذاری متناوب بود [۲]. نتیجه این تحقیقات منجر به تدوین اولین آیین‌نامه برای طراحی اتصالات بتن‌آرمه شد.

در نمونه دوم، ورق FRP به صورت لایه‌ای در بالا و پایین و در امتداد طول تیر مدل شده است. شکل ۴ کانتور تنش‌های فون میز بعد از بارگذاری و شکل ۵ تنش‌های ایجاد شده در ورق FRP را نشان می‌دهد.

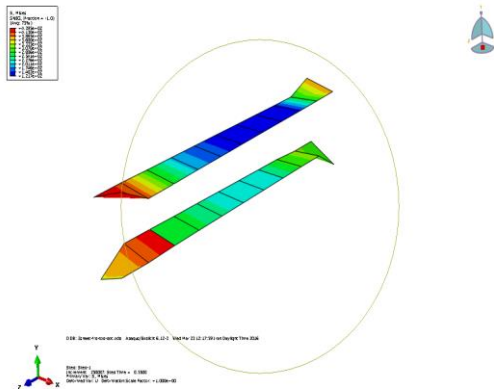


شکل ۴- کانتور تنش فون میز تیر بتنی (2Sheet-frp-top-bot)

در این مقاله ۱۰ نمونه تیر بتنی تحت بار پیچشی مورد مطالعه قرار گرفته است. بدین منظور از شکل‌های مختلف ورق FRP برای تقویت تیر بتنی استفاده شده است. در نمونه اول از دو لایه ورق FRP در میانه تیر و به صورتی که به طرفین تیر بتنی وصل شود، استفاده گردیده است. شکل ۱ کانتور تنش‌های فون میز و کانتور جابجایی را نشان داده و شکل ۲ بیانگر تنش‌های ایجاد شده در ورق FRP بعد از بارگذاری می‌باشد.



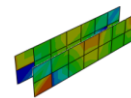
شکل ۱- کانتور جابجایی و کانتور تنش فون میز تیر بتنی (2Sheet-frp-front-back)



شکل ۵- کانتور تنش فون میز ورق FRP (2Sheet-frp-top-bot)

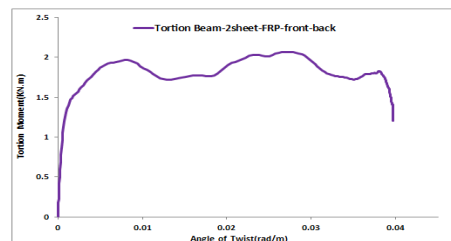
با مشاهده نمونه تغییر شکل یافته ورق FRP مشخص می‌شود که با توزیع تنش در طول ورق در قسمت‌های ابتدایی و انتهایی ورق پدیده جداشدگی نیز اتفاق افتاده است.

بعد از بارگذاری و با توجه به اینکه نمونه تحت پیچش خالص قرار گرفته است، نمودار لنگر- دوران به صورت شکل ۶ بعد از آنالیز از نرم‌افزار استخراج می‌شود. ماکزیمم لنگر پیچشی قابل تحمل ۲/۲۷۶ کیلونیوتن در واحد طول و ماکزیمم دوران برابر ۰/۰۳۹۱ رادیان در واحد طول می‌باشد.

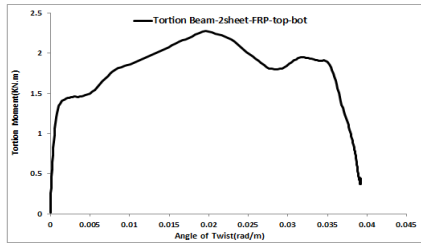


شکل ۲- کانتور تنش فون میز ورق FRP

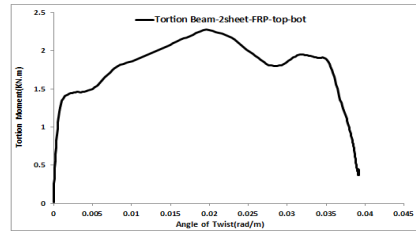
بعد از بارگذاری و با توجه به اینکه نمونه تحت پیچش خالص قرار گرفته، نمودار لنگر- دوران به صورت شکل ۳ از نرم‌افزار استخراج می‌شود. ماکزیمم لنگر پیچشی قابل تحمل ۲/۰۶۸ کیلونیوتن در واحد طول و ماکزیمم دوران برابر ۰/۰۳۹۷ رادیان در واحد طول می‌باشد.



شکل ۳- منحنی لنگر- دوران (2Sheet-frp-front-back)



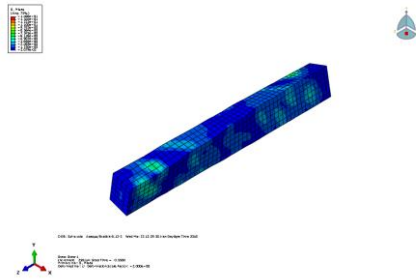
شکل ۹- منحنی لنگر-دوران (3UFRP-Center)



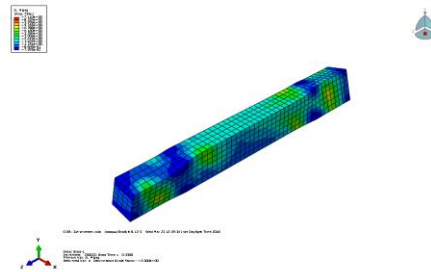
شکل ۶- منحنی لنگر- دوران (2Sheet-frp-top-bot)

در نمونه چهارم، ورقه‌های FRP به صورت U شکل و به فاصله ۱۰ سانتی‌متر از هم در امتداد طول تیر مدل شده‌اند. شکل ۱۰ کانتور تنش فون میز و شکل ۱۱ تنش‌های ایجاد شده در ورق FRP بعد از بارگذاری نشان داده شده است.

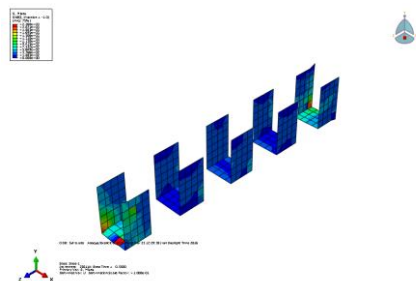
در نمونه سوم، ورق‌های FRP به صورت U شکل در وسط تیر در نظر گرفته شده است. شکل ۷ کانتور تنش‌های فون میز و شکل ۸ تنش‌های ایجاد شده در ورق FRP بعد از بارگذاری نشان داده شده است.



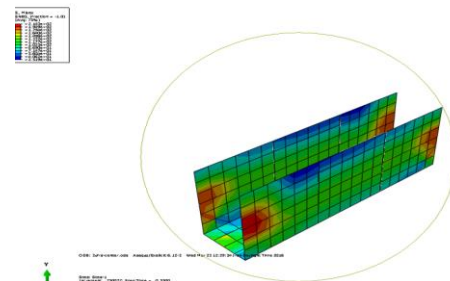
شکل ۱۰- کانتور تنش فون میز تیر بتنی (5UFRP)



شکل ۷- کانتور تنش فون میز تیر بتنی (3UFRP-Center)



شکل ۱۱- کانتور تنش فون میز ورق FRP

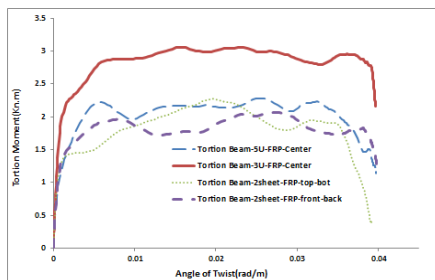


شکل ۸- کانتور تنش فون میز

بعد از بارگذاری و با توجه به اینکه نمونه تحت پیچش خالص قرار گرفته است، نمودار لنگر- دوران به صورت شکل ۱۲ بعد از آنالیز از نرم‌افزار استخراج می‌شود. ماکزیمم لنگر پیچشی قابل تحمل ۲/۲۸ کیلونیوتن در واحد طول و ماکزیمم دوران برابر ۰/۰۳۹۷ رادیان در واحد طول می‌باشد.

بعد از بارگذاری و با توجه به اینکه نمونه تحت پیچش خالص قرار گرفته است، نمودار لنگر- دوران به صورت شکل ۹ بعد از آنالیز از نرم‌افزار استخراج می‌شود. ماکزیمم لنگر پیچشی قابل تحمل ۳/۰۶۳ کیلونیوتن در واحد طول و ماکزیمم دوران برابر ۰/۰۳۹۶ رادیان در واحد طول می‌باشد.

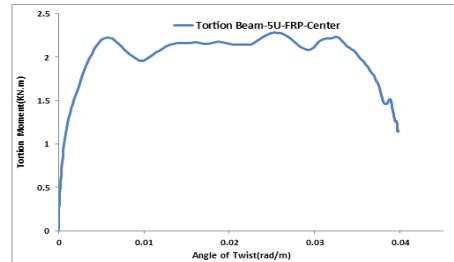
نتایج حاصل از تحلیل هر ۴ نمونه در نمودار منحنی شکل آورده شده است همان گونه که مشاهده می‌گردد منحنی نمونه Torsion beam-3U-FRP-Center دارای بیشترین لنگر پیچشی نسبت به سایر حالات بوده و نمونه Torsion beam-2sheet-front-back دارای کمترین لنگر پیچشی نسبت به سایر حالات می‌باشد. این در حالی است که تغییر شکل کلیه نمونه‌ها به صورت خطی با اعمال بار افزایش می‌یابد و سپس در حالت غیرخطی وارد می‌شوند. افت بار، قبل از تسلیم در کلیه نمونه‌ها تقریباً یکسان بوده و انطباق بسیار خوبی در قسمت الاستیک با هم داشته و تقریباً بعد از دوران ۰/۰۳۵ رادیان تقریباً کلیه نمونه‌ها با افت مقاومت روبه‌رو بوده و به حد گسیختگی می‌رسند. در نمونه 3U-FRP-Center مقدار زاویه دوران در وسط تیر ماکزیمم بوده با تقویت این ناحیه و جلوگیری از ترک خوردگی بتن همانند شکل ظرفیت لنگر پیچشی افزایش قابل توجه پیدا کرده است.



شکل ۱۳ - مقایسه تاثیر استفاده از ورق FRP و نحوه چینش آن‌ها در نمونه‌های عددی

#### ۴- صحت سنجی

قبل از مدلسازی برای صحت‌سنجی نرم‌افزار، بررسی نمونه آزمایشگاهی تیر بتنی تحت پیچش توسط KULKARNI آزمایشگاهی تیر بتنی تحت پیچش توسط همکارانش در سال ۲۰۱۰ انتخاب و مدلسازی گردید [۹]. در جدول ۱ مشخصات مصالح برای اختلاط بتن آورده شده است. همچنین در شکل ۱۳ مشخصات ابعادی و نحوه انجام آزمایش نشان داده شده است. در شکل ۱۴ نیز خروجی نمونه در قالب منحنی لنگر پیچشی و چرخش نمونه بر اساس رادیان در واحد طول نمونه آزمایشگاهی نشان داده شده است.



شکل ۱۲- منحنی لنگر-دوران (SUFRP)

در این تحقیق روابط تنش - کرنش تک محوری بر اساس مدل رفتاری Kent&Park استفاده شده است [۸]. مدول یانگ Es با توجه به نوع اعضا متفاوت بوده و نیز ضریب پواسون Vs برابر با ۰/۳ و مقدار جرم مخصوص بتن برابر ۲۴۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب وارد شده برای همه آن‌ها در نظر گرفته شده است. برای مدل فولاد، معیار فون مایسز و قانون سخت‌شوندگی ایزوتروپیک استفاده شده است. به دلیل رفتار ترد و شدیداً غیرخطی مصالح، تحلیل با استفاده از اختلاف مرکزی و با استفاده از گام از نوع دینامیکی صریح (Explicit) انجام می‌شود.

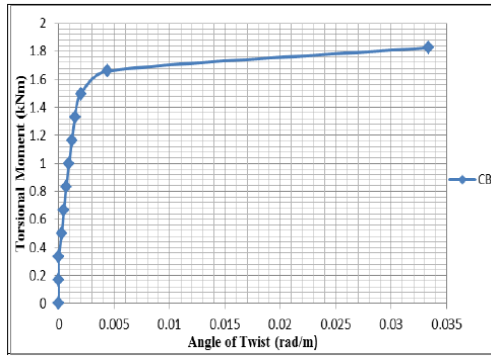
در این مدل یک اندرکنش بین آرماتورهای مدفون در داخل تیر بتنی و اندرکنش بعدی محل تماس قطعه اعمال بار با المان تیر بتنی می‌باشد. برای مدفون کردن آرماتورها در داخل تیر بتنی از قید Embedded Region استفاده می‌کنیم. که در واقع اتصال بین میلگردها و بتن را برقرار می‌کند. در این تحقیق نوع تماس بین سطوح مشترک تماس عمودی از نوع فرمولاسیون پنالتی با ضریب اصطکاک ثابت استفاده شده است.

بارگذاری در این مساله، به صورت جابه‌جایی و به المان اعمال بار وارد می‌شود، قسمت‌های پایین قطعه اعمال بار را انتخاب نموده و درجه آزادی انتقالی در جهت Y را بسته تا هیچگونه جابجایی در این راستا نداشته باشیم.

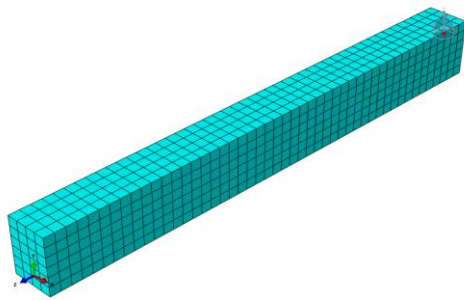
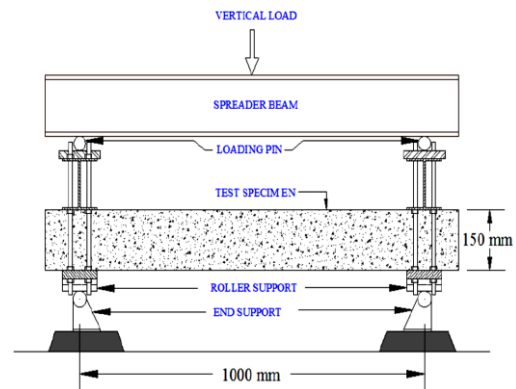
در این مساله قطعه‌ی بتنی از نوع المان‌های کانتینیوم با تابع شکل درجه یک و انتگرال‌گیری کاهش یافته می‌باشد (C3D8R).

همچنین برای میلگردها از المان‌های تیری سه بعدی با تابع تغییر شکل درجه یک (T3D2) استفاده شده است.

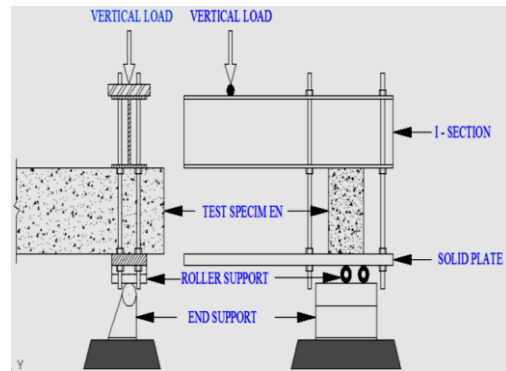
#### ۳- مقایسه تاثیر استفاده از ورق FRP در موقعیت و اشکال متفاوت



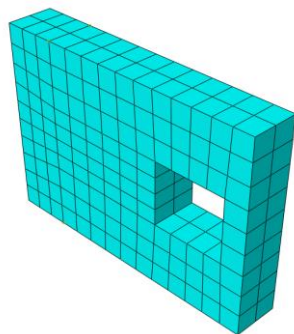
شکل ۱۴ - خروجی آزمایشگاهی نمونه CB [۹]



شکل ۱۵ - مش بندی المان تیر بتنی



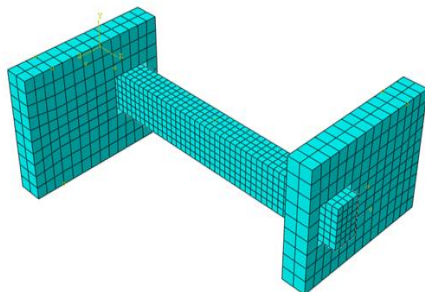
شکل ۱۳ - نحوه آزمایش و مشخصات ابعادی نمونه آزمایشگاهی [۹]



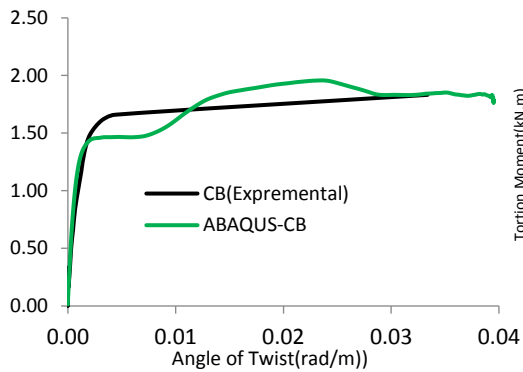
شکل ۱۶ - مش بندی المان اعمال بار

جدول ۱- نحوه طرح اختلاط تیر بتنی [۹]

Water	Cement	Fine Aggregate	Coarse Aggregate
186 kg	372 kg	637 kg	1209 kg
0.50	1	1.71	3.25



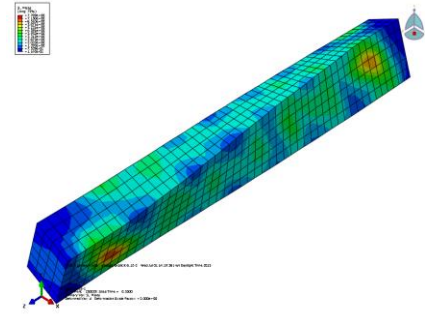
شکل ۱۷ - مدل نهایی مش بندی شده



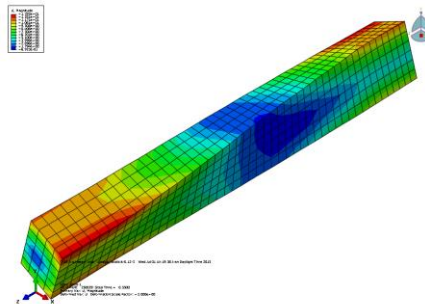
شکل ۲۱- مقایسه نتایج نمونه عددی با نمونه آزمایشگاهی

### ۶- نتیجه گیری

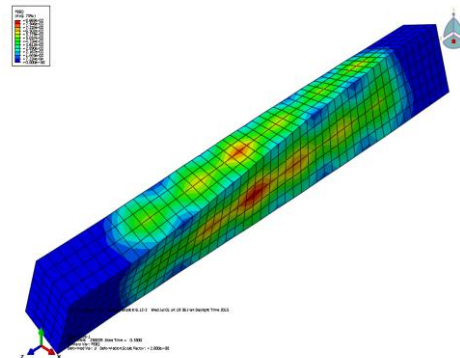
- ۱- با تقویت وسط تیر بصورت پیوسته با ورقهای FRP، مقدار ظرفیت لنگر پیچشی در نمونه‌ها افزایش یافته است.
- ۲- روند رشد ترک‌ها و کرنش‌های ناشی از پیچش در جداره‌های تیر بتنی مشاهده می‌شود. در نمونه‌هایی که سختی کاهش می‌یابد این روند رشد بیشتر مشهود می‌باشد.
- ۳- با توجه به روند رشد ترک‌ها در جداره‌ها در اثر بارگذاری پیچشی، آرماتورهای بالا و پایین تیر نقش کم‌رنگتری در تحمل بار پیچشی در زوایای مختلف پیچشی ایفا می‌کنند.
- ۴- در کلیه نمونه‌ها افت مقاومت قبل از بار تسلیم تقریباً بصورت خطی می‌باشد.
- ۵- وجود ورقهای FRP ایجاد ترکهای برشی قطری در جداره‌های تیر بتنی را به تعویق انداخته و باعث افزایش مقدار ظرفیت لنگر پیچشی و کاهش مقدار تنش‌های برشی در جداره‌های تیر بتنی می‌شود.
- ۶- بیشترین کرنش پلاستیک ایجاد شده با توجه به کانتورهای کرنش پلاستیک ارائه شده در اغلب نمونه‌ها در قسمت وسط، واقع در جداره‌های کناری تیر می‌باشد.



شکل ۱۸- کانتور تنش فون میسز برای نمونه تغییر شکل یافته



شکل ۱۹- کانتور جابجایی برای نمونه تغییر شکل یافته



شکل ۲۰- کانتور کرنش پلاستیک برای نمونه تغییر شکل یافته

### ۵- بررسی نتایج آنالیز نمونه عددی با نتایج آزمایشگاهی

با استخراج نتایج نمونه عددی در نهایت با انتقال داده‌های نمودار به نرم‌افزار اکسل و با اعمال تغییراتی جابجایی به دوران و نیرو به لنگر تبدیل می‌شود. (دوران: با تقسیم جابجایی به مقطع تیر و لنگر پیچشی: با ضرب مقدار نیرو تا مقطع تیر) همان‌طور که از شکل ۲۱ مشخص است، منحنی لنگر هم‌پوشانی قابل قبولی دارند و این نشان می‌دهد که منطق شبیه‌سازی نرم‌افزار ABAQUS پیچشی- دوران حاصل از آزمایش تجربی و تحلیل عددی برای این نمونه‌ها با نتایج آزمایشگاهی انطباق خوبی پیدا کردند.



## ۱۲- مراجع

۱. عباسی، نادر، (۱۳۹۵)، مطالعه عددی تاثیر فن آوری جدید کامپوزیت‌ها در بهبود رفتار تیرهای بتنی تحت بار پیچشی، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه آزاد اسلامی واحد مراغه.
۲. مستوفی نژاد، د.، سبحانی، ج. (۱۳۸۲)، "مطالعه رفتاری و طبقه بندی اتصالات بتن آرمه در بار نهایی"، نشریه دانشکده فنی، جلد ۳۷، شماره ۲، صفحات ۲۹۵ تا ۳۱۰.
3. Otsuka H, Wang Y, Takata T, Yoshimura T. (2003). Experimental study on the parameters effecting the hysteresis loop of RC members subjected to pure torsion. Journal of Japan Society of Civil Engineers, No. 739, V 60, 93-104.
4. Otsuka H, Wang Y, Ishihara S, Yoshimura T. (2003). Formulation of hysteresis loop of RC members Subjected to pure Torsion. Proceedings of Japan Concrete Institute, Vol. 25, No. 2, 1027-32.
5. Belarbi A, Li Q, Suriya prakash S. (2009). Torsional effects on seismic performance of Square vis. Circular RC bridge beams.
6. L.S. Jayagopal, D. Tensig. (2013). steel fiber reinforced concrete beams subjected to combined bending and torsion skew bending approach.
7. Belarbi A, Parkash S.S, Silva P. (2008). Flexure -Shear- Torsion Interaction of RC Bridge beam. Paper No. 6, Proceedings of the Concrete Bridge Conference, St Louis, Mo.
8. Kulkarni D.B, LIKHIL L. (2010). Torsional Strengthening of Under Reinforced Concrete Beams Using Crimped Steel Fiber. International Journal of Research in Engineering and Technology.
۹. مستوفی نژاد، د.، (۱۳۸۵)، سازه‌های بتن آرمه (جلد اول)، انتشارات ارکان.



# Numerical Investigation of the Torsional Behaviour of RC Beams with Respect to the Position and Spacing of FRP Sheets

Nader Abbasi

MSc. of Structural Engineering, Department of Civil Engineering, Maragheh Branch, Islamic Azad University, Maragheh, Iran

Masoud Pourbaba\*

Faculty member, Department of Civil Engineering, Maragheh Branch, Islamic Azad University, Maragheh, Iran

## Abstract:

Recent earthquakes, the severe structural damage that ensues and modifications incorporated into building codes call for retrofitting of structures more than ever. A viable method is utilizing composite Fiber Reinforced Polymer (FRP). This system was initially used to the flexural strengthening of RC beams. In this study, a RC beam, one of the primary structural elements, is investigated in a commercial finite element software, ABAQUS; ten RC beams with FRP sheets used in different shapes and positions (the area of sheets is equal in different cases) are studied under torsional loading. Results showed that strengthening the mid portion of the FRP provides better results and incorporation of FRP sheets delays the ingress of diagonal shear cracks in faces of the RC beams which in turn increases the torsional moment capacity and reduces shear stresses in faces of the RC beam.