

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشکده عمران

پایان نامه کارشناسی ارشد مهندسی سازه

بررسی آزمایشگاهی شکل پذیری تیرهای بتنی مسلح به میلگرد FRP

نگارنده: عرفان تحریرچی

استاد راهنما

دکتر فرشید جندقی علایی

استاد مشاور

دکتر میثم جلالی

شهریور ۱۴۰۰

تقدیم اثر

خدای رابی شاکرم که از روی کرم، پدر و مادری فداکار نسیم ساخته است تا دسیه‌ی درخت پربار وجودشان بیایم و از ریشه‌ی آنها شاخ و برگ
گیرم و از سایه وجودشان در راه کسب علم و دانش تلاش نمایم. والدینی که بودند تاج افتخاری است بر سرم و نشان دلیلی است بر بودنم، چرا که این
دو وجود پس از پروردگار، مایه‌ی هستی ام بوده اند وستم را گرفتند و راه رفتن را در این وادی زندگی پر از فراز و نشیب آموختند. آموزگاری که برایم زندگی بودند و
انسان بودن را معنا کردند...

ماحصل آموخته‌ایم را تقدیم می‌کنم به آنان که مهر آسمانی شان آرام، بخش آلام زمینی ام است

به استوارترین تکیه‌گاهم، دستان پر مهر پدرم که استقامت و ایستادگی را به من آموخت

به سبزترین نگاه زندگیم، چشمان پر مهر مادرم که بهواره نوید موفقیت میداد

و به دلسوز خواهرم

که هرچه آموختم در کتب عشق شما آموختم و هرچه بگوختم قطره‌ای از دریای بی‌کران مهربانان را پاس توانم بگویم.

امروز هستی ام به امید شماست و فردا کلید باغ بهشت رضای شما.

امید است که حاصل تلاشم نسیم گونه، غبار محنتستان را بزداید.

تشکر و قدردانی

هر کس کلمه ای به من بیاموزد، مرانده خود کرده است. (امام علی علیه السلام)

از استاد محترم آقای دکتر علایی که راهنمایی های گرانتدرشان روشنی بخش این مسیر تاریک و مشاوره های هموارکننده ی آقای دکتر جلالی و تمامی دوستان و عزیزانی که در این مسیر مریاری کردند، کمال تشکر و قدردانی را دارم. همچنین از آقای مهندس بهشتی و عموی عزیزم که در این راه با فراهم نمودن امکانات پژوهشی شرایط اجرای آزمایش را فراهم نمودند، سپاس گزارم.

امید است در نظر بزرگواران سرافراز باشم.

تهدنامه

اینجانب **عرفان تحریرچی** دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته **سازه** دانشکده عمران دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه بررسی آزمایشگاهی شکل پذیری تیرهای بتنی مسلح به میلگرد FRP تحت راهنمایی آقای دکتر علایی متعهد می شوم.

- تحقیقات در این پایان نامه توسط اینجانب انجام شده است و از صحت و اصالت برخوردار است .
- در استفاده از نتایج پژوهشهای محققان دیگر به مرجع مورد استفاده استناد شده است .
- مطالب مندرج در پایان نامه تاکنون توسط خود یا فرد دیگری برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی در هیچ جا ارائه نشده است .
- کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می باشد و مقالات مستخرج با نام « دانشگاه صنعتی شاهرود » و یا « Shahrood University of Technology » به چاپ خواهد رسید .
- حقوق معنوی تمام افرادی که در به دست آمدن نتایج اصلی پایان نامه تأثیرگذار بوده اند در مقالات مستخرج از پایان نامه رعایت می گردد.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه ، در مواردی که از موجود زنده (یا بافتهای آن ها) استفاده شده است ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است .
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که به حوزه اطلاعات شخصی افراد دسترسی یافته یا استفاده شده است اصل رازداری ، ضوابط و اصول اخلاق انسانی رعایت شده است .

تاریخ

امضای دانشجو

مالکیت نتایج و حق نشر

کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج ، کتاب ، برنامه های رایانه ای ، نرم افزار ها و تجهیزات ساخته شده است) متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می باشد . این مطلب باید به نحو مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود . استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در پایان نامه بدون ذکر مرجع مجاز نمی باشد.

چکیده

امروزه لزوم ساخت سازه‌ها در محیط‌های خورنده نظیر سواحل، ضرورت جایگزینی میلگردهای FRP را به جای میلگردهای فولادی افزایش داده است. از طرف دیگر، ترکیب رفتار کششی کاملاً الاستیک میلگردهای FRP در کنار عملکرد ترد بتن فشاری، عضوی فاقد شکل پذیری همراه با شکست ترد می‌سازد. در این پژوهش با هدف تامین و بهبود شکل پذیری، دو رویکرد مورد آزمایش قرار گرفت. در رویکرد اول، با هدف تغییر در نمودار تنش-کرنش بتن فشاری، طرح اختلاط بتن با استفاده از افزودنی‌های پلیمری اصلاح شد. تعداد ۱۸ نمونه استوانه‌ای تشکیل شده از ۵ نوع پلیمر مورد آزمایش قرار گرفت که تنها در یک مورد بهبود شکل پذیری با افزایش ۹.۵ درصدی نسبت به بتن معمولی قابل مشاهده است. این نوع بتن پلیمردار به دلیل کاهش شدید در مقاومت نهایی، استهلاک انرژی بسیار کمتری نسبت به بتن معمولی داشته و استفاده از آن در اعضای بتنی توصیه نمی‌شود. در رویکرد دوم، با محصور نمودن بتن در ناحیه فشاری توسط الیاف‌های FRP، از ایجاد انبساط عرضی ناشی از فشار، ممانعت به عمل آمده و در نتیجه‌ی آن، رفتار تنش-کرنش بتن در این ناحیه تغییر کرد. تعداد ۸ نمونه تیر بتنی با طول دهانه ۱.۸ متر، در ۷ نوع محصور شدگی متفاوت مورد آزمایش خمش ۴ نقطه قرار گرفت. در این میان، ۳ مورد محصور شدگی، شکل پذیری تیر بتنی را در حدود ۴۰ تا ۶۰ درصد بهبود بخشیدند.

کلمات کلیدی: تیر بتنی، میلگرد FRP، محصور شونده‌گی، شکل پذیری، بتن اصلاح شده با پلیمر (PMC)، تست خمش ۴ نقطه

فهرست مطالب

و	فهرست جداول
ز	فهرست اشکال
۱	فصل ۱: کلیات
۲	۱-۱ مقدمه
۲	۲-۱ بیان مسئله
۳	۳-۱ اهمیت و ضرورت تحقیق
۴	۴-۱ اهداف تحقیق
۴	۵-۱ فرضیات و محدودیت های تحقیق
۴	۶-۱ روش تحقیق
۵	۷-۱ ساختار فصول
۷	فصل ۲: سوابق مطالعاتی
۸	۱-۲ مقدمه
۸	۲-۲ کلیات پیرامون مصالح مصرفی
۸	۱-۲-۲ مشخصات مکانیکی FRP ها
۱۱	۲-۲-۲ بتن
۱۲	۳-۲-۲ محصور شدگی بتن
۱۴	۳-۲ بررسی محصور شدگی در اعضای بتنی فشاری و تاثیر آن بر شکل پذیری
۱۵	۱-۳-۲ تاثیر افزودن محصورشدگی در بهبود شکل پذیری ستون های بتنی با مقاومت بالا

۲-۳-۲ رفتار فشاری ستون های بتنی مسلح به میلگرد و الیاف فولادی محصور شده توسط الیاف CFRP تحت بار خارج از مرکز	۱۷
۳-۳-۲ رفتار فشاری ستون های بتنی مسلح با مقطع مستطیلی محصور شده توسط CFRP تحت بار یکنواخت و چرخه ای	۲۰
۴-۳-۲ اثر محصور شوندگی FRP بر رفتار فشاری منشور های مستطیلی بتنی	۲۲
۴-۲ بررسی رفتار تیر های بتنی مسلح به میلگرد FRP	۲۴
۲-۴-۲ بررسی آزمایشگاهی تیر های بتنی مسلح به میلگرد های دوگانه FRP	۲۴
۲-۴-۲ تحلیل و آزمایش رفتار خمشی تیر های بتنی مسلح به میلگرد GFRP	۲۶
۵-۲ تیر های بتنی مسلح به میلگرد FRP با ایده های بهبود شکل پذیری	۲۷
۱-۵-۲ مطالعه آزمایشگاهی رفتار خمشی تیر های بتن-ECC مسلح به میلگرد FRP	۲۸
۲-۵-۲ رفتار خمشی تیر های بتنی و ECC مسلح به میلگرد های BFRP	۲۹
۳-۵-۲ مطالعه آزمایشگاهی بر رفتار خمشی تیر های ECC مسلح به میلگرد FRP	۳۰
۴-۵-۲ خصوصیات شکل پذیری تیر های بتن الیافی مسلح به میلگرد FRP	۳۲
۵-۵-۲ رفتار خمشی تیر های ECC مسلح به میلگرد GFRP	۳۴
۶-۵-۲ ایده جدید به منظور دست یابی به شکل پذیری تیر های بتنی مسلح	۳۶
۷-۵-۲ تحلیل شکل پذیری تیر های مسلح به میلگرد FRP و تسلیم فشاری	۳۹
۸-۵-۲ طراحی بهینه تیر های بتنی مسلح به میلگرد FRP و تسلیم فشاری	۴۰
۹-۵-۲ بررسی شکل پذیری مقاطع بتنی مسلح به میلگرد های FRP	۴۱

فصل ۳ آزمایش های اولیه مواد و مصالح

۱-۳ مقدمه	۴۴
۲-۳ میلگرد فولادی	۴۴
۳-۳ بتن	۴۵
۴-۳ میلگرد GFRP	۴۷

۵۱.....	۳-۴-۱ تست کشش میلگرد های GFRP شرکت کامپوزیت آسیا
۵۲.....	۳-۴-۲ تست کشش میلگرد های GFRP شرکت آریانا سازه
۵۵.....	۳-۵ ورق های CFRP
۵۷.....	۳-۶ پلیمر های افزودنی به بتن
۵۷.....	۳-۷ طرح اختلاط بتن های پلیمر دار
۵۹.....	۳-۸ چیدمان آزمایش تنش کرنش بتن
۶۱.....	۳-۹ آزمایش و رسم منحنی تنش-کرنش
۶۷.....	۳-۱۰ شکل پذیری

فصل ۴ آزمایش های نهایی و تحلیل نتایج ۷۱

۷۲.....	۴-۱ مقدمه
۷۲.....	۴-۲ مشخصات تیر ها
۷۴.....	۴-۲-۱ نمونه تیر کنترل فاقد محصورشدگی
۷۴.....	۴-۲-۲ گروه دارای محصور شدگی ناپیوسته و منقطع
۷۵.....	۴-۲-۳ گروه دارای محصور شدگی ناپیوسته و مارپیچ
۷۷.....	۴-۲-۴ گروه دارای محصور شدگی پیوسته و مارپیچ
۷۹.....	۴-۳ مراحل طراحی
۷۹.....	۴-۳-۱ فرضیات اولیه
۷۹.....	۴-۳-۲ طراحی تیر
۸۰.....	۴-۴ مراحل ساخت تیر ها
۸۰.....	۴-۴-۱ آرماتور بندی
۸۱.....	۴-۴-۲ جانمایی نوار های CFRP
۸۲.....	۴-۴-۳ قالب بندی

۸۳.....	۴-۴-۴ آماده سازی پیش از بتن ریزی.....
۸۴.....	۴-۴-۵ بتن ریزی.....
۸۶.....	۴-۴-۶ نگهداری و عمل آوری.....
۸۷.....	۴-۴-۷ نصب ورق های CFRP.....
۸۸.....	۴-۵ چیدمان آزمایش خمش ۴ نقطه.....
۹۰.....	۴-۶ نتایج و تحلیل آزمایش ها.....
۹۰.....	۴-۶-۱ نمونه های گروه اول (تیر کنترل).....
۹۲.....	۴-۶-۲ نمونه های گروه دو.....
۹۶.....	۴-۶-۳ نمونه های گروه سه.....
۱۰۴.....	۴-۶-۴ نمونه های گروه چهار.....
۱۰۹.....	۴-۶-۵ جمع بندی نتایج حاصل از آزمایش تیر ها.....

فصل ۵ نتیجه گیری ۱۱۵

۱۱۶.....	۵-۱ مقدمه.....
۱۱۶.....	۵-۲ نتایج.....
۱۱۷.....	۵-۲-۱ رویکرد اول: اصلاح بتن فشاری توسط پلیمر.....
۱۱۷.....	۵-۲-۲ رویکرد دوم: اثر محصورشدگی تیر بتنی مسلح به میلگرد FRP.....
۱۱۹.....	۵-۳ پیشنهادات.....

پیوست ۱۲۱

مراجع ۱۲۵

فهرست جداول

جدول ۱-۲	مشخصات رفتاری میلگرد های کششی [4]	۹
جدول ۲-۲	نتیجه آزمایش ها و مود شکست نمونه ها	۲۶
جدول ۳-۲	مقایسه ظرفیت خمشی و تغییر مکان نهایی تیر های بتنی و FRC مسلح به میلگرد FRP [16]	۳۳
جدول ۴-۲	خلاصه نتایج آزمایش ها [17]	۳۵
جدول ۱-۳	فرضیات اولیه طرح اختلاط بتن با مقاومت مشخصه ۲۵ و ۳۰ مگاپاسکال	۴۵
جدول ۲-۳	طرح اختلاط بتن مصرفی با مقاومت مشخصه ۲۵ و ۳۰ مگاپاسکال	۴۶
جدول ۳-۳	دانه بندی طرح اختلاط	۴۷
جدول ۴-۳	جزئیات مهار طرفین میلگرد های FRP [27]	۵۰
جدول ۵-۳	نتایج تست کشش میلگرد های GFRP شرکت آریانا سازه	۵۴
جدول ۶-۳	خصوصیات فیزیکی الیاف CFRP و رزین آن	۵۶
جدول ۷-۳	طرح اختلاط بتن های اصلاح شده توسط پلیمر	۵۹
جدول ۸-۳	نتایج حاصل از منحنی تنش کرنش گروه های مورد آزمایش	۶۶
جدول ۹-۳	مقایسه مقادیر شکل پذیری و استهلاک انرژی نمونه ها	۶۹
جدول ۱-۴	شرح مختصر مشخصات محصورشدگی نمونه ها	۷۸
جدول ۲-۴	طرح اختلاط بتن منبسط شونده با مقاومت فشاری ۲۵ مگاپاسکال	۸۵
جدول ۳-۴	مقایسه نتایج نمونه ها	۱۱۱

فهرست اشکال

- شکل ۱-۱ روند نمای کلی تحقیقات ۶
- شکل ۱-۲ مقایسه منحنی تنش- کرنش میلگرد های فولادی، CFRP، GFRP و AFRP [4] ۱۰
- شکل ۲-۲ مقایسه منحنی ممان انحنا تیر های بتنی مسلح به میلگرد فولادی و FRP ۱۱
- شکل ۳-۲ منحنی تنش-کرنش بتن در کشش و فشار ۱۲
- شکل ۴-۲ تاثیر محصور شدگی بر ستون بتنی مسلح [5] ۱۳
- شکل ۵-۲ تاثیر محصور شدگی بر منحنی تنش-کرنش بتن فشاری [6] ۱۳
- شکل ۶-۲ ناحیه محصور شده در مقاطع غیر دایروی [5] ۱۴
- شکل ۷-۲ منحنی تنش-کرنش بتن با فشار های محصور شدگی متفاوت [7] ۱۵
- شکل ۸-۲ تاثیر شکل پذیری در ستون های با مقاومت های متفاوت و در فشار های محصور شدگی متفاوت [7] ۱۶
- شکل ۹-۲ تصویر شماتیک نمونه های ساخته شده توسط نعمت زاده و همکاران [8] ۱۷
- شکل ۱۰-۲ مود شکست (a) ستون با طول ۱۰۰۰ میلیمتر (b) ستون با طول ۵۰۰ میلیمتر ۱۸
- شکل ۱۱-۲ نمودار بار-تغییر مکان جانبی ستون های بلند [8] ۱۹
- شکل ۱۲-۲ مود شکست چند نمونه ۲۱
- شکل ۱۳-۲ منحنی تنش-کرنش نمونه های محصور شده در بارگذاری یکنواخت [9] ۲۱
- شکل ۱۴-۲ چیدمان CFRP همراه با نوار عمودی و افقی [10] ۲۲
- شکل ۱۵-۲ منحنی بار-کوچک شدگی نمونه های $150 \times 150 \times 450$ mm [10] ۲۳
- شکل ۱۶-۲ منحنی بار-کوچک شدگی نمونه های $150 \times 150 \times 450$ mm محصور شده توسط چند لایه [10] ۲۳
- شکل ۱۷-۲ منحنی بار-تغییر مکان وسط دهانه ۷ نمونه تیر ساخته شده به تفکیک مقاومت نهایی [11] ۲۵
- شکل ۱۸-۲ منحنی بار-تغییر مکان وسط دهانه نمونه ها [12] ۲۷
- شکل ۱۹-۲ تصویر شماتیک نمونه ها [۱۳] ۲۸
- شکل ۲۰-۲ منحنی لنگر-تغییر مکان وسط دهانه [13] ۲۹
- شکل ۲۱-۲ مقایسه منحنی بار-تغییر مکان نمونه های آزمایشگاهی و مدل سازی شده [14] ۳۰
- شکل ۲۲-۲ تصویر شماتیک ستاپ و مقطع نمونه ها [15] ۳۱
- شکل ۲۳-۲ منحنی بار-تغییر مکان وسط دهانه نمونه ها [15] ۳۱
- شکل ۲۴-۲ جزئیات نمونه تیر ها ۳۳
- شکل ۲۵-۲ منحنی لنگر-تغییر مکان وسط دهانه نمونه ها [16] ۳۴
- شکل ۲۶-۲ سطح مقطع نمونه ها [17] ۳۵

- شکل ۲-۲۷ تصویر شماتیک نمونه ها [18]..... ۳۶
- شکل ۲-۲۸ مکانیسم تسلیم فشاری فولادی [18]..... ۳۷
- شکل ۲-۲۹ نتایج آزمایش [18]..... ۳۷
- شکل ۲-۳۰ بلوک CY پیشنهادی توس X.C. Liu [19]..... ۳۸
- شکل ۲-۳۱ منحنی تنش-کرنش نمونه بلوک های CY [19]..... ۳۸
- شکل ۲-۳۲ تصویر مدل تیر بتنی مسلح [20]..... ۳۹
- شکل ۲-۳۳ منحنی تنش-کرنش بلوک CY [20]..... ۳۹
- شکل ۲-۳۴ منحنی رفتاری تنش-کرنش بلوک CY [21]..... ۴۰
- شکل ۲-۳۵ نتیجه پارامتر های مورد بررسی بر شکل پذیری تیر..... ۴۱
- شکل ۳-۱ تصویر خاموت های مورد استفاده در تیر های بتنی..... ۴۴
- شکل ۳-۲ میلگرد های GFRP شرکت کامپوزیت آسیا..... ۴۸
- شکل ۳-۳ میلگرد های GFRP شرکت آریانا سازه..... ۴۸
- شکل ۳-۴ دستگاه تست کشش میلگرد GFRP..... ۴۹
- شکل ۳-۵ شماتیک نمونه ی تست کشش FRP..... ۴۹
- شکل ۳-۶ جزییات مهار طرفین میلگرد FRP در تست کشش [27]..... ۵۰
- شکل ۳-۷ تست کشش میلگرد GFRP شرکت کامپوزیت آسیا..... ۵۱
- شکل ۳-۸ منحنی تنش-کرنش میلگرد GFRP شرکت کامپوزیت آسیا..... ۵۲
- شکل ۳-۹ تست کشش میلگرد های GFRP شرکت آریانا سازه..... ۵۳
- شکل ۳-۱۰ نمودار تنش-کرنش نمونه های GFRP شرکت آریانا سازه..... ۵۳
- شکل ۳-۱۱ منحنی تنش-کرنش میلگرد GFRP شرکت آریانا سازه..... ۵۵
- شکل ۳-۱۲ شکل ظاهری الیاف CFRP شرکت کوآنتوم..... ۵۶
- شکل ۳-۱۳ ستاپ تست مقاومت فشاری بتن..... ۶۰
- شکل ۳-۱۴ نمونه های استوانه‌ای بتن پلیمردار..... ۶۱
- شکل ۳-۱۵ تست فشاری نمونه های استوانه‌ای بتن پلیمردار..... ۶۲
- شکل ۳-۱۶ منحنی تنش کرنش گروه کنترل..... ۶۳
- شکل ۳-۱۷ منحنی تنش کرنش گروه WEB307..... ۶۳
- شکل ۳-۱۸ منحنی تنش کرنش گروه ASL303..... ۶۴
- شکل ۳-۱۹ منحنی تنش کرنش مجموعه SBC فاقد ضدفوم..... ۶۴
- شکل ۳-۲۰ منحنی تنش کرنش گروه SBC دارای ۰.۳٪ ضدفوم..... ۶۵
- شکل ۳-۲۱ منحنی تنش کرنش گروه SBC دارای ۰.۵٪ ضدفوم..... ۶۵
- شکل ۳-۲۲ روش دوخطی برای تعیین شکل پذیری [30]..... ۶۸
- شکل ۳-۲۳ منحنی ایده آل تنش کرنش نمونه ASL303..... ۶۸

- شکل ۴-۱ تصویر شماتیک جانمایی میلگرد ها در تیر ها ۷۳
- شکل ۴-۲ تصویر شماتیک سه بعدی نمونه محصور شده ۷۳
- شکل ۴-۳ تصویر شماتیک نمونه کنترل ۷۴
- شکل ۴-۴ تصویر شماتیک نمونه R.D.3 ۷۵
- شکل ۴-۵ تصویر شماتیک نمونه R.D.5 ۷۵
- شکل ۴-۶ تصویر شماتیک نمونه S.D.10 ۷۶
- شکل ۴-۷ تصویر شماتیک نمونه S.D.20 ۷۶
- شکل ۴-۸ تصویر شماتیک نمونه S.D.30 ۷۷
- شکل ۴-۹ تصویر شماتیک نمونه S.C.cube ۷۷
- شکل ۴-۱۰ تصویر شماتیک نمونه S.C.pipe ۷۸
- شکل ۴-۱۱ چند نمونه تیر آرماتور بندی شده ۸۰
- شکل ۴-۱۲ نمونه تیر پس از جانمایی نوار های CFRP ۸۱
- شکل ۴-۱۳ نوار های CFRP آماده شده برای نمونه S.C.cube ۸۲
- شکل ۴-۱۴ قالب های فلزی جهت ساخت نمونه تیر های آزمایش ۸۲
- شکل ۴-۱۵ نمونه S.C.pipe آماده ی بتن ریزی ۸۳
- شکل ۴-۱۶ نمونه ها آماده بتن ریزی ۸۴
- شکل ۴-۱۷ نمونه ها در هنگام بتن ریزی ۸۵
- شکل ۴-۱۸ نمونه ها پس از بتن ریزی ۸۶
- شکل ۴-۱۹ نمونه های محافظت شده با گونی چتایی ۸۷
- شکل ۴-۲۰ نمونه های تکمیل شده و آماده تست ۸۷
- شکل ۴-۲۱ تصویر شماتیک سیستم خمش ۴ نقطه در تیر های بتنی ۸۸
- شکل ۴-۲۲ قاب صلب و جک اعمال نیرو ۸۹
- شکل ۴-۲۳ یک نمونه تیر پیش از بارگذاری ۸۹
- شکل ۴-۲۴ منحنی بار - تغییر مکان نمونه کنترل ۹۰
- شکل ۴-۲۵ الگو ترک نمونه تیر کنترل در لحظات پایانی شکست ۹۱
- شکل ۴-۲۶ تصویر شماتیک ترک های نمونه کنترل ۹۱
- شکل ۴-۲۷ منحنی بار - تغییر مکان تیر R.D.3 ۹۲
- شکل ۴-۲۸ ترک های نمونه R.D.3 پیش از وقوع شکست ۹۳
- شکل ۴-۲۹ منحنی بار - تغییر مکان تیر R.D.5 ۹۴
- شکل ۴-۳۰ ترک های نمونه R.D.5 در لحظات پایانی شکست ۹۵
- شکل ۴-۳۱ منحنی بار - تغییر مکان گروه دو ۹۵
- شکل ۴-۳۲ ترک نمونه های گروه دو . الف) نمونه R.D.3 و ب) نمونه R.D.5 ۹۶

- شکل ۴-۳۳ تصویر شماتیک ترک های گروه دو..... ۹۶
- شکل ۴-۳۴ منحنی بار - تغییر مکان تیر S.D.10..... ۹۷
- شکل ۴-۳۵ ترک های نمونه S.D.10 در لحظات پایانی شکست..... ۹۸
- شکل ۴-۳۶ منحنی بار - تغییر مکان تیر S.D.20..... ۹۹
- شکل ۴-۳۷ ترک های نمونه S.D.20 در لحظات پایانی شکست..... ۱۰۰
- شکل ۴-۳۸ منحنی بار - تغییر مکان تیر S.D.30..... ۱۰۰
- شکل ۴-۳۹ ترک های نمونه S.D.30 در لحظات پایانی شکست..... ۱۰۱
- شکل ۴-۴۰ منحنی بار- تغییر مکان گروه سه ۱۰۲
- شکل ۴-۴۱ الگوی ترک نمونه های گروه سه بعد از شکست..... ۱۰۳
- شکل ۴-۴۲ تصویر شماتیک ترک های گروه سه ۱۰۳
- شکل ۴-۴۳ منحنی بار - تغییر مکان تیر S.C.Cube..... ۱۰۴
- شکل ۴-۴۴ ترک های نمونه S.C.Cube در لحظات قبل از شکست..... ۱۰۵
- شکل ۴-۴۵ منحنی بار - تغییر مکان تیر S.C.Pipe..... ۱۰۶
- شکل ۴-۴۶ ترک های نمونه S.C.Pipe در لحظات قبل از شکست..... ۱۰۷
- شکل ۴-۴۷ منحنی بار تغییر مکان گروه چهار..... ۱۰۷
- شکل ۴-۴۸ الگوی ترک نمونه های گروه چهار بعد از شکست..... ۱۰۸
- شکل ۴-۴۹ تصویر شماتیک ترک های گروه چهار..... ۱۰۸
- شکل ۴-۵۰ منحنی بار - تغییر مکان کلیه تیر ها..... ۱۱۰

فصل ۱: کلیات

۱-۱ مقدمه

از گذشته تا کنون همواره انسان به دنبال دستیابی به مصالح مقاوم‌تر بوده تا کیفیت زندگی خویش را بهبود بخشد. از این رو، بشر به سمت مصالح مرکبی که از ترکیب دو یا چند ماده به منظور رسیدن به ماده جدید با خصوصیات بهتر، روی آورده است. حاصل استمرار این رویکرد، تولید ترکیبی همگن و مقاوم به نام بتن شد. در دسترس بودن اجزاء تشکیل دهنده نظیر ماسه و سنگ‌دانه و آب، ارزان بودن نسبی و فرایند تولید آسان باعث شد که این محصول به یکی از مهم‌ترین ارکان مصالح ساختمانی تبدیل شود.

از جمله مهم‌ترین مزایای استفاده از بتن می‌توان به سهولت ساخت حتی در محل‌های صعب‌العبور، مقاومت فشاری بالا و امکان تولید در مقاومتهای متفاوت و در شکل‌ها و قالب‌های مورد نیاز اشاره کرد. مهم‌ترین ویژگی نامطلوب بتن، شکست ترد و مقاومت کششی ناچیز بوده که سبب شد امروزه به منظور تامین مقاومت کششی و تامین شکست شکل‌پذیر، از بتن‌های مسلح به میلگردهای فولادی استفاده شود. میلگردهای فولادی می‌توانند کرنش زیادی را پس از جاری شدن و پیش از شکست، بدون افت مقاومت تحمل نمایند. این خصوصیت فولاد افزایش شکل‌پذیری را به همراه داشته و در بتن مسلح از شکست ترد بتن جلوگیری می‌کند [1-2].

امروزه بتن مسلح کاربرد بسیار زیادی در صنعت ساختمان داشته و در انواع سازه‌های مسکونی، اداری، پل‌ها، سازه‌های دریایی، سدها و ... مورد استفاده قرار می‌گیرد. همین امر سبب شد تا مطالعات فراوانی پیرامون این کامپوزیت صورت گیرد. اهمیت بتن در سازه‌ها به قدری زیاد است که پس از گذشت سال‌ها از ابداع آن، همچنان محققین به دنبال رفع نقایص و بهبود عملکرد بتن می‌باشند.

۱-۲ بیان مسئله

اگرچه امروزه بتن‌های مسلح به میلگردهای فولادی بسیار پرکاربرد هستند، اما استفاده از آن‌ها در شرایط محیطی خورنده نظیر مناطق ساحلی و مرطوب چالش زیادی به همراه دارد. که مهم‌ترین آن، خوردگی میلگرد فولادی مدفون داخل بتن می‌باشد. به خصوص مقاومت کششی بسیار پایین بتن و ایجاد ترک در مراحل اولیه بارگذاری در ناحیه کششی که میلگردهای فولادی نیز آنجا قرار دارند، روند خوردگی را سرعت می‌بخشد. ترمیم و مقاوم سازی اجزای تخریب شده مستلزم صرف هزینه‌های گزاف و استفاده از مصالح خاص می‌باشد [3].

مطالعات فراوانی به منظور رفع مشکل خوردگی صورت گرفت و راه‌حل‌های متعددی نیز ارائه شد. از جمله پیشنهادات، می‌توان به استفاده از پوشش‌های گالوانیزه و استفاده از میلگردهای FRP¹ اشاره کرد.

¹ Fiber Reinforced Polymer

از مزایای کاربردی میلگردهای FRP نسبت به میلگردهای فولادی می‌توان به مقاوم بودن این مصالح در مقابل حمله‌های شیمیایی و یون کلراید، مقاومت کششی بالاتر از فولاد، وزن سبک این میلگرد (یک-چهارم تا یک-ششم وزن فولاد)، نیاز به پوشش بتنی کمتر نسبت به فولاد، دوام بالا در مقابل خستگی و طول عمر بالاتر از فولاد در محیط‌های خورنده اشاره کرد [4].

از طرف دیگر، میلگردهای FRP نیز همانند دیگر مصالح دارای ویژگی‌های نامطلوبی نیز هستند که از جمله آن‌ها می‌توان به شکست ترد، عدم وجود ناحیه پلاستیک، حساسیت به امواج فرابنفش و آتش، مقاومت عرضی کم و بالا بودن ضریب انبساط حرارتی اشاره کرد [4].

به دلیل مقاومت کششی بسیار بالای میلگردهای FRP و عدم تاثیر پذیری آن‌ها توسط یون‌های کلراید در شرایط خورنده، روز به روز اهمیت استفاده از این نوع میلگرد در سازه‌ها بیشتر می‌شود. اما ترکیب دو مصالح دارای شکست ترد (میلگردهای FRP و بتن) ایجاد شکست ترد و فاقد شکل پذیری می‌کند.

۱-۳ اهمیت و ضرورت تحقیق

از مهم‌ترین خصوصیات که باعث استفاده از فولاد در بتن می‌شود، کرنش زیاد فولاد پس از جاری شدگی بدون افت مقاومت می‌باشد. ناحیه تسلیم میلگردهای فولادی، باعث افزایش شکل پذیری و جلوگیری از شکست ترد عضو سازه‌ای می‌شود. شکل پذیری به دلیل ایجاد هشدار پیش از شکست عضو سازه‌ای، بسیار حائز اهمیت است. به همین دلیل استفاده از مصالح با رفتار شکست ترد، در اجزای سازه‌ای مطلوب نمی‌باشد [2].

برخلاف فولاد که از شکل پذیری مناسبی برخوردار است، میلگرد های FRP فاقد ناحیه پلاستیک می‌باشند. به عبارت دیگر، عملکرد آن‌ها در تحمل بار کششی، به صورت الاستیک و خطی تا لحظه‌ی شکست بوده، در نتیجه دارای شکست ناگهانی و ترد هستند. بنابراین استفاده همزمان از میلگردهای FRP و بتن که هر دو دارای شکست ترد می‌باشند، شکل پذیری عضو سازه‌ای را بسیار کاهش می‌دهد.

از طرف دیگر، تامین شکل پذیری عضوهای سازه‌ای، به دلیل هشدار پیش از شکست جهت حفاظت از خطرهای جانی و تعمیر پیش از وقوع شکست ضروری است. به همین دلیل، تامین شکل پذیری المان‌های بتنی مسلح به میلگردهای FRP از جمله ضروریاتی است که باید به آن پرداخته شود.

۴-۱ اهداف تحقیق

هدف اصلی این تحقیق، بهبود بخشیدن شکل پذیری تیرهای بتنی مسلح به میلگردهای FRP در هنگام خمش است. در این پژوهش بهبود عملکرد شکل پذیری با دو رویکرد مورد بررسی قرار گرفت.

۱- بهبود شکل پذیری بتن به وسیله اصلاح بتن توسط افزودنی‌های پلیمری

در این روش با هدف بهبود شکل پذیری بتن فشاری، طرح اختلاط بتن با استفاده از پلیمر اصلاح شده و مورد بررسی قرار گرفت.

۲- بهبود شکل پذیری تیرهای مسلح به میلگرد FRP به وسیله محصور کردن بتن فشاری.

در این رویکرد محصور شدگی با ممانعت مقابل انبساط‌های عرضی ناشی از فشار بتن، مقاومت و شکل پذیری بتن فشاری را بهبود می‌بخشد.

۵-۱ فرضیات و محدودیت‌های تحقیق

فرض اولیه مسئله، وجود شرایط محیطی خورنده بوده که استفاده از میلگرد کششی فولادی مجاز نباشد. از طرف دیگر، به دلیل فراهم نبودن امکانات کافی و هزینه گزاف تهیه خاموت FRP، در این پژوهش به منظور جلوگیری از وقوع مود برش، از خاموت‌های فولادی استفاده شده است. همچنین با توجه به اینکه عوامل بسیار زیادی در رفتار بتن موثرند و بررسی همه آن‌ها امکان پذیر نیست، طرح اختلاط بتن، جنس سنگ دانه‌ها، سیمان و کلیه مصالح مصرفی ثابت در نظر گرفته شده است.

۶-۱ روش تحقیق

مطالعات این پژوهش، به صورت آزمایشگاهی در سه بخش انجام گرفت:

در بخش نخست، خصوصیات مصالح مصرفی نظیر رفتار تنش-کرنش بتن مصرفی و مقاومت کششی میلگردهای FRP مورد بررسی قرار گرفت.

در بخش دوم، به منظور مقایسه تاثیر افزودنی‌های پلیمری در عملکرد بتن، مجموعاً ۱۸ نمونه بتنی استوانه‌ای ساخته و مورد آزمایش فشار قرار گرفته‌اند؛ که ۱۵ نمونه ی آن‌ها، بتن توسط ۵ نوع پلیمر اصلاح شده و ۳ نمونه استوانه‌ای دیگر، بتن فاقد پلیمر است.

در بخش سوم، با هدف تاثیر محصور شدگی بر رفتار خمشی تیرها، ۸ عدد تیر بتنی مسلح به میلگرد GFRP به طول دهانه ۱.۸ متر ساخته و مورد آزمایش قرار گرفت. این نمونه‌ها توسط نوارهای CFRP به صورت مارپیچ، منقطع، مورب و قائم محصور شده‌اند.

۷-۱ ساختار فصول

این پایان‌نامه که به بررسی آزمایشگاهی شکل پذیری تیرهای بتنی مسلح به میلگرد FRP می‌پردازد، در ۵ فصل تنظیم شده است.

در فصل ۱، به بیان کلیاتی پیرامون موضوع، طرح مسئله، اهداف پژوهش و نگاهی کلی به روش تحقیق پرداخته شده است.

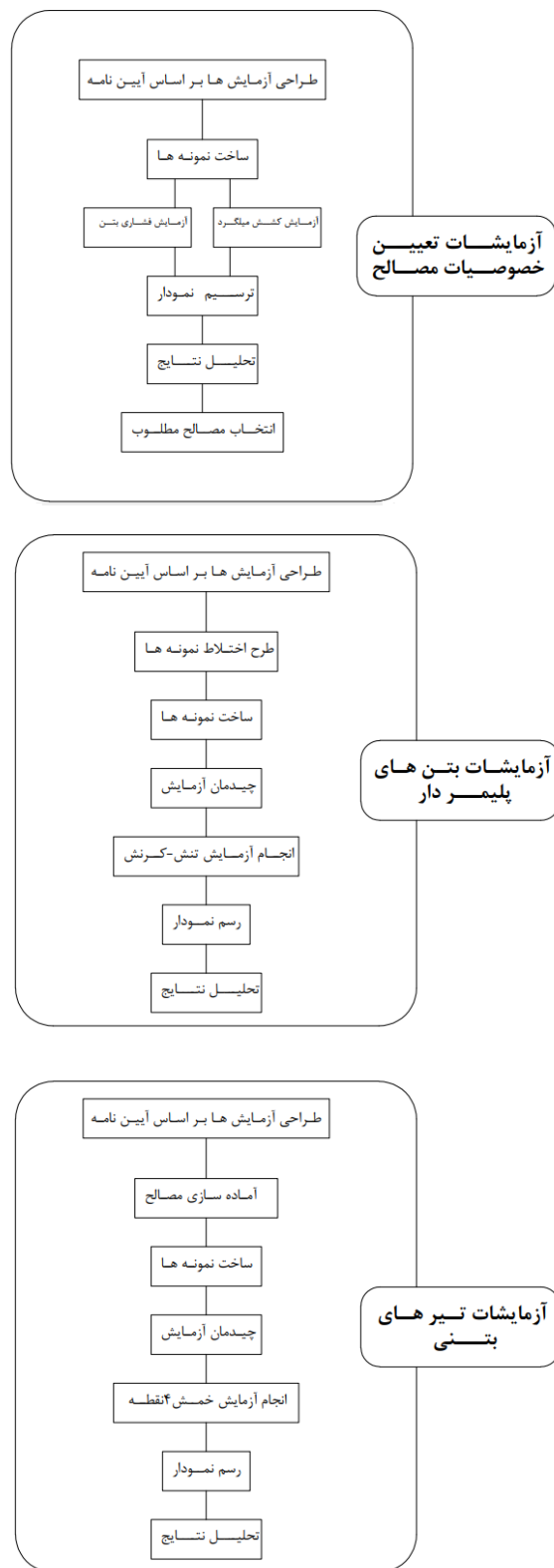
در فصل ۲، تاریخچه شکل گیری و گسترش استفاده از میلگردهای FRP و محصور شوندگی در دهه‌های اخیر پرداخته شده و پژوهش‌های محققین در بررسی شکل پذیری هنگام استفاده از میلگرد FRP گردآوری شده است.

در فصل ۳، به بیان خصوصیات مصالح مصرفی و روش‌های تحقیق پرداخته شد. سپس آزمایش‌های تعیین کننده رفتار مصالح مصرفی مطرح گردیده است. در نهایت آزمایش‌های سنجش تغییرات عملکرد بتن‌های اصلاح شده توسط افزودنی پلیمری از نظر شکل پذیری، مورد بررسی قرار گرفته است.

در فصل ۴، با بررسی آزمایشگاهی تعداد هشت تیر با طول دهانه ۱.۸ متر، اثر محصور شدگی ناحیه فشاری بر رفتار خمشی تیرها شامل مود خرابی، تغییر شکل، ظرفیت مقاومت، ظرفیت استهلاک انرژی و ... مورد مقایسه قرار گرفت.

در فصل ۵، به نتیجه گیری و ارائه پیشنهادات برای ادامه پژوهش‌ها پرداخته شد. در نهایت مراجع مورد استفاده در این پژوهش معرفی شده است.

روند نمای کلی تحقیقات این پژوهش در شکل ۱-۱ ارائه شده است.



شکل ۱-۱ روند نمای کلی تحقیقات

فصل ۲ : سوابق مطالعاتی

۲-۱ مقدمه

در سال‌های گذشته، تحقیقات گسترده‌ای پیرامون تیرهای بتنی مسلح به میلگرد FRP صورت گرفته است. نتایج این تحقیقات نشان از شکست ترد این نوع تیرها دارد. بنابراین محققین زیادی در پی یافتن راه حل مناسب به منظور افزایش شکل پذیری، اقدام به تحقیقات گسترده کردند. در پژوهش پیش‌رو، به منظور بهبود شکل پذیری دو راهکار ارائه شده است. راهکار اول اصلاح طرح اختلاط بتن فشاری و استفاده از بتن‌های اصلاح شده با پلیمر است. این راهکار با هدف ایجاد اصلاحات در منحنی تنش-کرنش بتن فشاری صورت گرفت که در نتیجه آن شکل پذیری تیرهای بتنی مسلح به میلگرد FRP نیز بهبود یابد. راهکار دوم ایجاد محصور شدگی در ناحیه فشاری تیر بتنی مسلح به میلگرد FRP است. این روش با هدف تغییر رفتار تنش-کرنش بتن معمولی و تبدیل آن به بتن محصور شده پیشنهاد شده است. بتن محصور شده به دلیل ممانعت از انبساط عرضی ناشی از فشار، می‌تواند در بهبود رفتار خمشی تیر و در نتیجه افزایش شکل پذیری موثر واقع شود. بنابراین در مرحله نخست پژوهش، مطالعات مرتبط با موضوع مورد بررسی قرار گرفت. این مطالعات در سه گروه طبقه بندی شدند.

گروه اول: بررسی کلیات آیین نامه پیرامون مصالح مصرفی

گروه دوم: بررسی محصور شدگی در اعضای بتنی فشاری و تاثیر آن بر شکل پذیری

گروه سوم: بررسی رفتار تیرهای بتنی مسلح به میلگرد FRP

گروه چهارم: بررسی پژوهش‌های انجام شده پیرامون تیرهای بتنی مسلح به میلگرد FRP با ایده‌های بهبود شکل پذیری

۲-۲ کلیات پیرامون مصالح مصرفی

در این بخش به نکاتی پیرامون میلگردهای FRP، بتن و رفتار محصور شده آن از دیدگاه آیین نامه پرداخته شده است.

۲-۲-۱ مشخصات مکانیکی FRP ها

FRP ها مجموعه ای از الیاف می‌باشند که توسط رزین‌های مخصوص، به صورت یکپارچه مورد استفاده قرار می‌گیرند. FRP ها بر اساس محل کاربرد و زمان اعمال رزین، به دو دسته میلگردهای FRP و الیاف FRP طبقه

بندی شده و با توجه به جنس الیاف، در انواع متفاوت ^۱GFRP، ^۲CFRP، ^۳AFRP و ^۴BFRP تولید می‌شوند [4].

میلگردهای FRP با توجه به جنس الیاف سازنده، مشخصات رفتاری متفاوتی از خود نشان می‌دهند. اما رفتاری که در همه‌ی FRP ها مشترک است، منحنی تنش کرنش کاملاً الاستیک و فاقد جاری شدگی این میلگرد در کشش است. جدول ۱-۲ و شکل ۱-۲ مقایسه رفتار کششی میلگردها را نشان می‌دهد.

جدول ۱-۲ مشخصات رفتاری میلگرد های کششی [4]

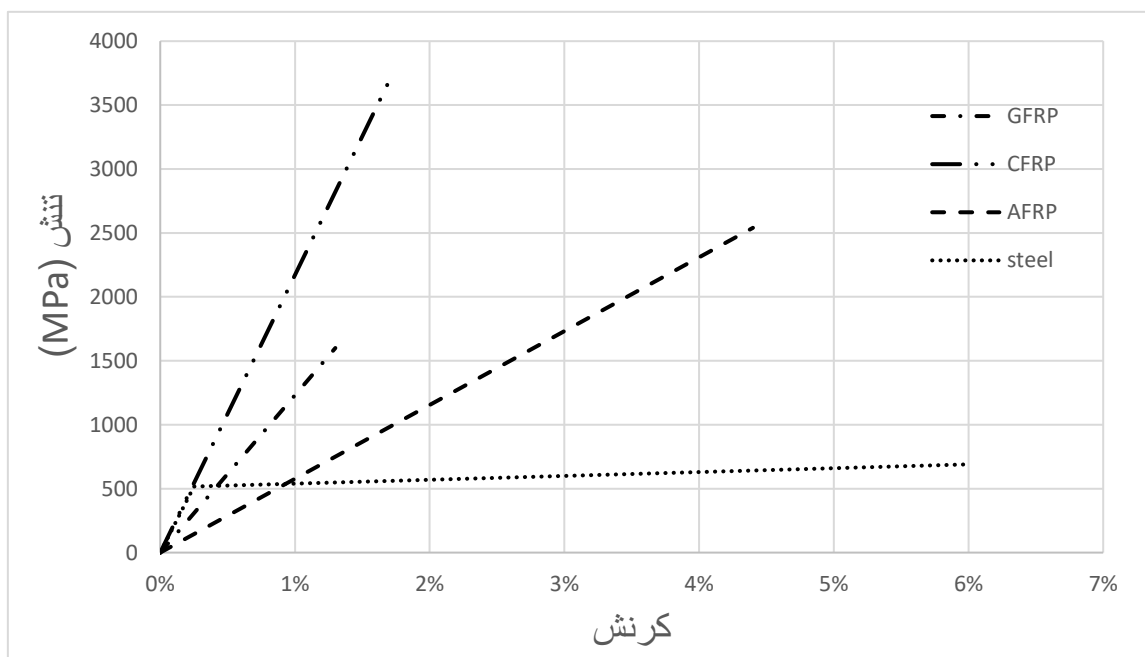
AFRP	CFRP	GFRP	فولاد	
ندارد	ندارد	ندارد	۵۱۷ تا ۲۷۶	تنش اسمی جاری شدن (MPa)
۲۵۴۰ تا ۱۷۲۰	۳۶۹۰ تا ۶۰۰	۱۶۰۰ تا ۴۸۳	۶۹۰ تا ۴۸۳	مقاومت کششی (MPa)
۱۲۵ تا ۴۱	۵۸۰ تا ۱۲۰	۵۱ تا ۳۵	۲۰۰	مدول الاستیسیته $\times 10^3$ (GPa)
ندارد	ندارد	ندارد	۰.۲۵ تا ۰.۱۴	کرنش جاری شدن %
۴.۴ تا ۱.۹	۱.۷ تا ۰.۵	۱.۳ تا ۱.۲	۱۲ تا ۶	کرنش گسیختگی %

¹ Glass Fiber Reinforced Polymer

² Carbon Fiber Reinforced Polymer

³ Aramid Fiber Reinforced Polymer

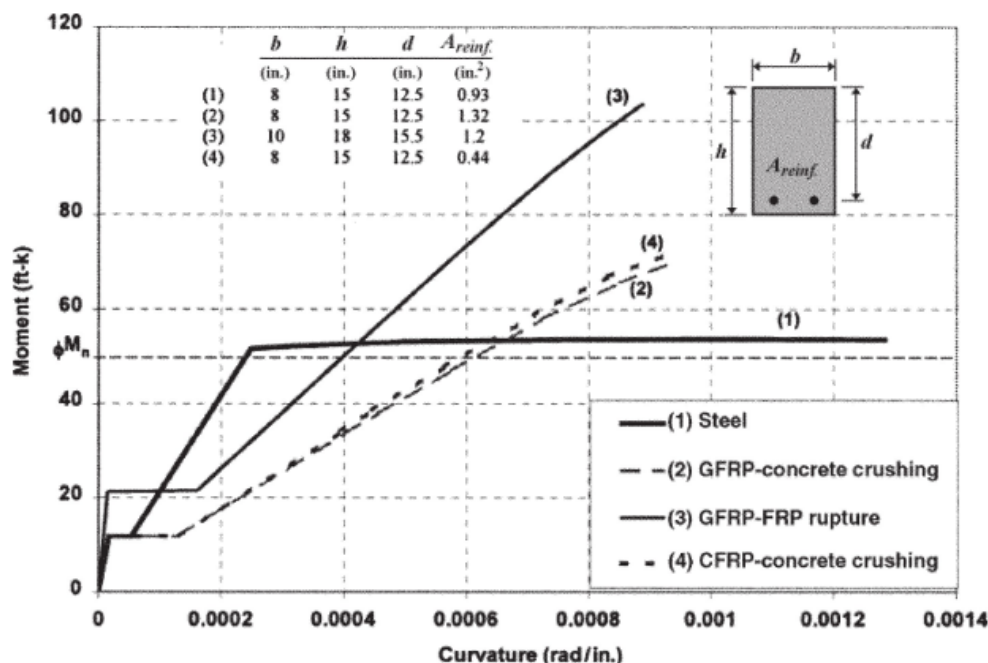
⁴ Basalt Fiber Reinforced Polymer



شکل ۲-۱ مقایسه منحنی تنش-کرنش میلگرد های فولادی، GFRP، CFRP و AFRP [4]

میلگردهای FRP نیز مانند دیگر مصالح دارای مزایا و معایبی هستند. مهم‌ترین مزیت استفاده از این میلگردها می‌توان به مقاومت کششی بالا، وزن کم و مقاومت مقابل خوردگی در شرایط محیطی اشاره کرد. از طرف دیگر این میلگردها فاقد ناحیه تسلیم بوده و شکستی ترد دارند. همچنین به دلیل آنکه این نوع میلگرد انعطاف پذیر نمی‌باشد، امکان خم کردن آن‌ها تنها توسط کارخانه تولید کننده میسر است.

این نوع میلگردها در اعضای سازه ای نیازمند رعایت رواداری‌ها و فراهم کردن شکل پذیری مطلوب می‌باشد. در شکل ۲-۲ آیین نامه ACI440.1R مقایسه ای بین نمودارهای ممان-انحنای تیرهای بتنی مسلح به میلگرد فولادی و تیرهای بتنی مسلح به میلگرد FRP با شکست خمشی در ناحیه فشاری و کششی انجام داده است [4].



شکل ۲-۲ مقایسه منحنی ممان انحنا تیر های بتنی مسلح به میلگرد فولادی و FRP [4]

از طرف دیگر به دلیل مقاومت کم و ضعف میلگردهای FRP در برش و فشار، آیین نامه ها استفاده از این نوع میلگرد را در ناحیه فشاری توصیه نمی کند. بنابراین در صورت نیاز به استفاده از این میلگرد در ناحیه فشاری، در هنگام طراحی باید از مقاومت فشاری میلگردهای FRP صرف نظر شود.

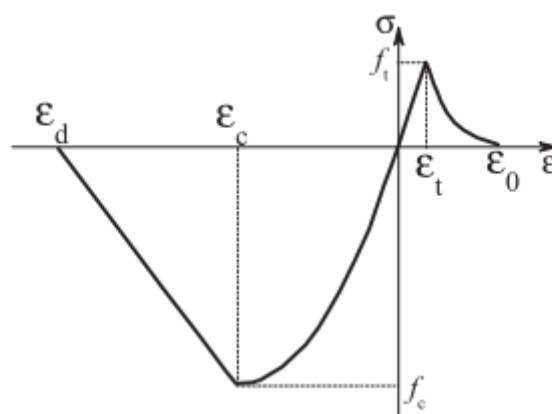
اگر چه آیین نامه ACI 440.1R-15 طراحی در دو مود شکست خمشی یعنی مود شکست در میلگرد کششی FRP و شکست در بتن فشاری را در تیرهای بتنی مسلح به میلگردهای FRP مجاز دانسته، اما همچنان بتن و میلگرد FRP دارای شکست ترد هستند. [4].

الیاف FRP علاوه بر میلگرد، بصورت پارچه ای منعطف و رزین نشده نیز عرضه می گردد. این الیاف عمدتاً در سطوح خارجی و بعد از گیرش بتن با هدف بهسازی، ترمیم و محصورشدگی به عضو بتنی توسط رزین متصل می شوند.

۲-۲-۲ بتن

بتن از ترکیب مصالح ساده ای شامل سنگدانه، سیمان و آب ساخته می شود. بتن را می توان به دلیل سهولت ساخت، دسترسی آسان به مصالح تشکیل دهنده، مقاومت فشاری بالا و قابلیت تولید در اشکال مختلف مهم ترین و پرکاربرد ترین مصالح مورد استفاده در صنایع عمرانی به شمار آورد. از مهم ترین مزایای این ترکیب پر کاربرد،

امکان تولید آن در مقاومت‌های فشاری متفاوت می‌باشد که در کاربرد سازه ای از مقاومت فشاری ۲۵ مگاپاسکال به بالا تولید می‌شود. این ترکیب نیز دارای ویژگی‌های نامطلوبی نظیر شکست ترد و مقاومت کششی پایین (حدود ۱۰ تا ۱۵ درصد مقاومت فشاری) است. در شکل ۲-۳ نمودار تنش-کرنش بتن در کشش و فشار به نمایش گذاشته شده است.

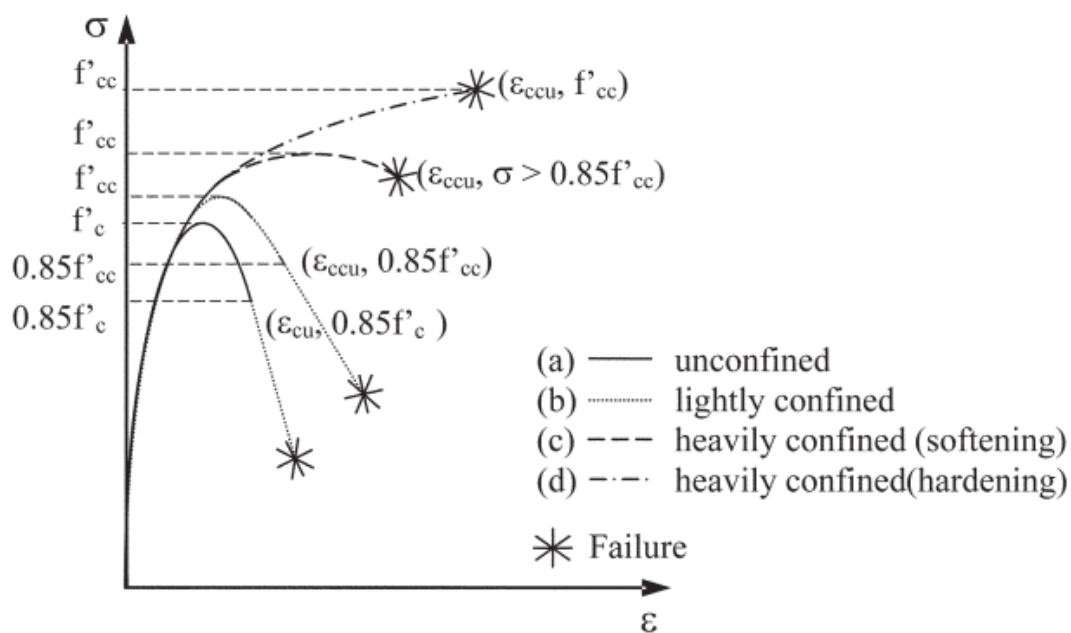


شکل ۲-۳ منحنی تنش-کرنش بتن در کشش و فشار

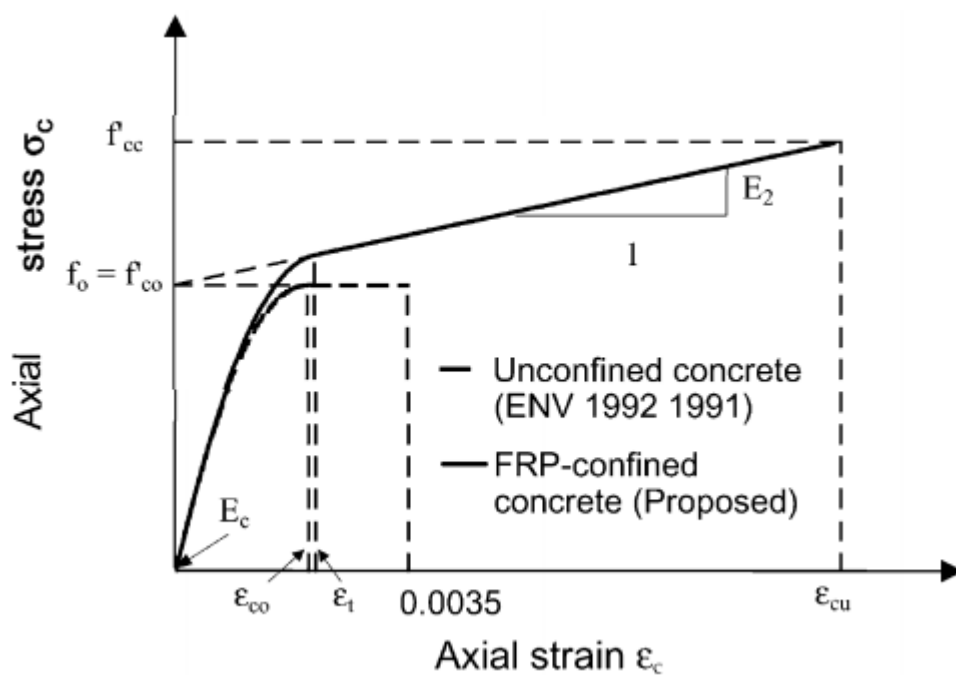
مقاومت کششی بسیار کم و عدم شکل پذیری بتن، باعث شد که میلگردهای فولادی به دلیل مقاومت کششی مناسب و شکل پذیری بالا، به مکملی عالی برای اعضای بتنی تبدیل شوند. از طرف دیگر، ایجاد ترک در ناحیه کششی بتن در بارگذاری‌های اندک، سبب می‌شود تا میلگردهای فولادی در محیط‌های خورنده دچار خوردگی شوند.

۲-۲-۳ محصور شدگی بتن

همانطور که از نام محصورشدگی هویداست، به هرگونه اقدامی که مانع تغییر شکل‌های عرضی در بتن شود، محصور شدگی گفته می‌شود. محصور شدگی بتن فشاری با ایجاد ممانعت از انبساط‌های عرضی ناشی از نیروی فشاری، مقاومت فشاری و کرنش نهایی بتن را افزایش می‌دهد. رفتار بتن فشاری محصور شده، به میزان محصورشدگی وابستگی بالایی دارد. همانطور که در شکل ۲-۴ قابل مشاهده است، هرچه محصورشدگی بیشتر باشد، کرنش نهایی و مقاومت فشاری ستون بتنی مسلح نیز بیشتر می‌شود [5]. همچنین نمودار شماتیک تنش-کرنش بتن محصور شده و محصور نشده که توسط لیام و همکاران پیشنهاد شد، بیانگر تاثیر بالای شکل پذیری بر رفتار بتن فشاری است [6].



شکل ۲-۴ تاثیر محصور شدگی بر ستون بتنی مسلح [5]

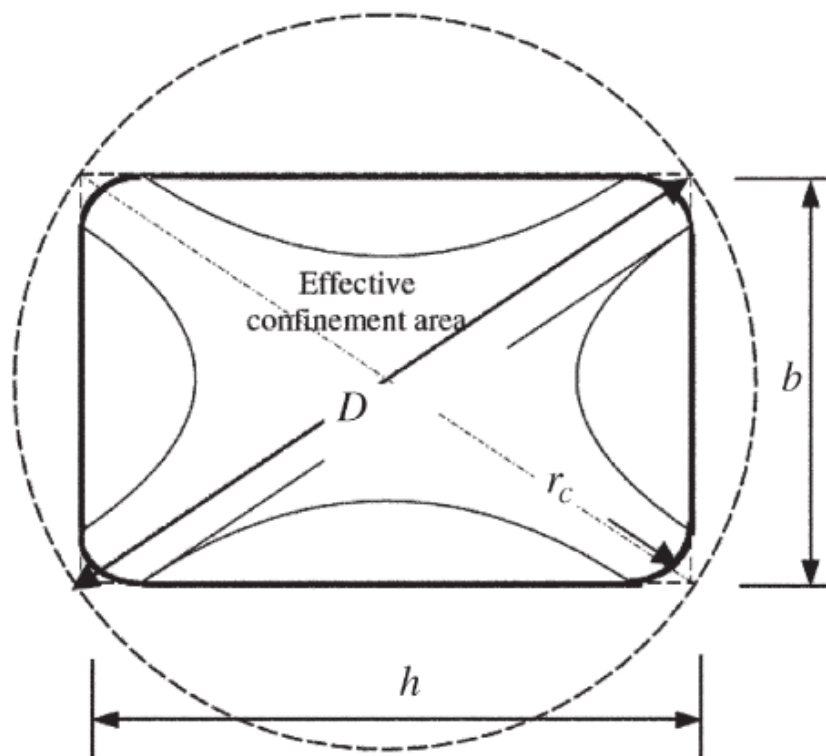


شکل ۲-۵ تاثیر محصور شدگی بر منحنی تنش-کرنش بتن فشاری [6]

محصور شوندگی را می‌توان توسط الیاف FRP، میلگردهای فولادی و حتی پوشش‌های فولادی پیرامون بتن تامین نمود. از طرف دیگر، علاوه بر نوع و مقدار محصور شوندگی، شکل مقطع محصور شده نیز بر رفتار بتن تاثیر مستقیم دارد. در صورتیکه مقطع بتنی غیر دایروی باشد، ناحیه ای که بعنوان محصور شده در نظر گرفته

می‌شود تنها بخشی از سطح مقطع را تشکیل می‌دهد و این در حالی است که اگر نسبت طول به عرض مقطع بیشتر از ۲ باشد، عملاً محصور شدگی رخ نمی‌دهد [5].

شکل ۲-۶ ناحیه محصور شده در مقطع غیر دایروی را نشان می‌دهد.



شکل ۲-۶ ناحیه محصور شده در مقاطع غیر دایروی [5]

۳-۲ بررسی محصور شدگی در اعضای بتنی فشاری و تاثیر آن بر

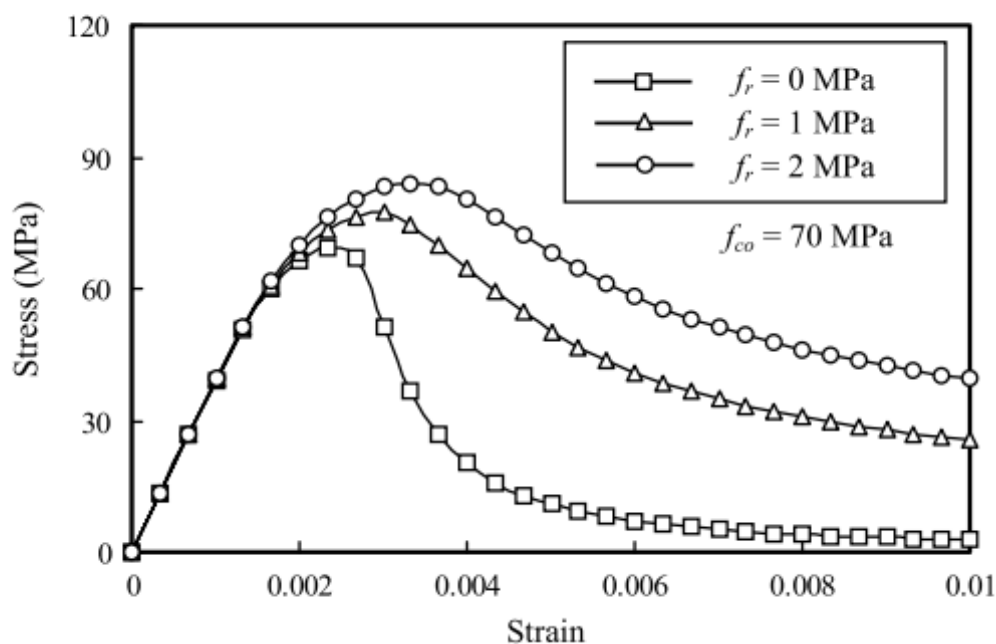
شکل پذیری

در این بخش به بررسی پژوهش‌هایی پیرامون تاثیر محصور شدگی بر بتن فشاری پرداخته شده است. نتایج حاصل از بررسی این تحقیقات حاکی از بهبود عملکرد ستون بتنی محصور شده در فشار و افزایش کرنش و شکل پذیری می‌باشد.

۲-۳-۱ تاثیر افزودن محصورشدگی در بهبود شکل پذیری ستون های بتنی

با مقاومت بالا

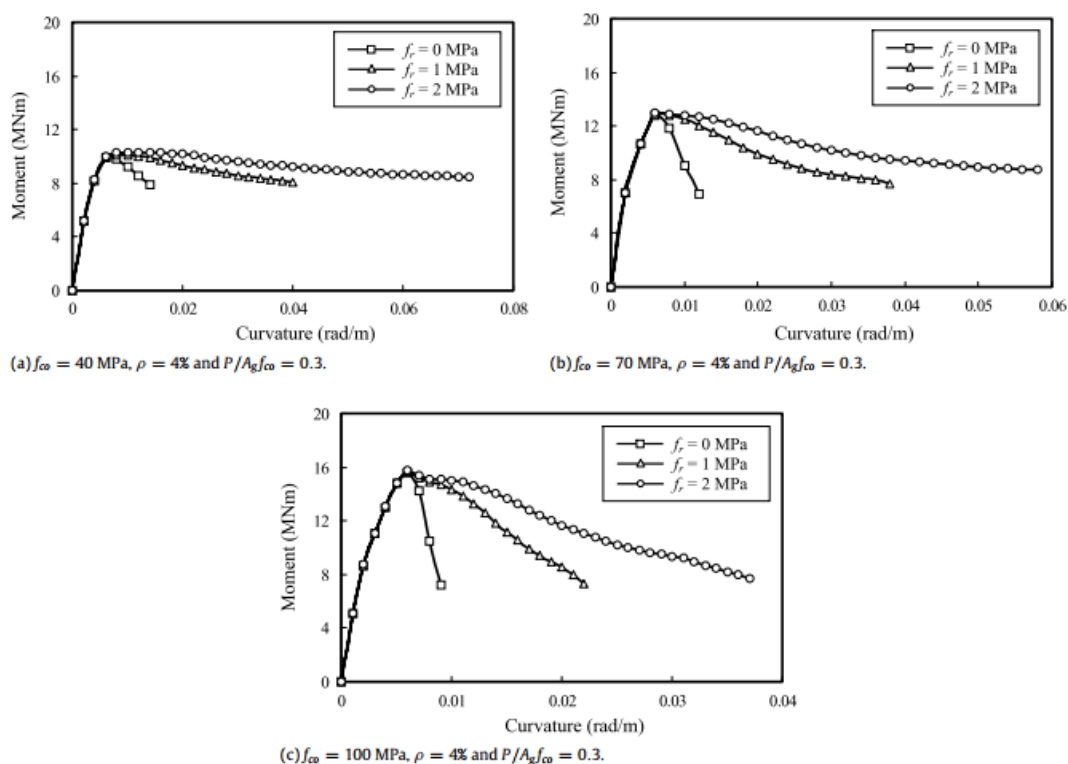
استفاده از بتن با مقاومت بالا (HSC^1) در سازه های بلند، مقطع ستون های به کار رفته در آن ها را کاهش داده و فضای کمتری را اشغال می کند. با این حال، استفاده از بتن با مقاومت بالا، شکل پذیری ستون را کاهش می دهد. در سال ۲۰۱۰ توسط هو و همکاران تحلیلی انجام شد تا تاثیر افزودن محصور شدگی بر ستون های با مقاومت بالا را با احتساب مسیر تنش میلگردهای فولادی در تحلیل ممان-انحنا غیر خطی بررسی شود. نتایج مطالعات آن ها نشان داد محصور شدگی در تیرها نسبت به ستون ها تاثیر بیشتری در شکل پذیری دارند. از طرف دیگر با افزایش مقاومت بتن، محصور شدگی بیشتری نیاز است تا شکل پذیری مورد نیاز تامین شود. بعبارت دیگر، هرچه مقاومت بتن افزایش یابد، به سطح بیشتری از محصور شدگی نیاز است تا به شکل پذیری یکسان برسد. شکل ۲-۷ منحنی تنش-کرنش بتن را با فشار محصور شدگی متفاوت نشان می دهد [7].



شکل ۲-۷ منحنی تنش-کرنش بتن با فشار های محصورشدگی متفاوت [7]

¹ High Strength Concrete

هو و همکاران دریافتند که هرچه فشار محصور شدگی بیشتر باشد، درصد میلگرد بالانس و بار محوری بالانس نیز افزایش داده که این موضوع شکل پذیری ستون‌های محصور شده را به طور چشم‌گیری افزایش می‌دهد. همچنین از تحلیل‌های صورت گرفته، نتیجه گرفتند که با افزایش مقاومت بتن یا افزایش سطح بار، اثر محصور شدگی در شکل‌پذیری کاهش می‌یابد. بنابراین برای آنکه شکل پذیری بتن با مقاومت بالا (HSC) به شکل پذیری بتن با مقاومت معمولی برسد، به محصور شدگی بسیار بیشتری نیاز دارد. شکل ۸-۲ تاثیر محصور شدگی با فشار محصور شدگی متفاوت را در ستون‌های بتنی با مقاومت‌های متفاوت نشان می‌دهد [7].



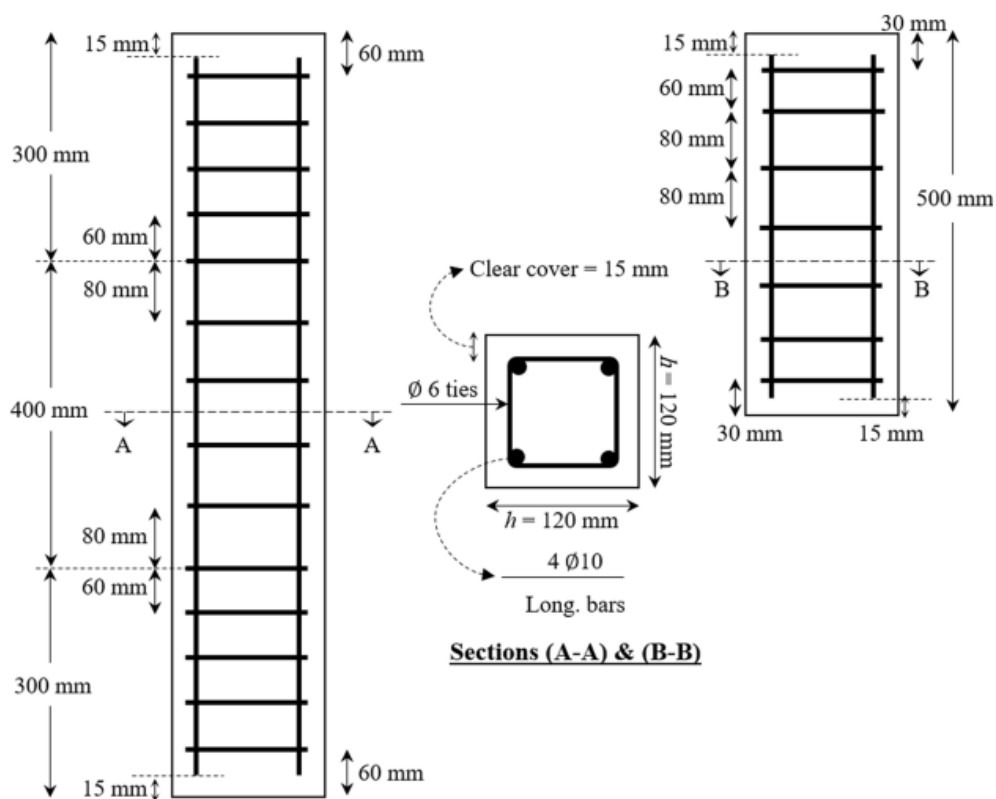
شکل ۸-۲ تاثیر شکل پذیری در ستون‌های بتنی با مقاومت‌های متفاوت و در فشارهای محصور شدگی متفاوت [7]

۲-۳-۲ رفتار فشاری ستون های بتنی مسلح به میلگرد و الیاف فولادی

محصور شده توسط الیاف CFRP تحت بار خارج از مرکز

در سال ۲۰۲۱ نعمت زاده و همکاران تحقیقات گسترده ای بر روی نمونه های بتن فشاری تحت بار برون محور انجام دادند. آن ها ۱۸ نمونه ستون بتنی مسلح به میلگرد فولادی را با محصورشدگی توسط الیاف CFRP و استفاده از بتن مسلح به الیاف فولادی به جای به کار بردن بتن معمولی مورد آزمایش قرار دادند [8].

ستون های بتنی دارای مقطع مربعی به ابعاد 120×120 میلیمتر و در دو طول ۱۰۰۰ و ۵۰۰ میلیمتر ساخته شد. چهار عدد میلگرد فولادی به قطر ۱۰ میلیمتر با پوشش بتنی ۱۵ میلیمتر در گوشه های مقطع به عنوان میلگردهای طولی قرار داده شد. همچنین از خاموت هایی به فاصله ۸۰ میلیمتر در ناحیه میانی و ۶۰ میلیمتر در نواحی انتهایی استفاده گردید. شکل ۲-۹ تصویر شماتیک نمونه ها و میلگردهای درون آن را نشان می دهد [8].

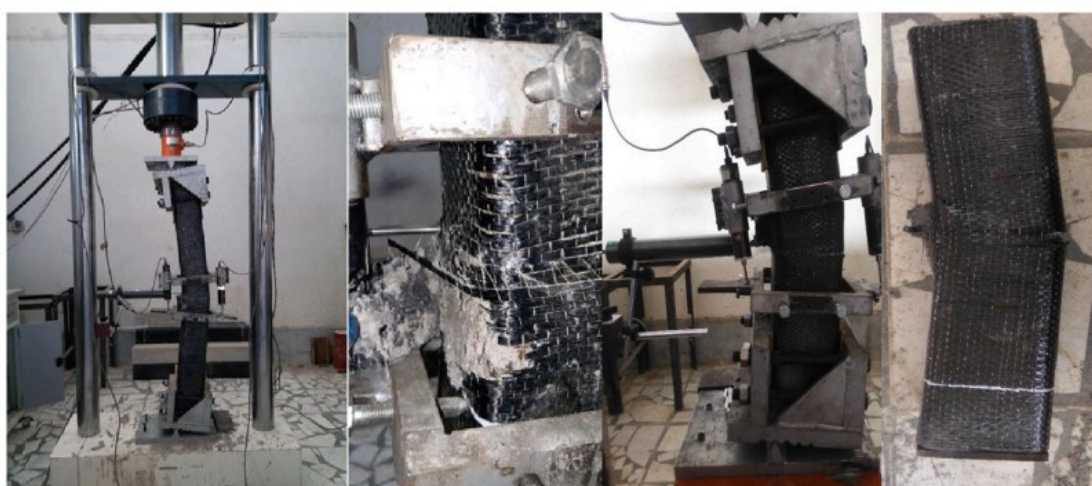


شکل ۲-۹ تصویر شماتیک نمونه های ساخته شده توسط نعمت زاده و همکاران [8]

تعداد ۱۸ نمونه ساخته شده به منظور بررسی اثر محصورشدگی، نوع بتن (بتن معمولی و بتن مسلح به الیاف فولادی^۱، برون محوریت بارگذاری و نسبت طول به عرض نمونه‌ها، در ۵ گروه طبقه بندی و مورد آزمایش قرار گرفت [8].

در نام گذاری نمونه ها P به معنی بتن معمولی و S نشان دهنده بتن SFRC، UW و FW به ترتیب بیانگر محصور نشده و کامل محصور شده و e نشان دهنده برون محوریت بارگذاری می‌باشد.

آزمایشات نشان داد محصور شدگی در ستون‌های بتنی مسلح، بروز ترک‌های خمشی را به تاخیر انداخته و شکست همزمان با پاره شدن ورق های CFRP در میانه ستون رخ داد. شکل ۲-۱۰ مود شکست دو نمونه کوتاه و بلند محصور شده را نشان می‌دهد [8].



(a)

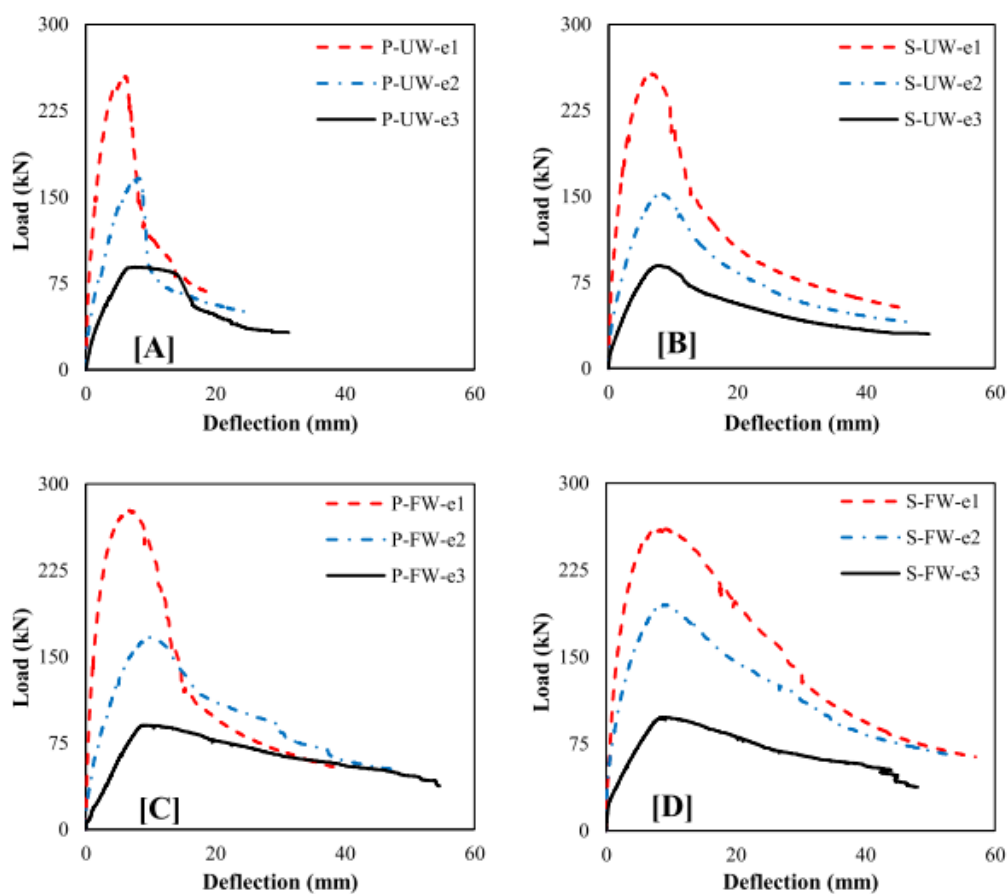
(b)

شکل ۲-۱۰ مود شکست (a) ستون با طول ۱۰۰۰ میلیمتر (b) ستون با طول ۵۰۰ میلیمتر [8]

از بررسی نمودارهای بار-تغییر مکان جانبی که در شکل ۲-۱۱ نشان داده شده است، مشاهده شد که ستون‌های با بتن معمولی و محصور نشده (گروه A) رفتار ترد داشتند. از طرف دیگر، ستون‌هایی که از بتن مسلح به الیاف فولادی ساخته شده بودند بیشترین تغییر مکان و بهترین شکل پذیری را نشان دادند. با این حال، وجود الیاف فولادی در بتن تاثیر چندانی در مقاومت ستون‌ها نداشت. بعلاوه، در مقایسه بین نمونه‌های محصور نشده (گروه های A و B) با ستون‌های محصور شده (گروه های C و D) نشان داد که محصور شدگی با الیاف CFRP مقاومت و شکل پذیری را افزایش می‌دهد [8].

¹ Steel Fiber-Reinforced Concrete (SFRC)

از بررسی نمودار بار-تغییر مکان جانبی ستون‌های کوتاه (گروه E) مشاهده گردید که برون محوری به طور چشم گیری مقاومت را کاهش می‌دهد. بعلاوه، محصور شدگی اندکی مقاومت و شکل پذیری را بهبود داد [8]. نتیجه ی حاصل شده از مقایسه بین ستون‌های بلند و کوتاه، افزایش ظرفیت بار نهایی و کاهش شکل پذیری در اثر کاهش ارتفاع ستون را نشان می‌دهد [8].



شکل ۲-۱۱ نمودار بار-تغییر مکان جانبی ستون های بلند [8]

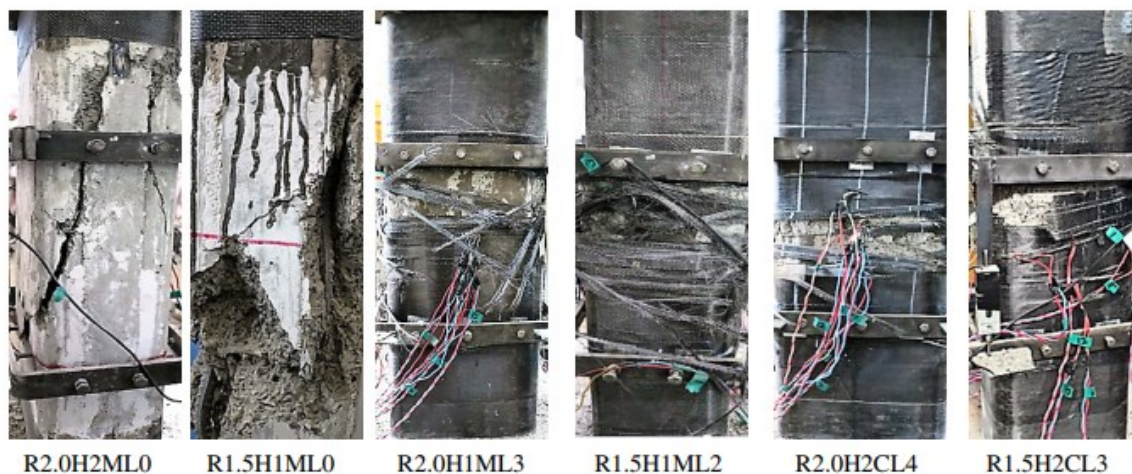
۲-۳-۳ رفتار فشاری ستون های بتنی مسلح با مقطع مستطیلی محصور

شده توسط CFRP تحت بار یکنواخت و چرخه ای

اکثر مطالعات انجام شده به منظور بررسی رفتار فشاری بتن محصور شده، بر روی ستون های مستطیلی کوچک بدون میلگرد انجام گرفته است. در سال ۲۰۱۸ ایسلیم و همکاران مطالعات خود را به منظور بررسی اثر نسبت ابعاد مقطع ستون، تعداد لایه های CFRP محصور کننده، نسبت حجمی میلگرد فولادی و ذات بارگذاری (یکنواخت و چرخه ای) انجام دادند. بنابراین آن ها ۲۸ عدد ستون به ارتفاع ۱۰۰۰ میلیمتر در دو گروه با نسبت ابعاد مقطع ۱.۵ و ۲ ساخته و مورد آزمایش قرار دادند.

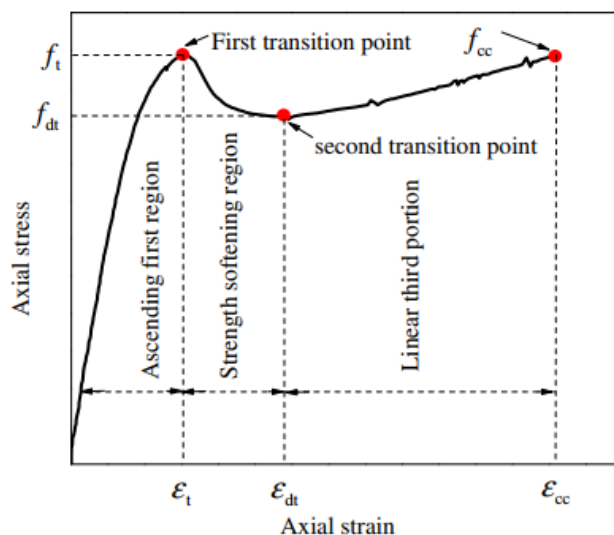
در نام گذاری نمونه ها، عدد بعد از R نسبت ابعاد مقطع را نشان می دهد که ۱.۵ و ۲ می باشند. عدد بعد از H نسبت حجمی فولاد نمونه را نشان می دهد؛ عدد ۰ نشان دهنده فقدان آرماتور و اعداد ۱ و ۲ به ترتیب بیانگر نسبت های حجمی ۰.۳۳ و ۰.۶۷ درصد می باشد. نوع بار گذاری (یکنواخت و چرخه ای) به ترتیب با عناوین M و C نمایش داده شده است. در نهایت L و عدد بعد از آن تعداد لایه های محصور کننده CFRP را نشان می دهد [9].

مود شکست نمونه های محصور نشده، در ابتدا با ترک های مورب آغاز شد و سپس با رسیدن به بار نهایی، پوشش بتنی تخریب گردید و میلگردهای طولی دچار کمانش شد. از طرف دیگر، در نمونه های محصور شده، از کمانش میلگردهای طولی توسط پوشش CFRP جلوگیری شده تا اینکه این پوشش از گوشه های عضو پاره شدند. شکل ۲-۱۲ مود شکست چند نمونه را نشان می دهد [9].



شکل ۲-۱۲ مود شکست چند نمونه [9]

نتایج تحقیقات نشان داد محصور شدگی توسط الیاف CFRP کرنش را به طور چشم گیری افزایش داد در حالیکه مقاومت افزایش ناچیزی داشت. بعلاوه نمودار تنش-کرنش حاصل از تست های بارگذاری یکنواخت، رفتار نرم شوندگی در شاخه دوم نمودار داشته و در شاخه سوم نمودار، روند صاف و یا افزایشی داشت که بستگی به میزان محصورشدگی دارد. شکل ۲-۱۳ نمودار تنش-کرنش نمونه های محصور شده تحت بار گذاری یکنواخت را نشان می دهد [9].

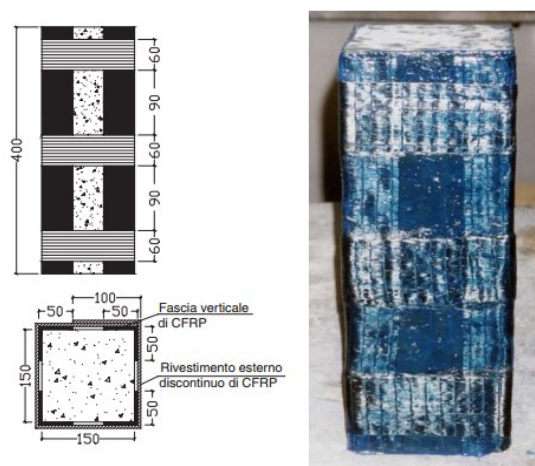


شکل ۲-۱۳ منحنی تنش-کرنش نمونه های محصور شده در بارگذاری یکنواخت [9]

۲-۳-۴ اثر محصور شونده‌گی FRP بر رفتار فشاری منشورهای مستطیلی

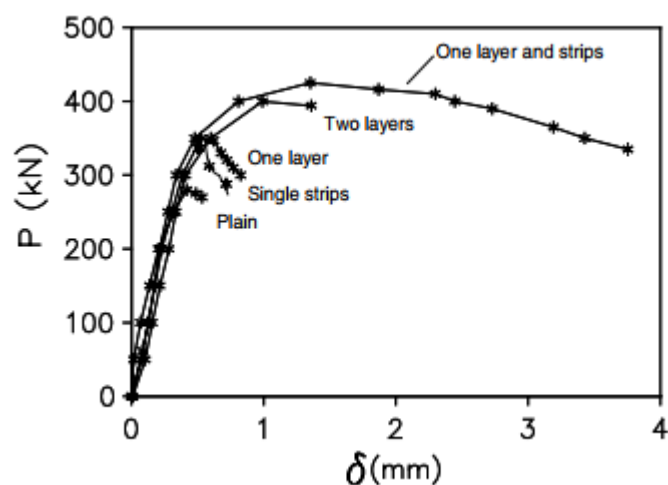
بتنی

در سال ۲۰۰۶ پژوهشی توسط کامپیونه بر روی ۲۲ نمونه منشورهای مربعی به بعد ۱۵۰ mm و طولهای ۱۵۰، ۳۰۰ و ۴۵۰ mm محصور شده توسط CFRP صورت گرفت. تحقیقات بر روی محصور شدگی با نوارهای منقطع افقی و عمودی، وجود نوارها در گوشه‌ها، تعداد لایه‌ها و طول نمونه انجام شد. شکل ۲-۱۴ یک نمونه محصور شده توسط نوارهای عمودی و افقی را نشان می‌دهد [10].



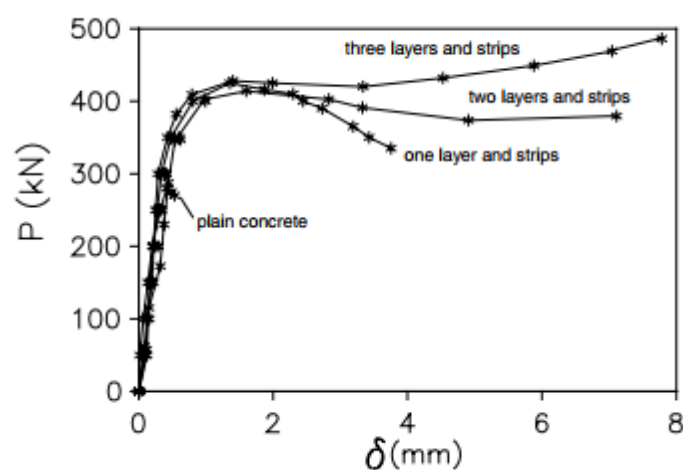
شکل ۲-۱۴ چیدمان CFRP همراه با نوار عمودی و افقی [10]

نتایج نشان داد یک لایه محصور شدگی ظرفیت باربری را تا ۲۷٪ و دو لایه محصور شدگی ظرفیت باربری را تا ۴۲٪ افزایش دهد. همچنین نمونه‌هایی که کنج‌ها توسط ورق CFRP مسلح شده و سپس یک لایه محصور شدگی داشتند رفتاری نزدیک به نمونه‌های دارای دو لایه محصور شدگی از خود نشان دادند. شکل ۲-۱۵ منحنی بار-کوچک شدگی نمونه محصور شده ۱۵۰×۱۵۰×۴۵۰ mm را نشان می‌دهد [10].



شکل ۲-۱۵ منحنی بار-کوچک شدگی نمونه های $150 \times 150 \times 450$ mm [10]

همچنین، نتایج نشان داد هرچه تعداد لایه‌های محصور کننده بیشتر باشد، نمونه شکل پذیری بیشتری از خود نشان می‌دهد. شکل ۲-۱۶ منحنی بار-کوچک شدگی نمونه‌های $150 \times 150 \times 450$ mm را بر اساس تعداد لایه‌های محصور کننده نشان می‌دهد [10].



شکل ۲-۱۶ منحنی بار-کوچک شدگی نمونه های $150 \times 150 \times 450$ mm محصور شده توسط چند لایه [10]

همچنین مشاهده گردید هرچه طول نمونه بیشتر باشد، مقاومت کاهش یافته و شکست ترد تری حاصل می‌گردد [10].

۴-۲ بررسی رفتار تیر های بتنی مسلح به میلگرد FRP

۴-۲-۱ بررسی آزمایشگاهی تیر های بتنی مسلح به میلگرد های دوگانه

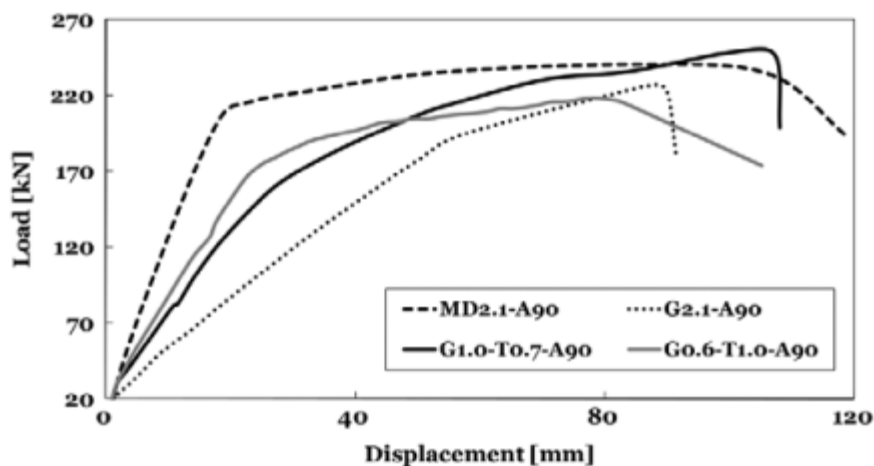
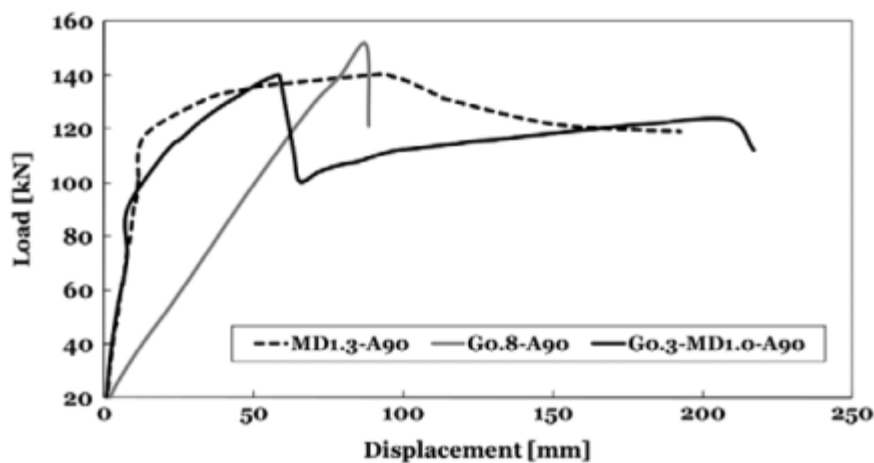
FRP

امروزه میلگردهای FRP به یک جایگزین کاربردی برای میلگردهای فولادی تبدیل شده اند اما رفتار ترد آنها شکل پذیری عضو را کاهش می دهد. از این رو در سال ۲۰۱۰ لو و پم به منظور افزایش شکل پذیری و همچنین استفاده از مقاومت بالای میلگردهای FRP پیشنهاد کردند از عضو بتنی مسلح به میلگردهای دوگانه FRP و فولادی استفاده شود [11].

آنها دوازده نمونه تیر بتنی شامل تیر بتنی ساده، تیر بتنی مسلح به میلگرد فولادی (SRC)^۱، تیر بتنی مسلح به میلگرد GFRP (FRPRC) و تیر بتنی مسلح دوگانه در ابعاد ۳۸۰×۲۸۰ میلیمتر و طول دهانه ۴۲۰۰ میلیمتر ساخته و با آزمایش خمش ۳ نقطه رفتار این نمونه ها را بررسی کردند [11].

از ۱۲ نمونه ساخته شده، ۷ نمونه به منظور مقایسه شکل پذیری در نظر گرفته شده است. این ۷ نمونه بر اساس مقاومت نهایی تیر در دو گروه تقسیم بندی شده و منحنی بار-تغییر مکان وسط دهانه آنها در شکل ۴-۱۷ نشان داده شده است [11].

¹ Steel-Reinforced Concrete



شکل ۲-۱۷ منحنی بار-تغییر مکان وسط دهانه ۷ نمونه تیر ساخته شده به تفکیک مقاومت نهایی [11]

نتایج نشان داد استفاده از میلگردهای فولادی در کنار میلگردهای FRP نقش موثری در بهبود شکل پذیری تیر دارد و هرچه مقدار میلگرد فولادی بیشتر باشد، شکل پذیری بیشتری مشاهده می‌شود. آن‌ها بر اساس نتایج حاصل از آزمایشات دریافتند که مقدار میلگردهای FRP باید بیشتر از حداقل مقدار تعیین شده در آیین نامه ACI440.1R-06 باشد. از طرف دیگر مقدار میلگرد FRP باید بیشتر از میلگرد فولادی باشد که پس از تسلیم میلگرد های فولادی، تیر مقاومت داشته باشد. همچنین درصد آرماتور موثر باید بیشتر از درصد آرماتور بالانس FRP باشد [11].

۲-۴-۲ تحلیل و آزمایش رفتار خمشی تیر های بتنی مسلح به میلگرد

GFRP

میلگرد های GFRP به دلیل سختی کمتر نسبت به فولاد، عملکرد آنها باید برای شرایط نهایی و سرویس نظیر تاثیر بر تغییر مکان و عرض ترکها در نظر گرفته شود. از این رو آدام و همکاران در سال ۲۰۱۵، ۱۰ نمونه تیر با عرض ۱۲۰ mm، ارتفاع ۳۰۰ mm و طول ۲۸۰۰ mm ساخته و تحت آزمایش خمش ۴ نقطه قرار دادند. در این آزمایشات تغییر مکان وسط دهانه، عرض ترکها و کرنش میلگردهای GFRP ثبت و مقایسه شدند. سپس به روش تحلیل غیر خطی اجزای محدود (¹NLFEA) نمونه های آزمایش شده را بر اساس الگوی ترک و رفتار بار-تغییر مکان مدل سازی کردند [12].

تعداد ۱۰ نمونه تیر شامل یک نمونه تیر بتنی مسلح به میلگرد فولادی بعنوان تیر کنترل و ۹ نمونه تیر بتنی مسلح به میلگرد GFRP با درصد آرماتور بالانس، ۱.۷ برابر درصد آرماتور بالانس و ۲.۷ برابر درصد آرماتور بالانس و با مقاومت بتن فشاری ۲۵، ۴۵ و ۷۵ مگاپاسکال می باشد [12].

نتایج نشان داد هرچه مقاومت بتن فشاری بیشتر باشد، عرض ترکها کاهش می یابد به طوریکه افزایش مقاومت فشاری بتن از ۲۵ به ۴۵ مگاپاسکال، ۵۲٪ و افزایش مقاومت فشاری بتن از ۲۵ به ۷۰ مگاپاسکال تا ۸۰٪ عرض ترکها را کاهش داد. جدول ۲-۲ نتیجه آزمایش نمونه ها و مود شکست آنها را نشان می دهد [12].

جدول ۲-۲ نتیجه آزمایش ها و مود شکست نمونه ها

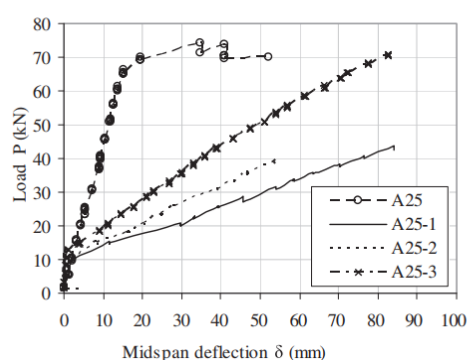
Series	Beam specimen	Reinforcement Ratio (μ) %	Initial cracking load, P_{ct} (kN)	Failure load, P_{exp} (kN)	Failure modes ^a	Maximum midspan deflection (mm)
A25	A25	0.92%	10.2	74.2	F.F	52
	A25-1	μb	10.2	45.9	G.R	84
	A25-2	1.7 μb	10.8	40.7	G.R	55 ^b
	A25-3	2.7 μb	10.9	75.2	C.C	90
A45	A45-1	μb	15.8	55.8	G.R	80
	A45-2	1.7 μb	15.4	81.9	C.C	85
	A45-3	2.7 μb	17.6	109.8	C.C	78
A70	A70-1	μb	16.3	84.6	G.R	88
	A70-2	1.7 μb	15.5	132.7	C.C	95
	A70-3	2.7 μb	19.9	145.1	C.C	92

^a C.C: concrete crushing, G.R: GFRP bars rupture, F.F: flexure failure due to steel yield.

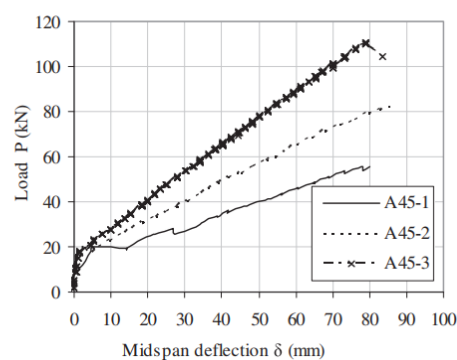
^b Sudden rupture of 12 mm diameter GFRP bar.

¹ non-linear finite element analysis

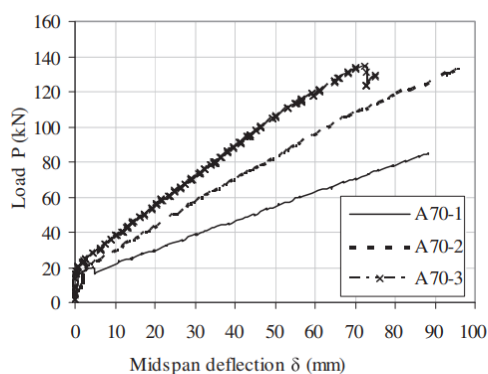
از طرف دیگر، نتایج نشان داد درصد آرماتور و مدول الاستیسیته میلگردهای GFRP مهم‌ترین پارامتر در تعیین تغییر مکان نمونه‌ها هستند. در نمونه‌های با ۲.۷ برابر درصد آرماتور بالانس، میلگرد GFRP دارند شکل پذیری اندکی مشاهده گردید. در شکل ۲-۱۸ منحنی بار-تغییر مکان وسط دهانه نمونه‌ها را به تفکیک مقاومت بتن فشاری مقایسه شده است [12].



(a) Series A₂₅



(b) Series A₄₅



(c) Series A₇₀

شکل ۲-۱۸ منحنی بار-تغییر مکان وسط دهانه نمونه‌ها [12]

۲-۵ تیرهای بتنی مسلح به میلگرد FRP با ایده‌های بهبود شکل

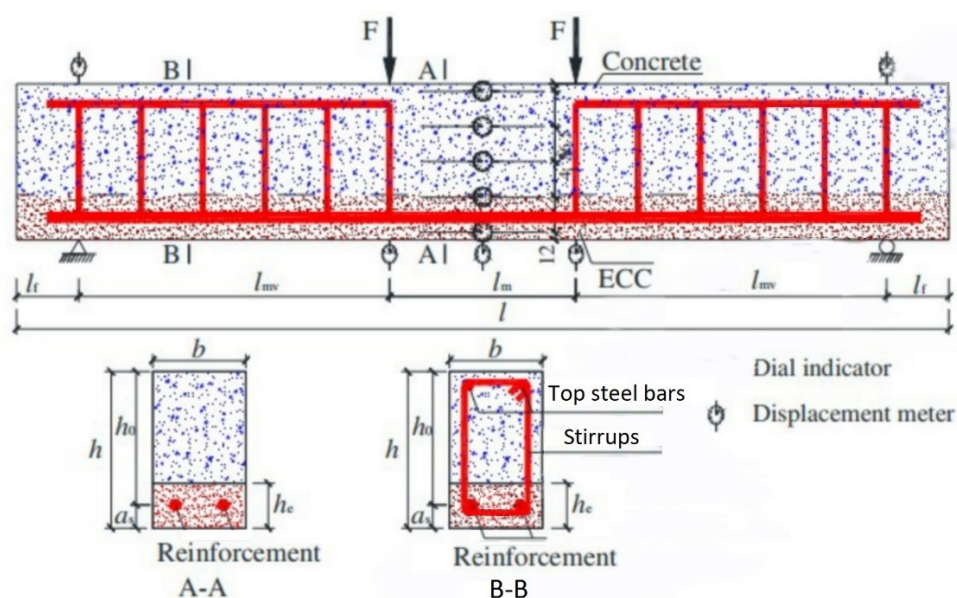
پذیری

۲-۵-۱ مطالعه آزمایشگاهی رفتار خمشی تیر های بتن-ECC مسلح به

میلگرد FRP

در سال ۲۰۱۸ پژوهشی بر روی ۱۵ نمونه تیر بتن-ECC^۱ توسط گی و همکاران به منظور بررسی مقدار و نوع آرماتور و ضخامت ECC انجام گرفت. نمونه‌های مورد آزمایش در ۴ گروه طبقه بندی شدند. سه گروه به ترتیب دارای میلگرد کششی FRP، فولادی و ترکیب میلگرد فولادی و FRP با ظرفیت کششی یکسان می‌باشند. گروه چهارم مقدار بیشتری از میلگرد کششی FRP دارد. در هر گروه ۴ نسبت جایگزینی ECC به بتن مورد بررسی قرار گرفت [13].

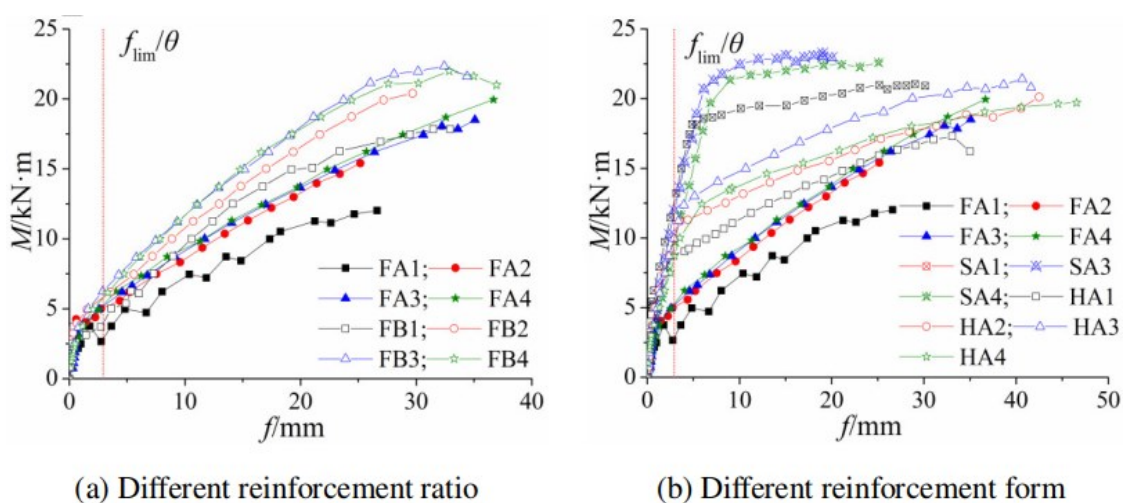
کلیه نمونه‌ها در عرض ۱۵۰ میلیمتر و ارتفاع ۲۰۰ میلیمتر با طول دهانه ۱۴۰۰ میلیمتر مطابق شکل ۲-۱۹ ساخته شد. در نام گذاری نمونه‌ها حرف اول نشان دهنده نوع آرماتور کششی است. حروف F، S و H به ترتیب بیانگر FRP، فولاد و ترکیب فولاد و FRP است. حرف دوم ظرفیت کششی میلگردها را نشان می‌دهد (A و B). عدد سوم نسبت جایگزینی ارتفاع ECC استفاده شده را نشان می‌دهد (اعداد ۱، ۲، ۳ و ۴ به ترتیب معادل r_h و برابر ۰، ۰.۲۹، ۰.۵۷ و ۱.۱۴ می‌باشد). شکل ۲-۱۹ تصویر شماتیک نمونه‌ها را نشان می‌دهد [13].



شکل ۲-۱۹ تصویر شماتیک نمونه‌ها [۱۳]

¹ Engineered Cementitious Composite

نتایج آزمایش‌ها نشان داد ظرفیت نهایی لنگر و کنترل عرض ترک با جایگزینی یک لایه ECC در ناحیه کششی بهبود می‌یابد. استفاده از لایه‌های ECC توانایی اجزای بتنی را در مقاومت مقابل ترک و تغییر مکان بهبود می‌بخشد. از طرف دیگر نتایج نشان داد در مود شکست کششی، لنگر نهایی، انحنای نهایی و جذب انرژی با افزایش مقاومت کششی، افزایش می‌یابد. در مود شکست فشاری، با افزایش مقاومت کششی، لنگر نهایی مقدار ناچیزی افزایش یافته درحالی‌که انحنای نهایی و جذب انرژی را کاهش می‌دهد. شکل ۲-۲۰ منحنی لنگر-تغییر مکان وسط دهانه نمونه‌ها را نشان می‌دهد [13].

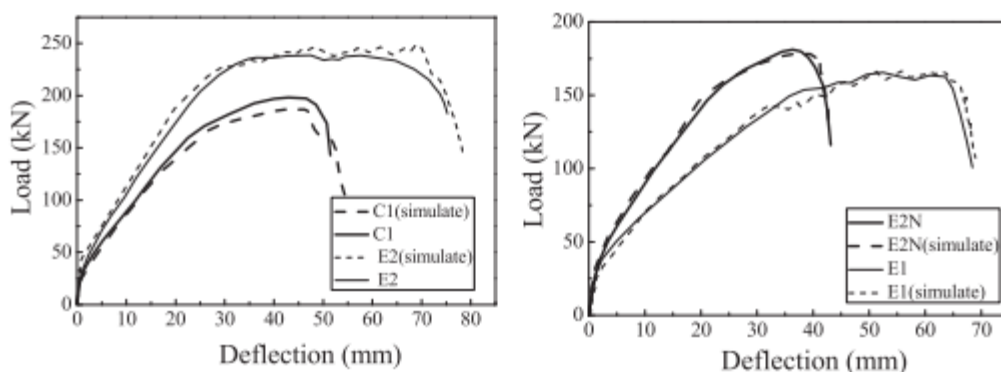


شکل ۲-۲۰ منحنی لنگر-تغییر مکان وسط دهانه [13]

۲-۵-۲ رفتار خمشی تیرهای بتنی و ECC مسلح به میلگرد های BFRP

از آنجا که در تیرهای بتنی مسلح به میلگرد FRP مود شکست بتن فشاری حاکم است، خصوصیات بتن نقش موثری در شکل پذیری دارد. در سال ۲۰۱۷ کای و همکاران با جایگزینی ECC به جای بتن، رفتار خمشی تیرهای ECC مسلح به میلگرد BFRP را به صورت عددی مورد بررسی قرار دادند [14].

در این پژوهش تعداد ۴ نمونه براساس پژوهش‌های آزمایشگاهی پیشین مدل سازی شد و نتیجه حاصل شده از مدل سازی شد و آزمایشگاهی با هم مطابقت خوبی داشت. شکل ۲-۲۱ نمودار بار-تغییر شکل هر ۴ نمونه آزمایشگاهی و مدل سازی شده را نشان می‌دهد [14].



شکل ۲-۲۱ مقایسه منحنی بار-تغییر مکان نمونه های آزمایشگاهی و مدل سازی شده [14]

پس از تایید مدل سازی، تعداد ۱۸ نمونه تیر مدل سازی شد. نتایج نشان داد در مقایسه با تیرهای بتنی، تیرهای ECC بیشتر از ظرفیت میلگردهای BFRP استفاده می کند و همچنین کنترل ترک بهتری دارند به طوری که بازشدگی ترکها در تیرهای ECC به کمتر از ۰.۰۵ میلیمتر محدود می شود درحالیکه در تیر بتنی ترک پیوسته بازتر شده و در نهایت از کنترل خارج می شود [14].

این مدل سازی که به منظور بررسی تاثیر پارامترهای مختلف شامل: مقاومت فشاری، کرنش کششی، مقاومت کششی ECC و درصد میلگرد طولی BFRP بود نشان داد که مقاومت نهایی تیر با افزایش تمام پارامترها به جز کرنش کششی ECC بالاتر از ۱.۵٪، افزایش یافت؛ شکل پذیری نهایی با افزایش مقاومت فشاری ECC و کرنش کششی ECC افزایش داشت، البته تنش نهایی کششی کمی در شکل پذیری موثر بود؛ افزایش درصد میلگرد طولی نیز می تواند باعث تغییر در مود شکست شود درحالیکه تغییر شکل نهایی با افزایش درصد میلگرد طولی برای تیر بیش از حد مسلح شده، کاهش می یابد [14].

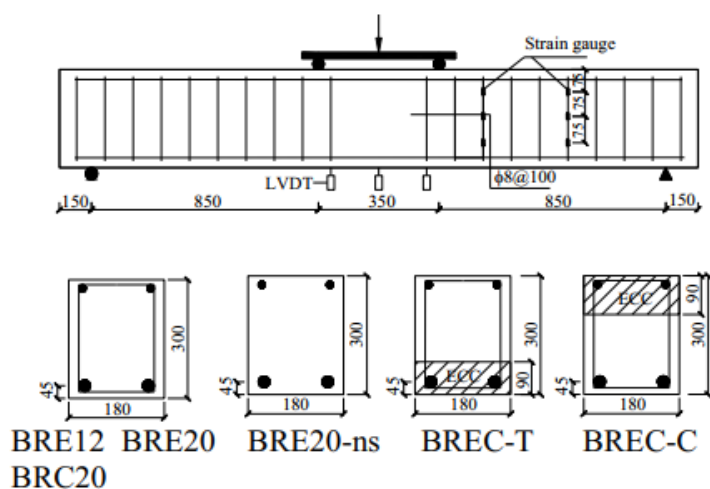
۲-۵-۳ مطالعه آزمایشگاهی بر رفتار خمشی تیر های ECC مسلح به

میلگرد FRP

استفاده از میلگرد FRP در سازه های بتنی به دلیل مقاومت کششی بالا، رفتار خستگی مناسب و خاصیت مقاومت در برابر خوردگی توجه زیادی را به خود جلب کرده است. از طرف دیگر ECC به دلیل وجود ناحیه سخت شدگی کرنشی، جایگزین مناسبی برای بتن است. در سال ۲۰۱۳ یوان و پم تعداد ۶ تیر ECC یا کامپوزیت بتن/ECC مسلح به FRP با میلگردهای طولی و عرضی متفاوت و ضخامت های ECC مختلف تحت

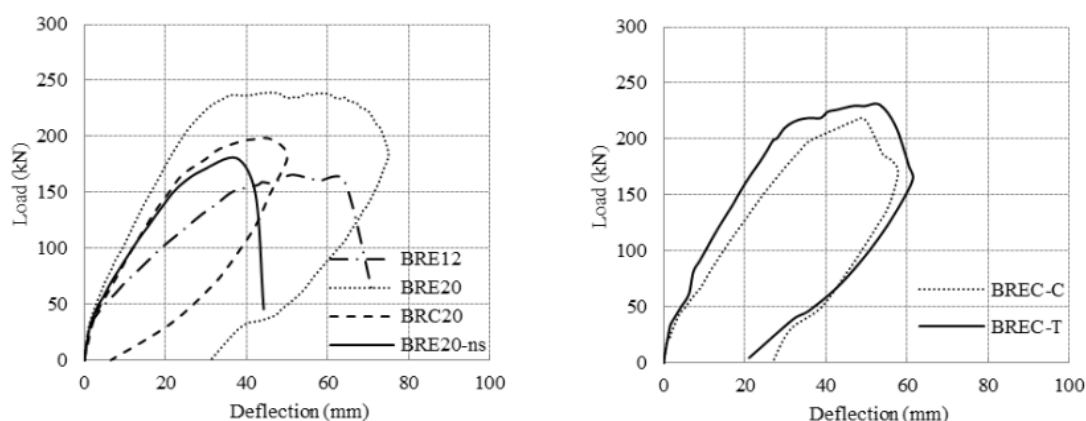
خمش ۴ نقطه مورد آزمایش قرار دادند. در این پژوهش از ۲ نوع میلگرد BFRP یکی با قطر ۱۲ و دیگری با قطر ۲۰ میلیمتر بعنوان میلگرد کششی استفاده شد [15].

به دلیل ترد شکن بود میلگرد های FRP، درصد آرماتور کششی بیشتر از درصد بالانس طراحی شده اند تا از شکست ترد ناشی از شکست میلگردها جلوگیری شود. تصویر شماتیک مقطع نمونه ها و ستاپ آزمایش و مقطع نمونه ها در شکل ۲-۲۲ قابل ملاحظه است [15].



شکل ۲-۲۲ تصویر شماتیک ستاپ و مقطع نمونه ها [15]

با توجه هزینه گزاف ECC، دو نمونه تیر به گونه ای ساخته شد که تنها بخشی از مقطع تیر ECC و مابقی بتن باشد. منحنی بار-تغییر مکان وسط دهانه نمونه ها در دو گروه مطابق شکل ۲-۲۳ است.



شکل ۲-۲۳ منحنی بار-تغییر مکان وسط دهانه نمونه ها [15]

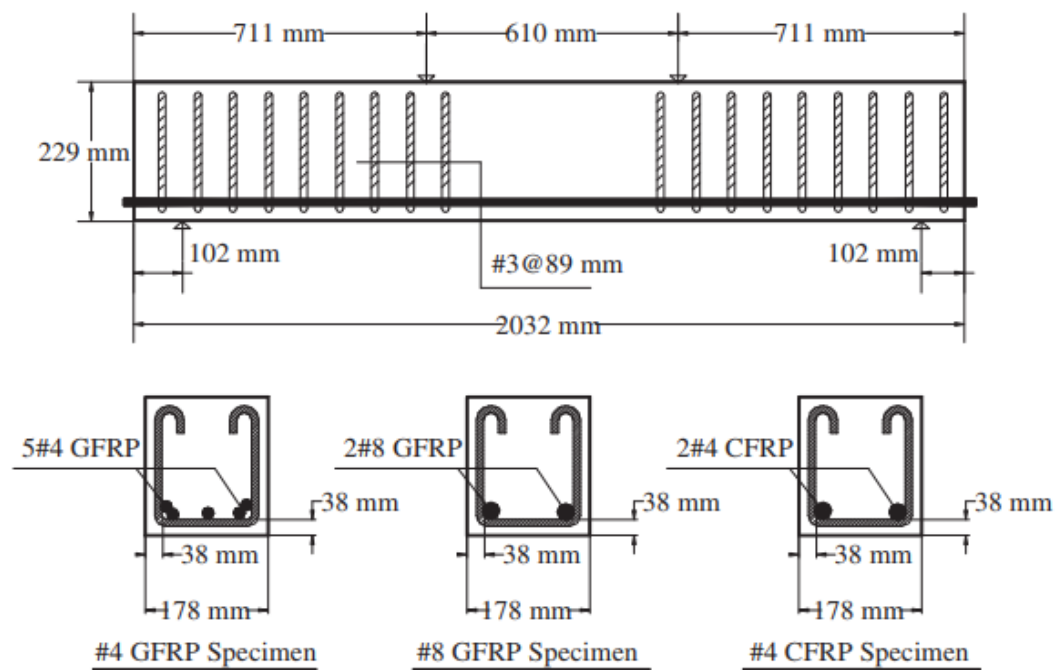
نتایج نشان داد استفاده از ECC به جای بتن، به طور چشم‌گیری خصوصیات خمشی نظیر مقاومت خمشی، ظرفیت تغییر شکل و جذب انرژی را افزایش می‌دهد. همچنین در صورت استفاده از ECC با کاهش درصد آرماتور، ظرفیت تغییر مکان بالاتری دارد. از طرف دیگر، تیرهایی که از ترکیب بتن و ECC ساخته شدند جذب انرژی بالاتری داشتند. استفاده از ECC در ناحیه کششی ظرفیت تغییر مکان بالاتری نسبت به ECC در ناحیه فشاری دارد [15].

۲-۵-۴ خصوصیات شکل پذیری تیر های بتن الیافی مسلح به میلگرد FRP

به منظور کاهش مشکل خوردگی فولاد، مطالعاتی صورت گرفت که ترکیب بتن الیافی (FRC^۱) و میلگرد FRP را جایگزین فولاد کند. در سال ۲۰۱۰ وانگ و بلاری تعداد ۱۲ تیر در ۶ گروه با عرض mm۱۷۸، ارتفاع mm۲۲۹ و طول mm۲۰۳۲ ساخته و هر گروه را تحت بار یکنواخت و تکرار بارگذاری/باربرداری آزمایش کردند. متغیرهای این آزمایش قطر میلگردهای FRP، جنس میلگردهای FRP (GFRP یا CFRP) و مقایسه بتن و بتن الیافی می‌باشد [16].

نام گزاری نمونه های ساخته شده به این صورت است که حرف اول (P یا F) نشان دهنده نوع بتن (ساده یا الیافی)، حرف دوم (۴ یا ۸) نشان دهنده سائز میلگردهای کششی، حرف سوم (C یا G) بیانگر جنس میلگرد کششی (CFRP یا GFRP) و حرف چهارم (۱ یا ۲) نوع بار گذاری را مشخص می‌نماید. بار گذاری به روش خمش ۴ نقطه که تصویر شماتیک آن و مقطع نمونه‌ها در شکل ۲-۲۴ نشان داده شده است [16].

¹ Fiber Reinforced Concrete

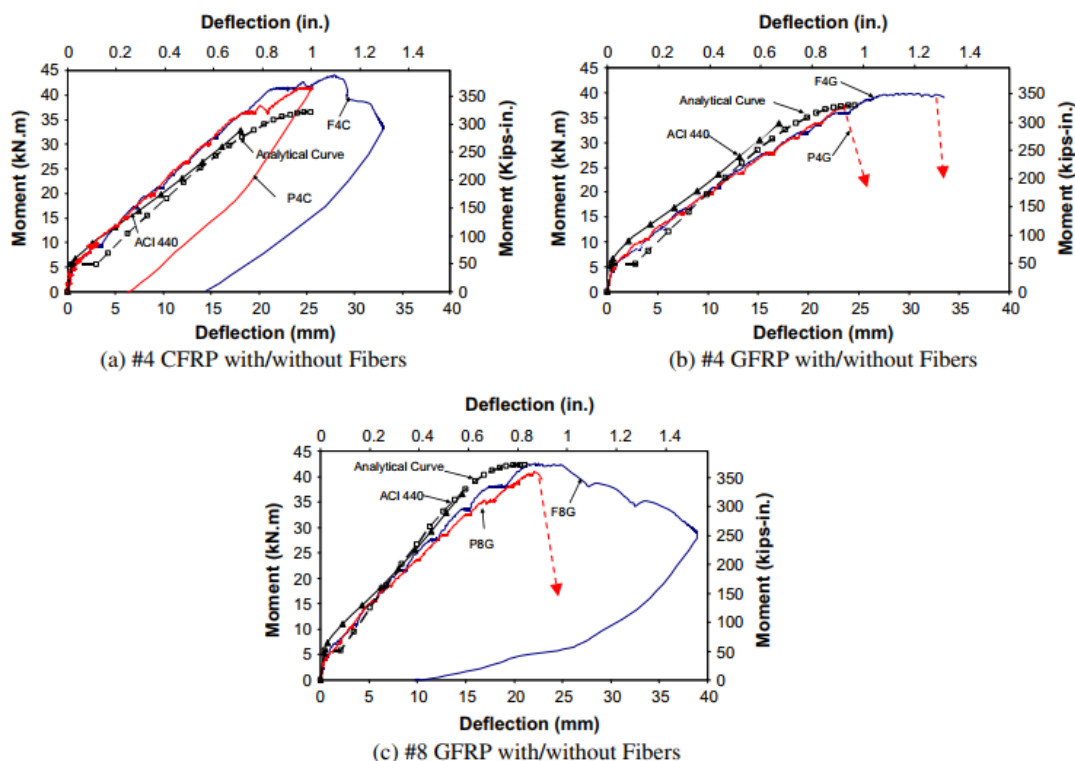


شکل ۲-۲۴ جزئیات نمونه تیرها [16]

نتایج مندرج در شکل ۲-۲۵ و جدول ۳-۲ نشان داد که ظرفیت نهایی لنگر نمونه‌ها و تغییر مکان وسط دهانه در تیرهای FRC صرف نظر از نوع میلگردهای کششی افزایش یافت.

جدول ۳-۲ مقایسه ظرفیت خمشی و تغییر مکان نهایی تیرهای بتنی و FRC مسلح به میلگرد FRP [16]

Specimen I.D.	Ultimate moment (kN m)		Ultimate deflection (mm)		Ultimate moment (kN m)		Ultimate deflection (mm)		$\frac{M_{FRC}}{M_{FRC}}$	$\frac{\Delta_{FRC}}{\Delta_{FRC}}$
P4C-1	51.9	51.1	30.2	30.0	42.6	41.9	26.2	25.9	N/A	N/A
P4C-2	50.2		29.7		41.1		25.4			
P4G-1	46.0	46.9	26.2	26.1	37.5	38.2	23.9	23.8	N/A	N/A
P4G-2	47.7		25.9		38.9		23.6			
P8G-1	50.9	51.0	24.4	24.3	40.9	40.9	22.1	22.0	N/A	N/A
P8G-2	51.0		24.1		40.9		21.8			
F4C-1	47.2	45.7	30.5	29.2	47.2	45.7	30.5	29.2	1.09	1.13
F4C-2	44.1		27.9		44.1		27.9			
F4G-1	39.8	40.5	30.2	30.2	39.8	40.5	30.2	30.2	1.06	1.27
F4G-2	41.1		30.2		41.1		30.2			
F8G-1	42.2	41.6	24.1	23.1	42.2	41.6	24.1	23.1	1.02	1.05
F8G-2	41.0		22.1		41.0		22.1			



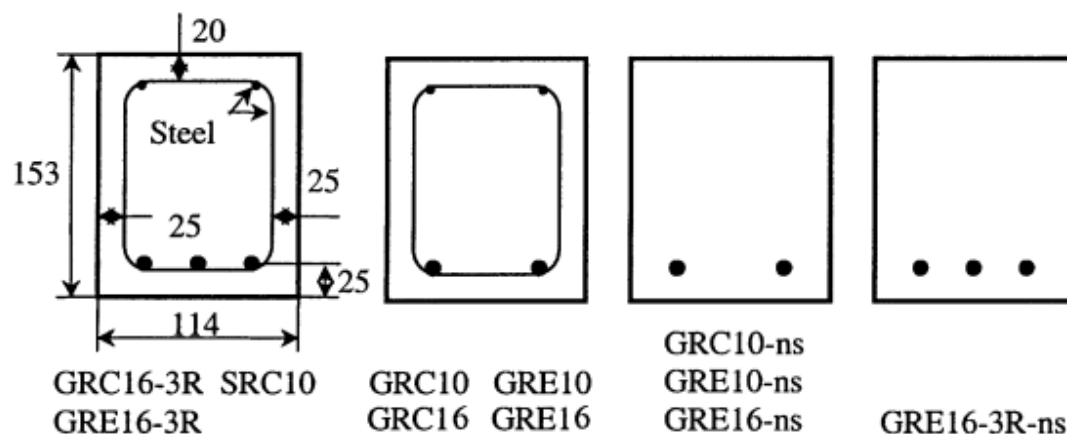
شکل ۲-۲۵ منحنی لنگر-تغییر مکان وسط دهانه نمونه ها [16]

نتایج نشان داد استفاده از بتن الیافی به جای بتن می‌تواند عرض ترک‌ها را بخصوص در بار سرویس کاهش دهد. همچنین بتن الیافی، کرنش بیشتری را تحمل می‌کند و توانست تا ۳۰٪ شکل پذیری را بهبود بخشد [16].

۲-۵-۵ رفتار خمشی تیرهای ECC مسلح به میلگرد GFRP

رفتار ترد و مدول الاستیسیته پایین میلگردها FRP به دلیل کاهش شکل پذیری و افزایش عرض ترک، مانع از کاربردی شدن این نوع میلگرد شده است. در سال ۲۰۰۲ لی و وانگ ۱۶ نمونه تیر را با جایگزین کردن ECC به جای بتن مورد پژوهش قرار دادند [17].

۱۱ تیر متفاوت به همراه ۵ تیر همسان (مجموعاً ۱۶ نمونه تیر) با سطح مقطع 114×152 mm در سه گروه مطابق با شکل ۲-۲۶ ساخته شدند. گروه اول تیرهای با طول کوتاه به منظور شکست برشی، نمونه‌های گروه دوم کاملاً مشابه با گروه ۱ اما با طول دهانه بیشتر به منظور حاکم شدن شکست خمشی در ناحیه کششی و گروه سوم نیز مشابه گروه دوم اما با درصد آرماتور بیشتر به منظور حاکم شدن شکست خمشی در ناحیه فشاری ساخته شده و تحت آزمایش خمش ۴ نقطه قرار داده شدند [17].



شکل ۲-۲۶ سطح مقطع نمونه ها [17]

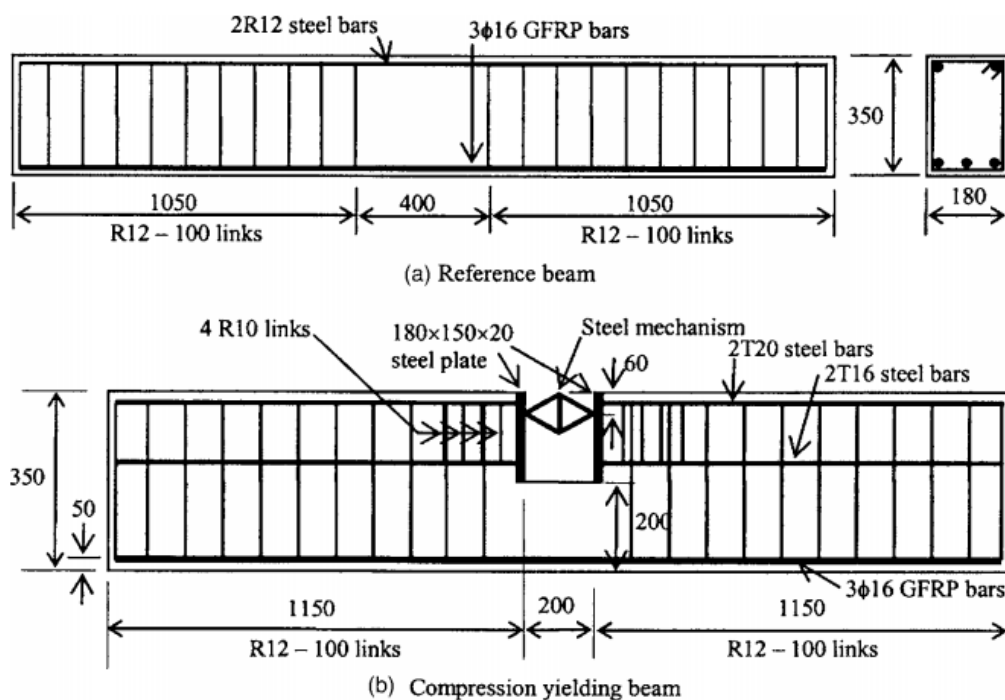
نتایج پژوهش‌ها که در جدول ۲-۴ نشان داده شده است، حاکی از تغییر مکان و ظرفیت تحمل بسیار بالای نمونه‌های دارای ECC نسبت به بتن بود. به دلیل رفتار شکل پذیر ECC تحقیقات نشان داد زمانی که طراحی سازه بر اساس شکست خمشی در ناحیه کششی باشد، منفعت ECC در شکل پذیری و استهلاک انرژی در حاشیه قرار می‌گیرد. بنابراین طراحی تیرهای ECC مسلح به میلگرد FRP با درصد آرماتور بیشتر از بالانس (حاکم شدن شکست خمشی در ناحیه فشاری) ارجحیت دارد. از طرف دیگر، ECC تاثیر زیادی بر کنترل عرض ترک داشته، به طوری که برعکس بتن که ترک‌ها با افزایش بار، عریض‌تر می‌شوند، در ECC عرض ترک تا زمان شکست ثابت باقی ماند [17].

جدول ۲-۴ خلاصه نتایج آزمایش‌ها [17]

Series	Beam designation	Peak load, kN	Ultimate deflection, mm	Fracture energy, J	Energy dissipation ratio, %	Failure mode
I	SRC10	75.6	31.2	2122	95.0	Flexural-tension
	GRC10-ns	34.7	4.7	123	—	Shear
	GRC10	90.7	15.1	582	35.9	Shear-compression
	GRE10-ns	86.9	20.2	2031	79.0	Shear-tension
		89.6	16.0	2003	62.3	
	GRE10	132.7	23.7	2014	47.5	Shear
		134.1	23.2	2041	47.1	
II	GRC16	62.1	37.4	1377	40.4	Flexural-tension
	GRE16-ns	77.4	46.3	2592	43.5	Shear
	GRE16	73.8	43.8	1898	38.4	Flexural-tension
		76.9	43.3	2016	39.0	
III	GRC16-3R	69.7	31.5	2241	30.3	Flexural-compression
		75.4	33.4	1679	44.3	
	GRC16-3R-ns	83.5	33.1	2875	32.6	Shear
	GRC16-3R	106.9	48.2	3349	42.6	Flexural-compression
		104.6	46.8	3384	46.0	

۲-۵-۶ ایده جدید به منظور دست یابی به شکل پذیری تیرهای بتنی مسلح

شکل پذیری اعضای بتنی بر اساس مقدار انحنای آن عضو سنجیده می‌شود. در اعضای بتنی مسلح انحنای به کرنش کششی میلگرد و کرنش فشاری بتن وابسته است. بنابراین استفاده از میلگردهای با مقاومت بالا نظیر FRP شکل پذیری را کاهش می‌دهد. در سال ۲۰۰۶ وو روشی جدید برای تامین شکل پذیری تیرهای بتنی در مود شکست خمشی در ناحیه فشاری ارائه کرد. دو نمونه تیر بتنی مسلح به میلگرد GFRP طراحی شده بر اساس شکست بتن فشاری مطابق شکل ۲-۲۷ ساخته و تحت خمش ۴ نقطه آزمایش شد. شکل ۲-۲۷ (a) یک نمونه تیر بتنی ساده مسلح به میلگرد GFRP را نشان می‌دهد. نمونه دوم در ناحیه پلاستیک بتن فشاری، فضای خالی تعبیه شد (شکل ۲-۲۷ (b)) سپس مکانیسم تسلیم فشاری پس از گیرش نهایی بتن، در فضای خالی قرار داده شد. شکل ۲-۲۸ تصویر مکانیسم تسلیم فشاری در نشان داده شده است [18].

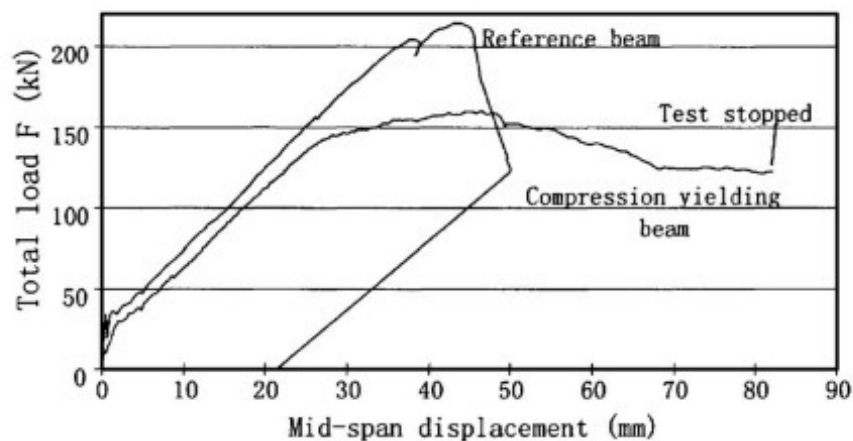


شکل ۲-۲۷ تصویر شماتیک نمونه‌ها [18].



شکل ۲-۲۸ مکانیسم تسلیم فشاری فولادی [18].

نتایج آزمایش خمش ۴ نقطه نشان داد در نمونه ی اول به سرعت بتن فشاری شکسته شد و شاخه دوم منحنی افت زیادی داشت و شاخص شکل پذیری این تیر ۱.۲ محاسبه گردید. از طرف دیگر، نمونه دوم تغییر شکل بالایی داشت و در حین آزمایش دچار شکست نگردید بلکه به دلیل محدود اندازه گیری تغییر مکان وسط دهانه، آزمایش متوقف گردید. شاخص شکل پذیری این نمونه ۲.۷۵ محاسبه شده که افزایش چشم گیری نسبت به نمونه اول دارد. شکل ۲-۲۹ منحنی بار-تغییر مکان وسط نمونه ها و نمونه دوم را پس از آزمایش نشان می دهد [18].



(a) Responses of test specimens

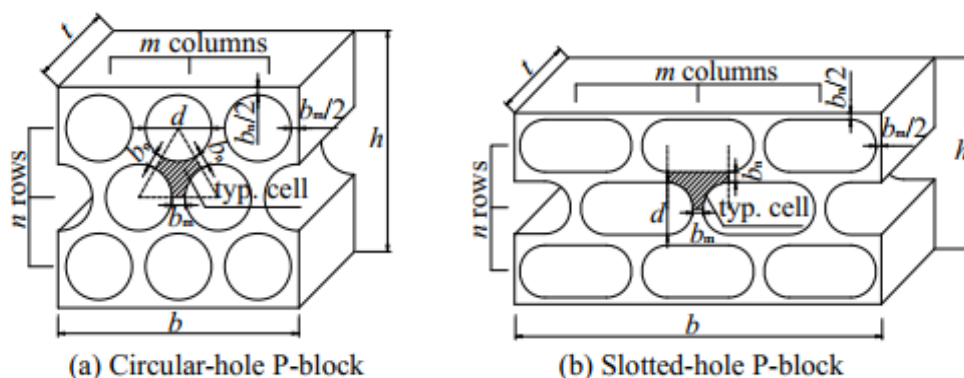


(b) Specimen S2 after testing

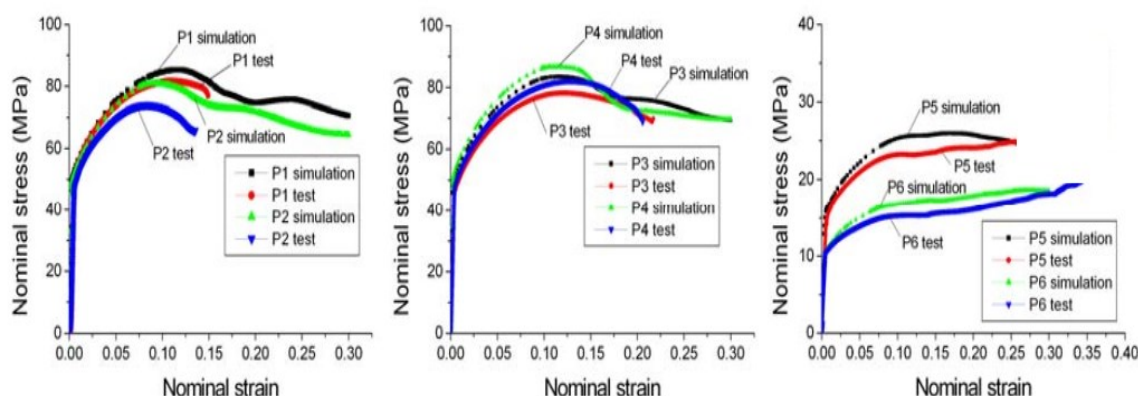
شکل ۲-۲۹ نتایج آزمایش [18].

در پژوهش دیگری که در سال ۲۰۰۷ توسط لیو و همکاران صورت گرفت، استفاده از فولاد نرم سوراخ دار مطابق شکل ۲-۳۰ در بلوک CY مورد بررسی آزمایشگاهی و تحلیلی قرار داده شد. عملکرد رفتاری این بلوک

ها در دو نوع سوراخدار دایروی و سوراخدار شیاری پیشنهاد شد. بنابراین تعداد ۶ نمونه بلوک با مشخصات مختلف سوراخ ها آزمایش و نتیجه ها مقایسه گردید [19].



شکل ۲-۳۰ بلوک CY پیشنهادی توس X.C. Liu [19]



شکل ۲-۳۱ منحنی تنش-کرنش نمونه بلوک های CY [19]

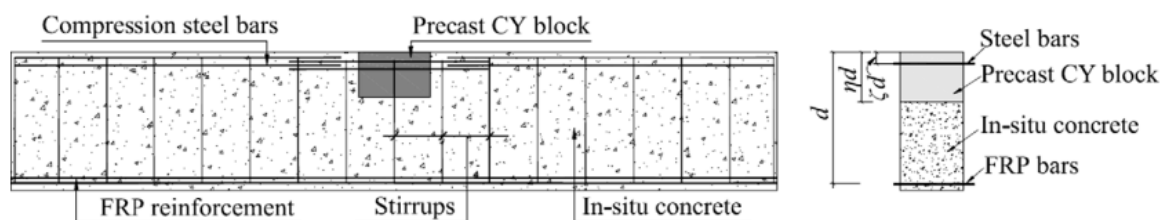
در نهایت پس رسم منحنی تنش-کرنش بلوک های CY و مقایسه آن با فرضیات رفتاری مطلوب، مشخص شد تولید بلوک CY با رفتار الاستیک-پلاستیک کامل بسیار دشوار است. شکل ۲-۳۱ منحنی تنش کرنش بلوک های CY از نتایج آزمایشگاهی و تحلیلی را نشان می دهد [19].

۲-۵-۷ تحلیل شکل پذیری تیرهای مسلح به میلگرد FRP و تسلیم

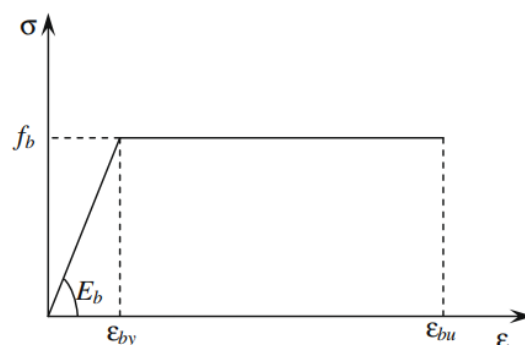
فشاری

امروزه شکل پذیری بزرگترین مانع برای پذیرش استفاده از سازه‌های بتنی مسلح به میلگردهای FRP است. روش جدید به منظور تامین شکل پذیری این اعضا توسط تسلیم ناحیه فشاری (CY^۱)، به جای تسلیم کششی (TY^۲) در ناحیه مفصل پلاستیک پیشنهاد شده است. در سال ۲۰۰۹ ژو و همکاران در خصوص شکل پذیری تیرهای CY تحقیقات عددی انجام دادند [20].

در این پژوهش با جایگزین کردن بلوک CY پیش ساخته در ناحیه فشاری مفصل پلاستیک مطابق شکل ۲-۳۲ شکل ۳۲ پذیری را بر اساس رفتار لنگر-انحناء مورد بررسی قرار دادند. در این تحقیقات بلوک CY دارای رفتار الاستیک-پلاستیک کامل در نظر گرفته شده است که منحنی تنش-کرنش آن در شکل ۲-۳۳ نشان داده شد [20].



شکل ۲-۳۲ تصویر مدل تیر بتنی مسلح [20]



شکل ۲-۳۳ منحنی تنش-کرنش بلوک CY [20]

¹ Compression Yield

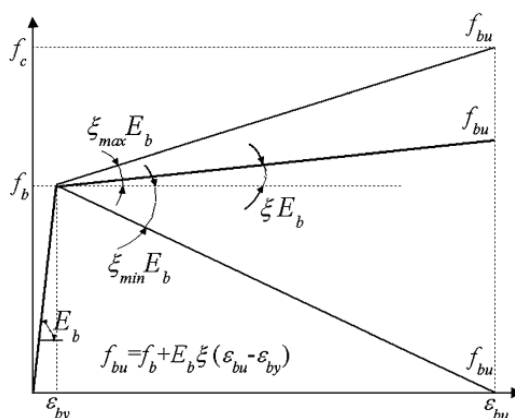
² Tensile Yield

نتایج نشان داد استفاده از بلوک CY افزایش بسیاری زیادی در شکل پذیری تیرهای بتنی مسلح به میلگردهای غیر شکل پذیر به همراه دارد. از طرف دیگر، نسبت بهینه مشخصی بین مقاومت بلوک CY، ابعاد بلوک CY و درصد آرماتور FRP وجود دارد [20].

۲-۵-۸ طراحی بهینه تیرهای بتنی مسلح به میلگرد FRP و تسلیم فشاری

به منظور تامین شکل پذیری تیرهای بتنی مسلح به میلگرد FRP روش طراحی جدید و موثری ارائه شده است. در این روش طراحی به جای تسلیم کششی، شکل پذیری را توسط تسلیم فشاری تامین می‌کند. در سال ۲۰۱۰ ژو و همکاران پژوهشی در خصوص استفاده از بلوک CY انجام دادند [21].

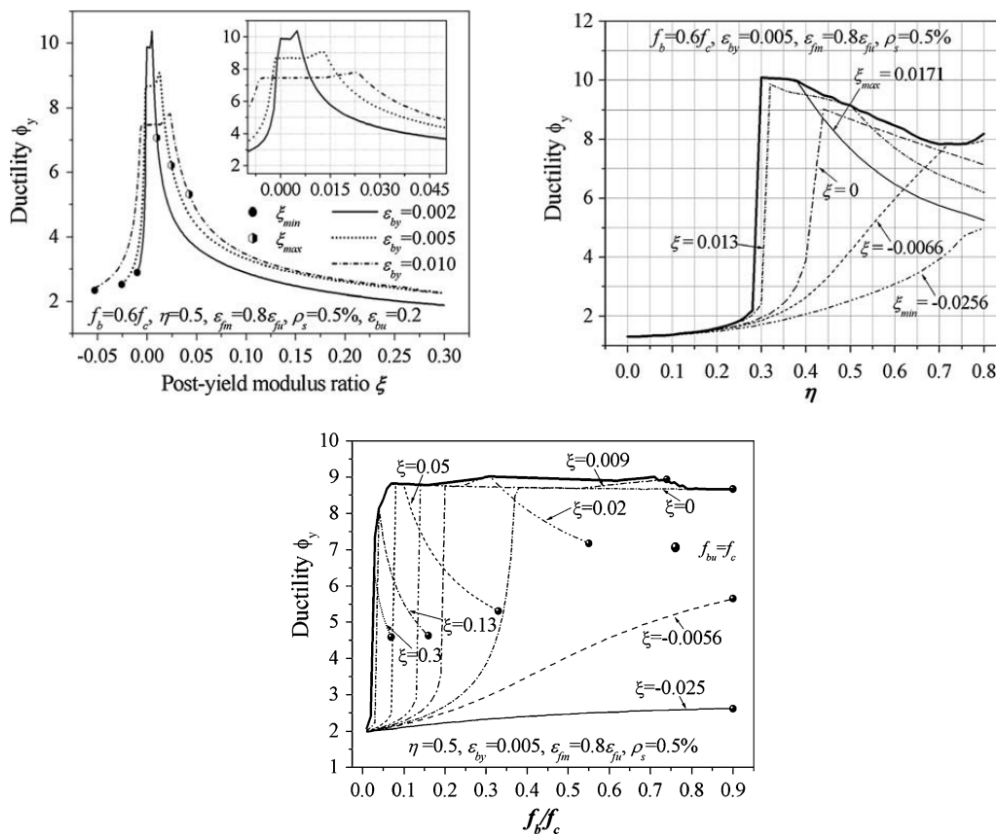
پژوهش‌های پیشین نشان داد ساخت بلوک CY با رفتار الاستیک-پلاستیک کامل، بسیار دشوار است و رفتارهای بعد از تسلیم نظیر سخت شدگی را از خود نشان می‌دهد. بنابراین در این پژوهش بر رفتار بعد از تسلیم بلوک CY به روش تحلیلی و عددی تمرکز شد. شکل ۲-۳۴ منحنی رفتاری بلوک CY را نشان می‌دهد. سپس در فضای پارامتری، طراحی بهینه بلوک CY انجام شد و سه پارامتر مقاومت تسلیم بلوک CY، نسبت ارتفاع CY به عمق موثر تیر (η) و نسبت مدول الاستیسیته بعد از تسلیم به مدول ناحیه الاستیک بلوک CY (ζ) مورد بررسی قرار گرفت [21].



شکل ۲-۳۴ منحنی رفتاری تنش-کرنش بلوک CY [21]

نتایج نشان داد برای هر ζ مشخص، η و f_b/f_c بهینه ای وجود دارد که شکل پذیری را به حداکثر برساند. شکل ۲-۳۵ نمودارهای تک بعدی این پارامترها را در مقایسه با شکل پذیری نشان داده است. به طور کلی بیشترین شکل پذیری زمانی رخ می‌دهد که ζ نزدیک صفر باشد و هرچه این مقدار بزرگتر شود، شکل پذیری

کاهش می‌یابد. از طرف دیگر هرچه بلوک CY شکل پذیر تر باشد، شکل پذیری بهینه بالاتری ارائه می‌دهد [21].



شکل ۲-۳۵ نتیجه پارامترهای مورد بررسی بر شکل پذیری تیر [22]

در نهایت در سال ۲۰۱۰ وو و همکاران در تکمیل پژوهش‌های فوق، طراحی بهینه‌ای را پیشنهاد کردند که توسط آن بیشترین شکل پذیری و کمترین بلوک CY تامین گردد [22].

۲-۵-۹ بررسی شکل پذیری مقاطع بتنی مسلح به میلگرد های FRP

تیرهای بتنی مسلح به میلگرد FRP به دلیل رفتار ترد میلگردهای FRP و بتن، شکست ترد و نامطلوب دارند. بنابراین، در سال ۲۰۱۸ (شمسی ۱۳۹۷) عرب رحیمی و علایی با هدف افزایش شکل پذیری تیرهای بتنی مسلح به میلگرد FRP پیشنهاد شد به جای استفاده از بتن معمولی، از کامپوزیت‌های شکل‌پذیر تر استفاده

شود. به این منظور با جایگزینی PC^1 ، PMC^2 و ECC^3 به جای بتن معمولی، نمونه‌ها را در نرم افزار Fortran مدل سازی کرده و شکل پذیری این مقاطع مورد بررسی قرار گرفت. همچنین در این پژوهش از میلگردهای CFRP، AFRP و GFRP بعنوان میلگردهای طولی استفاده شد. پس از مدل سازی و رسم منحنی‌های ممان-انحنا و دوخطی کردن آن‌ها، شکل پذیری مقاطع محاسبه و مقایسه گردید [23].

نتایج نشان داد در استفاده از بتن پلیمری، با سخت تر شدن میلگرد FRP، شکل پذیری افزایش می‌یابد. از طرف دیگر، استفاده از بتن پلیمری شکل پذیری را بسیار افزایش داده و حتی از مقدار مجاز هم بیشتر شود [23].

از طرف دیگر، ترکیب بتن اصلاح شده توسط پلیمر با میلگرد فولادی متداول شکل پذیری را تا ۴.۵ برابر افزایش می‌دهد. اما شکل پذیری این نوع بتن مسلح به میلگرد FRP تاثیر قابل ملاحظه ای روی شکل پذیری نمونه‌ها نمی‌گذارد [23].

در نهایت نتایج نشان داد، مسلح کردن تیر کامپوزیت سیمانی مهندسی شده (ECC) با میلگرد فولادی متداول باعث افزایش مقاومت و کاهش شکل پذیری می‌شود. اما ترکیب این کامپوزیت با میلگرد FRP، شکل پذیری بر اساس انحنا را بطور چشم گیری بهبود می‌بخشد [23].

¹ Polymer Concrete

² Polymer Modified Concrete

³ Engineered Cementitious Composite

فصل ۳ آزمایش های اولیه مواد و مصالح

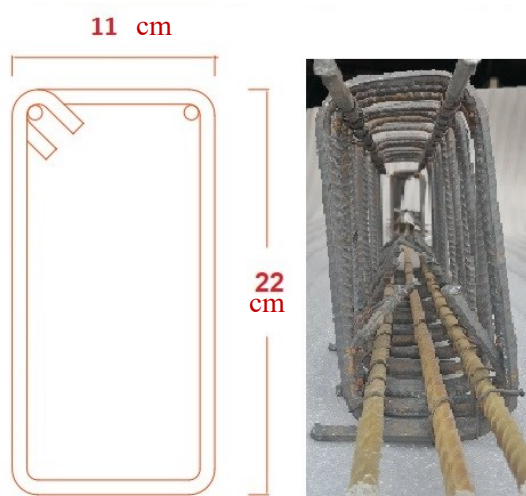
۳-۱ مقدمه

طراحی و ساخت نمونه‌های اصلی مستلزم تهیه مصالح مورد نیاز و تعیین خصوصیات رفتاری هر کدام می‌باشد. بنابراین، این فصل کلیه مصالح مصرفی را معرفی نموده و رفتار آن‌ها را مورد آزمایش قرار می‌دهد. مصالح مصرفی در این پژوهش شامل میلگرد فولادی، بتن متداول، میلگرد GFRP و ورق CFRP می‌باشد. در ادامه این فصل، به بررسی، آزمایش رفتار بتن‌های اصلاح شده توسط پلیمر (PMC) پرداخته و پس از بیان مفهوم شکل‌پذیری، شکل‌پذیری آن‌ها مقایسه شد.

۳-۲ میلگرد فولادی

میلگردهای فولادی به دلیل پتانسیل خوردگی بسیار بالا، قابلیت استفاده در محیط‌های خورنده را ندارند. اما از آنجا که فراهم کردن خاموت‌های FRP به منظور جلوگیری از شکست برشی بسیار مشکل بوده و وجود میلگرد در نتیجه‌ی آزمایش‌ها تداخلی ایجاد نمی‌کند، از خاموت‌های فولادی به منظور جلوگیری از حاکمیت مود شکست برشی استفاده شد.

شکل ۳-۱ تصویر خاموت‌های مصرفی و شکل شماتیک آن را نشان می‌دهد. خاموت‌ها به قطر ۸ میلیمتر، در ابعاد ۱۱ سانتیمتر در عرض و ۲۲ سانتیمتر در طول، پشت تا پشت میلگرد‌ها در نظر گرفته شد. بعلاوه قلاب استاندارد ۱۳۵ درجه در ابتدا و انتهای خاموت‌ها ایجاد گردید.



ب: شکل شماتیک از خاموت‌های استفاده شده

الف: خاموت‌های استفاده شده

شکل ۳-۱ تصویر خاموت‌های مورد استفاده در تیرهای بتنی

۳-۳ بتن

بتن از ترکیب سیمان، آب، سنگ دانه و افزودنی‌ها با نسبت‌های مشخص بر اساس مقاومت هدف ساخته می‌شود. مقاومت فشاری مشخصه ۲۸ روزه بتن مورد استفاده در آزمایش‌های این پژوهش برابر ۲۵ و ۳۰ مگاپاسکال در نظر گرفته شد. از بتن با مقاومت مشخصه ۲۵ مگاپاسکال برای بررسی اثر محصورشدگی و از بتن با مقاومت مشخصه ۳۰ مگاپاسکال برای انجام تست‌های مشخص کننده تاثیر افزودنی‌های پلیمری به بتن (PMC) استفاده گردید. بنابراین طرح اختلاط بتن مورد استفاده بر اساس آیین نامه ACI 211.1-91 به شرح زیر تنظیم گردید [24].

به منظور دستیابی به بتن با مقاومت مشخصه ۲۵ و ۳۰ مگاپاسکال فرضیات اولیه بر اساس آیین نامه مذکور، خصوصیات مصالح مصرفی در نظر گرفته شد که در جدول ۳-۱ قابل مشاهده است. تفاوت فرضیات اولیه طرح اختلاط با مقاومت مشخصه ۲۵ و ۳۰ مگاپاسکال در نسبت آب به سیمان بوده که به ترتیب برابر ۰.۶۱ و ۰.۵۴ در نظر گرفته شد.

جدول ۳-۱ فرضیات اولیه طرح اختلاط بتن با مقاومت مشخصه ۲۵ و ۳۰ مگاپاسکال

فرضیات اولیه طرح اختلاط بتن	
۷۵-۱۰۰	اسلامپ (mm)
۹.۵	حداکثر قطر سنگدانه مصرفی (mm)
۳	مدول نرمی
۱۶۳۰	وزن مخصوص شن خشک (kg/m^3)
۱۶۳۰	وزن مخصوص ماسه خشک (kg/m^3)
۳۱۶۰	وزن مخصوص سیمان (kg/m^3)
۱۰۰۰	وزن مخصوص آب (kg/m^3)
۲۲۸۰	وزن مخصوص بتن (kg/m^3)

پس از در نظر گرفتن فرضیات اولیه، مقدار مصالح مصرفی در هر متر مکعب بتن به ترتیب با مقاومت مشخصه ۲۵ و ۳۰ مگاپاسکال در جدول ۳-۲ نشان داده شده است:

جدول ۳-۲ طرح اختلاط بتن مصرفی با مقاومت مشخصه ۲۵ و ۳۰ مگاپاسکال

اجزای تشکیل دهنده	طرح اختلاط بتن با مقاومت مشخصه ۲۵ مگاپاسکال	طرح اختلاط بتن با مقاومت مشخصه ۳۰ مگاپاسکال
سیمان (kg/m^3)	۳۷۳.۷۷	۴۲۲.۲
درشت دانه (kg/m^3)	۷۱۷.۲	۷۱۷.۲
ریز دانه (kg/m^3)	۹۶۱	۹۱۲.۵
آب (kg/m^3)	۲۲۸	۲۲۸
روان کننده (kg/m^3)	۰	۰.۸

افزودنی ذکر شده در طرح اختلاط فوق، فوق روان کننده با مشخصات SUPER PLAST PCEHR2 محصول شرکت وند شیمی ساختمان بوده که به دلیل روانی کم بتن، به نسبت ۰.۲ درصد وزنی سیمان به طرح اختلاط افزوده شد. سیمان مصرفی در این آزمایش سیمان تیپ ۲ مشهد در کیسه‌های ۵۰ کیلوگرمی مورد استفاده قرار گرفت. درشت دانه و ریز دانه مصرفی با دانه بندی ارائه شده در جدول ۳-۳ (الف) دانه‌بندی درشت دانه و (ب) دانه‌بندی ریز دانه، مطابق با آیین نامه ASTM C33-2013 از معادن شاهرود تهیه گردید [25].

جدول ۳-۳ دانه بندی طرح اختلاط

ب) دانه بندی ریز دانه	
شماره الک	درصد عبوری
No.8	٪ ۱۰۰
No.16	٪ ۷۰
No.30	٪ ۵۰
No.50	٪ ۲۵
No.100	٪ ۵

الف) دانه بندی درشت دانه	
شماره الک	درصد عبوری
3/8"	٪ ۱۰۰
No. 4	٪ ۷۰
No. 8	٪ ۳۰

۳-۴ میلگرد GFRP

مصلح کامپوزیتی که توسط الیاف آغشته به رزین و یا بدون آن تولید می‌گردند، تحت عنوان FRP¹ شناخته می‌شوند. FRP ها در دو نوع الیاف و میلگرد مورد استفاده قرار می‌گیرند. از نوع الیافی FRP ها عمدتاً در بهسازی استفاده می‌شود به این منظور الیاف پس از گیرش بتن، در محل مورد نظر توسط رزین‌ها چسبانده می‌شوند. از طرف دیگر، تولید میلگردهای FRP در کارخانه انجام می‌شود. الیاف‌ها توسط رزین به یکدیگر بافته شده و یک جسم صلب یکپارچه به شکل میلگرد را تشکیل می‌دهند. در این پژوهش از میلگردهای با الیاف شیشه GFRP² بعنوان میلگرد کششی استفاده شد. شکل ۳-۲ و شکل ۳-۳ به ترتیب میلگردهای GFRP تولیدی شرکت کامپوزیت آسیا و شرکت آریانا سازه را نشان می‌دهد. نمونه‌هایی از این دو شرکت برای تعیین مقاومت کششی میلگردها تهیه شد.

¹ Fiber Reinforced Polymer

² Glass Fiber Reinforced Polymer



شکل ۳-۲ میلگرد های GFRP شرکت کامپوزیت آسیا



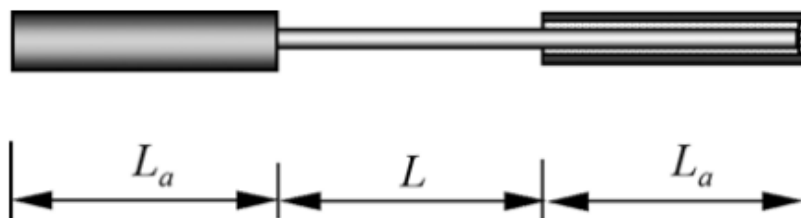
شکل ۳-۳ میلگرد های GFRP شرکت آریانا سازه

با استفاده از دستگاه کشش مستقیم که در شکل ۳-۴ تصویر آن ملاحظه می‌شود، میلگردهای GFRP تحت کشش قرار گرفته و منحنی تنش-کرنش آنها طبق آیین نامه ISO 10406-1:2008 ترسیم شد [26].



شکل ۳-۴ دستگاه تست کشش میلگرد GFRP

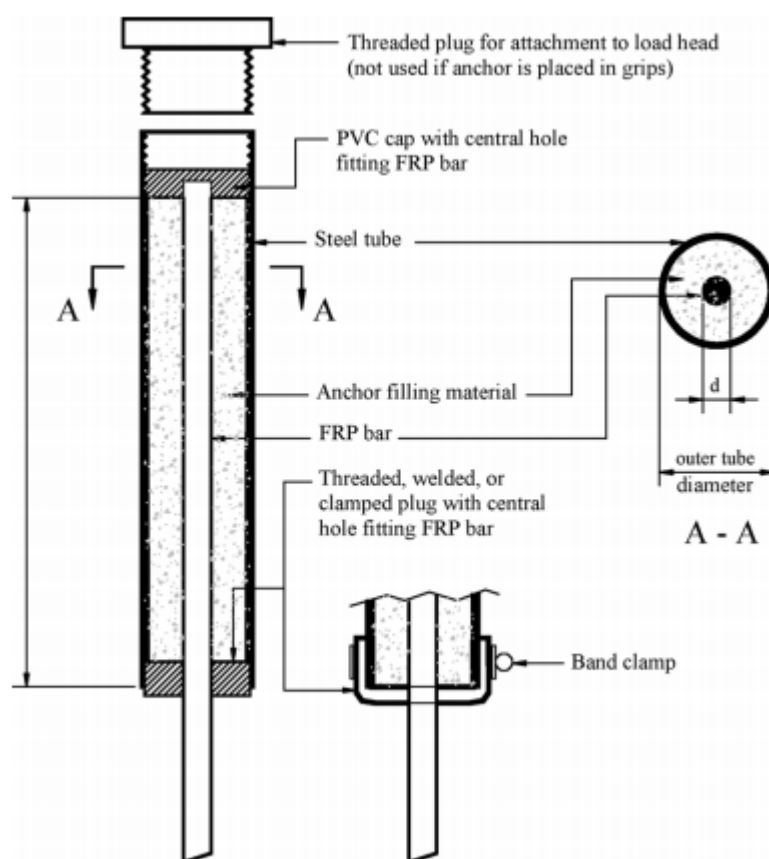
مقاومت کم و شکنندگی FRP ها در مقابل فشار و برش، ایجاب می‌کند از ایجاد ترک در محل فک‌های نگهدارنده جلوگیری شود. بنابراین آیین نامه ISO 10406-1:2008 بر لزوم استفاده از مهار^۱ در طرفین میلگرد تاکید می‌کند. این آیین نامه تست حداقل ۵ نمونه که طول آزاد میلگرد در حدفاصل مهارها از ۳۰۰ میلیمتر بیشتر باشد را ضروری دانسته و مهارها باید به گونه ای طراحی شوند که در حین تست میلگرد را به خوبی نگه دارند. شکل ۳-۵ تصویر شماتیک از نمونه میلگرد آماده تست کشش را نشان می‌دهد [26].



شکل ۳-۵ شماتیک نمونه ی تست کشش FRP [26]

¹ anchor

برای مهار طرفین میلگرد آیین نامه ASTM 7205-2011 پیشنهاد می‌کند از یک عدد لوله فولادی با ضخامت حداقل ۴.۸ میلیمتر و طول ۳۰ سانتیمتر و قطر خارجی ۳۵ میلیمتر که حداقل ۴ میلیمتر فضا بابت گروت داشته باشد استفاده شود. شکل ۳-۶ و جدول ۳-۴ جزئیات مهار طرفین میلگردها را نشان می‌دهند [27].



شکل ۳-۶ جزئیات مهار طرفین میلگرد FRP در تست کشش [27]

جدول ۳-۴ جزئیات مهار طرفین میلگرد های FRP [27]

FRP bar type	Diameter of the FRP bar, d	Outside diameter of the steel tube	Minimal length of the steel tube, L_a
GFRP	6.4 mm [0.25 in.]	35 mm [1.38 in.]	300 mm [12 in.]
GFRP	9.5 mm [0.38 in.]	35 mm [1.38 in.]	300 mm [12 in.]
GFRP	13 mm [0.50 in.]	42 mm [1.63 in.]	380 mm [15 in.]
GFRP	16 mm [0.63 in.]	42 mm [1.63 in.]	380 mm [15 in.]
GFRP	19 mm [0.75 in.]	48 mm [1.88 in.]	460 mm [18 in.]
GFRP	22 mm [0.88 in.]	48 mm [1.88 in.]	460 mm [18 in.]
GFRP	25 mm [1.00 in.]	48 mm [1.88 in.]	460 mm [18 in.]
GFRP	29 mm [1.13 in.]	48 mm [1.88 in.]	460 mm [18 in.]
GFRP	32 mm [1.25 in.]	75 mm [2.95 in.]	800 mm [32 in.]
CFRP	9.5 mm [0.38 in.]	35 mm [1.38 in.]	460 mm [18 in.]

۳-۴-۱ تست کشش میلگرد های GFRP شرکت کامپوزیت آسیا

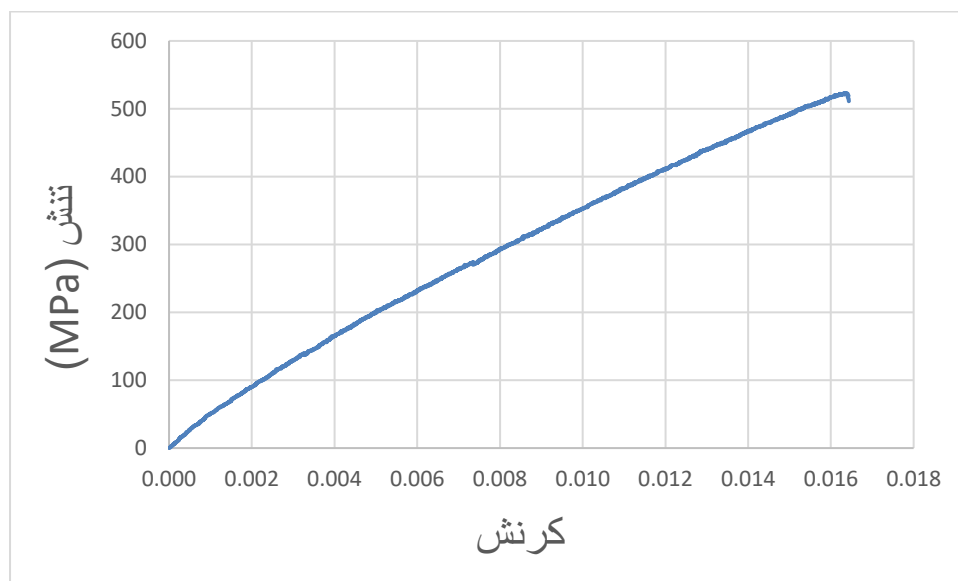
به منظور انجام تست کشش با رعایت رواداری‌های آیین نامه‌های ISO 10406-1:2008 و ASTM 7205-2011، ۲ عدد شفت فولادی به طول ۳۰ سانتیمتر تهیه شد و میلگرد GFRP به قطر ۸ میلیمتر و طول ۹۶ سانتیمتر داخل آن قرار گرفت تا فاصله آزاد میان دو شفت معادل ۳۶ سانتیمتر فراهم آورد. سپس فضای بین میلگرد و شفت با گروت G4 از محصولات صنایع گیلان شیمی با مقاومت ۷روزه ۱۱۰۰ کیلوگرم بر سانتیمتر مربع پر شد [27-26].

پس از گذشت ۷ روز و رسیدن گروت به مقاومت کافی، میلگردها مورد آزمایش تست کشش قرار گرفتند. شکل ۳-۷ تصویری از یک عدد میلگرد آماده تست کشش در دستگاه را نشان می‌دهد.



شکل ۳-۷ تست کشش میلگرد GFRP شرکت کامپوزیت آسیا

پس از انجام مراحل تست کشش، منحنی تنش-کرنش میلگردها رسم گردید. شکل ۳-۸ نمودار تنش-کرنش میلگرد GFRP شرکت کامپوزیت آسیا را نشان می‌دهد.



شکل ۳-۸ منحنی تنش-کرنش میلگرد GFRP شرکت کامپوزیت آسیا

پس از رسم نمودار و حصول نتایج مشخص شد میلگردهای فوق دارای حداکثر تنش ۵۲۳ مگاپاسکال و مدول الاستیسیته ۳۱۹۷۶ مگاپاسکال می‌باشند. مقاومت کششی نهایی میلگرد مورد آزمایش از محدوده ذکر شده در آیین نامه ACI 440.1r کمتر بود. بنابراین از میلگردهای شرکت آریانا سازه استفاده گردید.

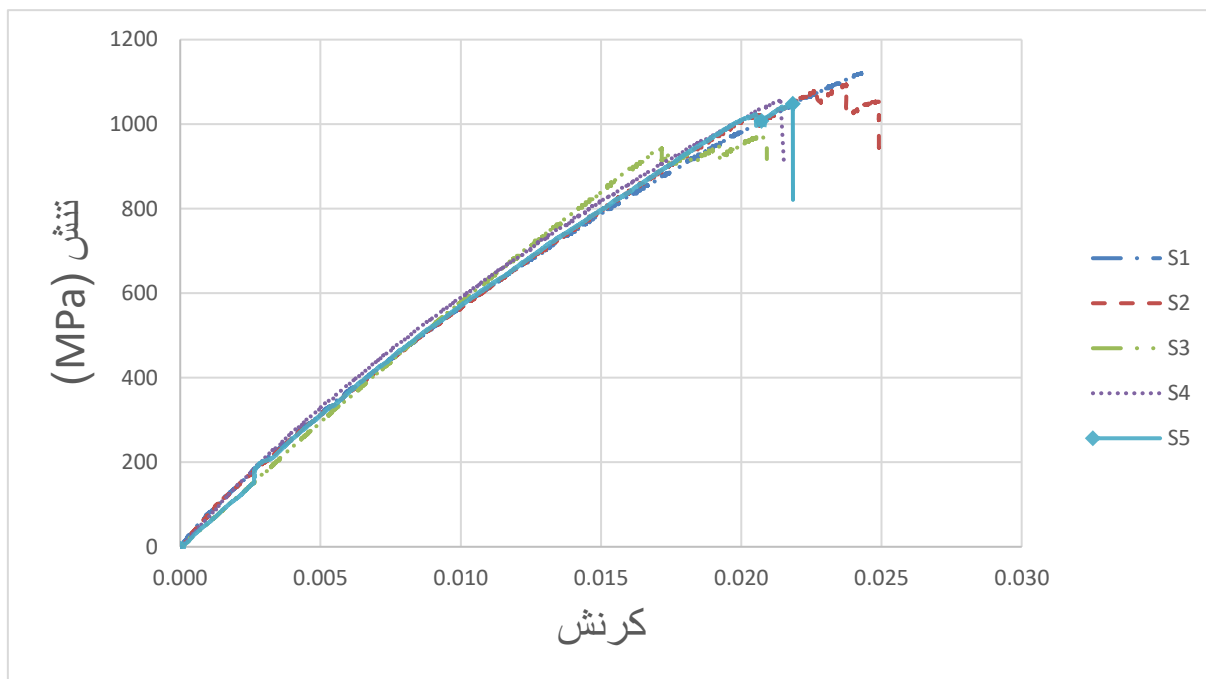
۳-۴-۲ تست کشش میلگردهای GFRP شرکت آریانا سازه

به منظور تست کشش از میلگردهای به قطر ۷.۵ میلیمتر استفاده شد که توسط دو عدد شفت در طرفین که با گروت در طرفین میلگردها نصب شده اند تحت کشش قرار داده شدند. تعداد ۵ نمونه میلگرد GFRP مورد آزمایش کشش قرار گرفته شد و نمودار تنش-کرنش آن‌ها ترسیم شد. شکل ۳-۹ تصویری از یک نمونه میلگرد آماده تست کشش را نشان می‌دهد.



شکل ۳-۹ تست کشش میلگرد های GFRP شرکت آریانا سازه

پس از انجام ۵ عدد آزمایش تست کشش منحنی تنش- کرنش آن‌ها رسم گردید. شکل ۳-۱۰ نمودار تنش کرنش هر ۵ نمونه را نشان می‌دهد.



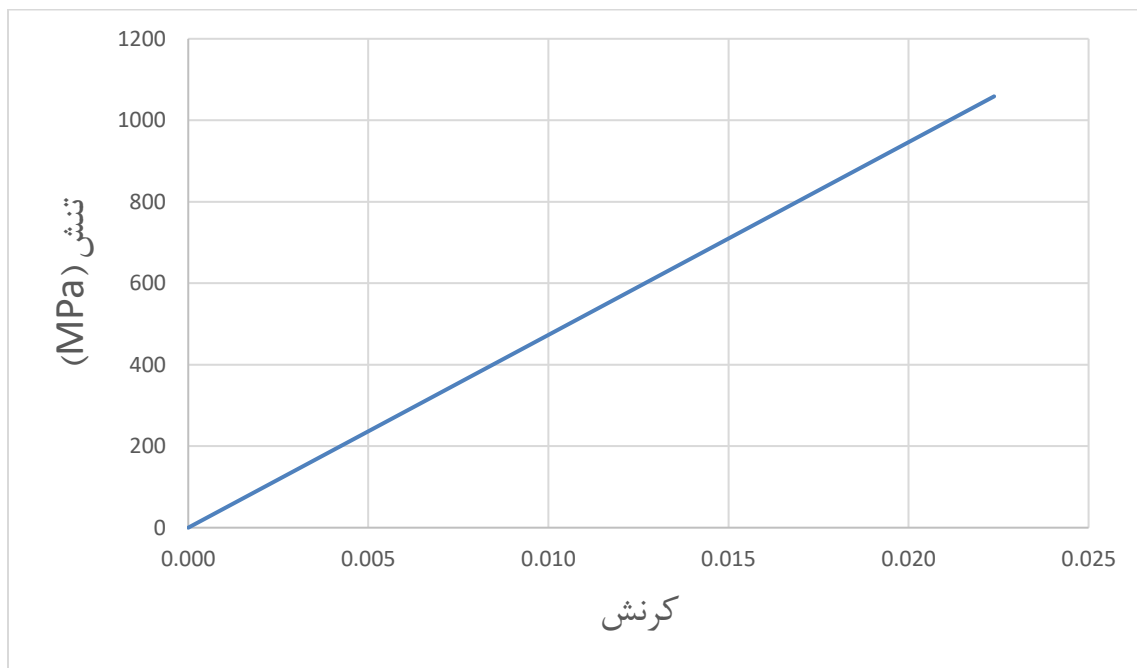
شکل ۳-۱۰ نمودار تنش-کرنش نمونه های GFRP شرکت آریانا سازه

سپس مقادیر تنش حداکثر، کرنش حداکثر و مدول الاستیسیته هر نمونه را به صورت مجزا، از اطلاعات به دست آمده استخراج شد. در ادامه به منظور دستیابی به مقادیر کاربردی در امر طراحی، از نتایج بدست آمده میانگین گرفته شد. جدول ۳-۵ تنش، کرنش و مدول الاستیسیته هر نمونه را به صورت مجزا و میانگین این نتایج که در طراحی‌ها از آن استفاده شد را نشان می‌دهد.

جدول ۳-۵ نتایج تست کشش میلگرد های GFRP شرکت آریانا سازه

نمونه ها	تنش حداکثر (MPa)	کرنش نهایی	مدول الاستیسیته (MPa)
نمونه ۱	۱۱۲۰.۷۱	۰.۰۲۴۳	۴۶۱۶۴
نمونه ۲	۱۰۹۳.۶۱	۰.۰۲۳۷	۴۶۰۵۸
نمونه ۳	۹۷۳.۸۲	۰.۰۲۰۸	۴۶۸۵۴
نمونه ۴	۱۰۵۷.۴۱	۰.۰۲۱۴	۴۹۴۱۴
نمونه ۵	۱۰۴۸.۰۳	۰.۰۲۱۸	۴۸۰۷۳
میانگین	۱۰۵۸.۷	۰.۰۲۲۴	۴۷۳۱۳

بنابراین مقادیر استفاده شده در طراحی‌ها برابر تنش معادل ۱۰۵۸ مگاپاسکال ، مدول الاستیسیته معادل ۴۷۳۱۳ مگاپاسکال و کرنش نهایی برابر ۰.۰۲۲۴ لحاظ شد و نمودار نهایی آن در شکل ۳-۱۱ نمایش داده شده است.



شکل ۱۱-۳ منحنی تنش-کرنش میلگرد GFRP شرکت آریانا سازه

۵-۳ ورق های CFRP

ورق های CFRP مجموعه ای از الیاف کربن بوده که توسط رزین به عضو متصل می شوند. بارزترین خصوصیت الیاف کربن، مقاومت کششی بسیار بالا و انعطاف پذیری بسیار زیاد آنهاست. شکل ظاهری الیاف پیش از آغشته شدن به رزین مشابه پارچه بوده و قابلیت اعمال به سطوح مختلف را دارد.

الیاف CFRP استفاده شده در این پژوهش به همراه رزین مصرفی آن از محصولات شرکت کوآنتوم انگلستان می باشند؛ شکل ظاهری و خصوصیات فیزیکی الیاف و رزین به ترتیب در شکل ۱۲-۳ و جدول ۳-۶ نشان داده شده است.



شکل ۳-۱۲ شکل ظاهری الیاف CFRP شرکت کوآنتوم

جدول ۳-۶ خصوصیات فیزیکی الیاف CFRP و رزین آن

رزین اپوکسی	
Quantom® EPR3301	نام محصول
اپوکسی ۲ جزئی	نوع
۳۰<	مقاومت خمشی و کششی (MPa)
۱.۵	چگالی (kg/lit)
۳.۵< (شکست در بتن)	مقاومت اتصال (MPa)
۷ روز	زمان نگهداری

ورق CFRP	
Quantom® Wrap300c	نام محصول
۰.۱۶۸	ضخامت (mm)
۴۹۵۰	مقاومت کششی (MPa)
۲۳۵	مدول الاستیسیته (GPa)
۱.۸	وزن مخصوص (g/cm ³)

۳-۶ پلیمر های افزودنی به بتن

پلیمر ها، افزودنی‌هایی هستند که در طرح اختلاط با هدف بهبود رفتاری در بتن، به ترکیب افزوده می‌شوند. در این پژوهش با هدف بهبود شکل پذیری بتن، ۳ نمونه پلیمر 303 ASL، 301 SBC و 307 WEB از شرکت پادراپات پارس تهیه گردید.

در ادامه به بیان طرح اختلاط بتن‌های پلیمر دار و کلیاتی راجع به پلیمرها پرداخته شده است و در نهایت منحنی تنش کرنش آن‌ها را ترسیم گردید.

۳-۷ طرح اختلاط بتن های پلیمر دار

پلیمر 301 SBC با نام تجاری Padra bondex SBC 301 یک لاتکس پلیمری بر پایه امولسیون الاستیک استاین بوتادین است. از جمله کاربردهای آن می‌توان به بهبود ویژگی‌های ملات‌ها و بتن‌های پایه سیمانی اشاره کرد. این محصول دارای ۴۰٪ لاتکس و چگالی ۱.۰۱ کیلوگرم بر لیتر می‌باشد و مقدار مصرف مجاز آن بین ۷ تا ۲۵ درصد وزن سیمان پیشنهاد شده است. بنابر توصیه تولید کننده در این پژوهش از حداکثر مقدار مجاز یعنی ۲۵ درصد وزن سیمان در طرح اختلاط استفاده گردید. طرح اختلاط کلیه انواع بتن‌های اصلاح شده با پلیمر، بر اساس مقاومت مشخصه ۲۸ روزه برابر ۳۰ مگاپاسکال تنظیم گردید.

فرضیات اولیه تماماً منطبق بر فرضیات ارائه شده در جدول ۳-۱ با مقاومت مشخصه ۳۰ مگاپاسکال است. سپس طرح اختلاط بتن اصلاح شده با پلیمر 301 SBC در جدول ۳-۷ نشان داده شد.

پس از اختلاط این نوع بتن پلیمر دار، مشاهده گردید مخلوط ساخته شده پف کرده و مقدار زیادی فوم تولید نمود. از آنجا که به توصیه شرکت سازنده، به منظور رسیدن به بهترین عملکرد افزودنی 301 SBC لازم بود تا از حداکثر مقدار مجاز در طرح اختلاط استفاده شود، بنابراین پس از هماهنگی با شرکت سازنده، مقداری ماده آنتی‌فوم تهیه گردید که با نسبت های ۳.۵ و ۵ درصد وزنی پلیمر با آن ترکیب شده و تمامی این محلول بدست آمده بعنوان پلیمر اصلاح کننده بتن 301 SBC در نظر گرفته شد. بنابراین بتن پلیمر دار SBC در ۳ نوع فاقد آنتی‌فوم، حاوی ۳.۵٪ آنتی‌فوم و حاوی ۵٪ آنتی‌فوم ساخته شد و مورد آزمایش قرار گرفت. زین پس به منظور سهولت به ترتیب این نمونه های بتنی را 301 SBC، 301 SBC-D3.5 و 301 SBC-D5 نام گذاری شد.

پلیمر ASL 303 با نام تجاری Padra bondex ASL 303 یک لاتکس پلیمری بر اساس امولسیون آکریلیک استایرن بوده که باعث بهبود چسبندگی ملات‌ها و بتن‌های پایه سیمانی می‌شود. این پلیمر بصورت مایع شیری رنگ که ۳۵ درصد آن را لاتکس و ۶۵ درصد آن را آب تشکیل داده و دارای چگالی ۱.۰۱ کیلوگرم بر لیتر می‌باشد. مقدار مصرف مجاز این پلیمر ها بین ۱۰ تا ۳۰ درصد وزن سیمان است. به توصیه شرکت سازنده، به منظور دستیابی به بهترین عملکرد این نوع افزودنی پلیمری، از حداکثر مقدار مجاز آن یعنی ۳۰ درصد وزن سیمان، در طرح اختلاط استفاده شد.

فرضیات اولیه تماماً منطبق بر فرضیات ارائه شده در جدول ۳-۱ با مقاومت مشخصه ۳۰ مگاپاسکال است. سپس طرح اختلاط بتن اصلاح شده با پلیمر ASL 303 در جدول ۳-۷ نشان داده شد. قابل به ذکر است که در طرح اختلاط مد نظر، مقدار آب موجود در محلول پلیمر، به عنوان تامین کننده بخشی از آب اختلاط در نظر گرفته شده است که در نتیجه، مقدار آب طرح اختلاط کمتر در نظر گرفته شد.

پلیمر WEB 307 یک نوع اپوکسی دو جزئی بر پایه آب می‌باشد که ترکیب آن با ملات و بتن پایه سیمانی باعث بهبود در چسبندگی و مقاومت‌های مکانیکی می‌شود. این محصول دارای ۶۵٪ پلیمر بوده که از ترکیب دو جزء کهربایی و شیری رنگ به نسبت وزنی ۱ به ۱.۲۵ با چگالی مخطوط ۱.۱۲ کیلوگرم بر لیتر به دست می‌آید. مقدار مصرف مجاز این محصول بین ۵ تا ۱۰ درصد وزنی سیمان در نظر گرفته شده است. بر اساس توصیه شرکت سازنده، به منظور دستیابی به حداکثر تاثیر عملکردی افزودنی WEB 307 بر بتن، از حداکثر مقدار مجاز معادل ۱۰ درصد وزنی سیمان استفاده شد.

فرضیات اولیه تماماً منطبق بر فرضیات ارائه شده در جدول ۳-۱ با مقاومت مشخصه ۳۰ مگاپاسکال است. سپس طرح اختلاط بتن اصلاح شده با پلیمر WEB 307 در جدول ۳-۷ نشان داده شد. در طرح اختلاط مد نظر، مقدار آب موجود در محلول پلیمر، بعنوان تامین کننده بخشی از آب اختلاط در نظر گرفته شد. به همین دلیل مقدار آب افزوده شده در این اختلاط کمتر در نظر گرفته شده است.

جدول ۷-۳ طرح اختلاط بتن های اصلاح شده توسط پلیمر

طرح اختلاط بتن های اصلاح شده توسط پلیمر			
نوع پلیمر	SBC 301	ASL 303	WEB 307
سیمان (kg/m^3)	۴۲۲.۲	۴۲۲.۲	۴۲۲.۲
درشت دانه (kg/m^3)	۷۱۷.۲	۷۱۷.۲	۷۱۷.۲
ریز دانه (kg/m^3)	۸۷۰	۸۶۱.۸	۸۸۷.۲
آب (kg/m^3)	۱۶۴.۶	۱۵۲	۲۱۱.۱
روان کننده (kg/m^3)	۰.۸	۰.۸	۰.۸
پلیمر (kg/m^3)	۱۰۵.۵	۱۲۶.۶	۴۲.۲

۸-۳ چیدمان آزمایش تنش کرنش بتن

به منظور دستیابی به مقاومت مشخصه ۲۸ روزه بتن و رسم منحنی تنش کرنش بتن فشاری ، ۳ نمونه استوانه‌ای به قطر ۱۰ سانتیمتر و ارتفاع ۲۰ سانتیمتر از هر طرح اختلاط ساخته شد. سپس مطابق شکل ۳-۱۳ با نصب دو عدد LVDT و قرار دادن نمونه در زیر دستگاه فشار، مقاومت فشاری و تغییر شکل بتن را محاسبه گردید. اگرچه آیین نامه ASTM C469/C469M استفاده از LVDT را الزام ندانسته و صرفاً به استفاده از گیج برای قرائت تغییر شکل‌ها اکتفا می‌کند اما به دلیل خطای انسانی توصیه نمی‌شود [28].

چیدمان تست فشاری از دو عدد رینگ فولادی به صورت تراز و در فاصله یک‌چهارم طول کل نمونه استوانه از طرفین نصب شد. سپس LVDT ها در محل‌های مشخص به رینگ فوقانی متصل شدند. سمت دیگر LVDT ها نیز روی صفحاتی که از قبل بر رینگ زیرین تعبیه شده بود قرار می‌گیرد. به این ترتیب، تغییر شکل محاسبه شده توسط LVDT ها در نیمه میانی نمونه استوانه‌ای است. شکل ۳-۱۳ چیدمان تست مقاومت فشاری، چگونگی قرار گیری رینگ‌ها و موقعیت LVDT را نشان می‌دهد.



شکل ۳-۱۳ ستاپ تست مقاومت فشاری بتن

پس از انجام تست‌های فشاری، اطلاعات ارائه شده توسط دیتالاگر شامل نیرو و تغییر شکل را توسط روابط (۳-۱) و (۳-۲) به ترتیب به تنش و کرنش تبدیل شد. در نهایت مدول الاستیسیته از رابطه (۳-۳) محاسبه گردید.

$$\sigma = P/A \quad (۳-۱)$$

$$\varepsilon = d/l \quad (۳-۲)$$

$$E = (S_2 - S_1)/(\varepsilon_2 - 0.000050) \quad (۳-۳)$$

σ : تنش

ε : کرنش

E: مدول الاستیسیته

S_2 : تنش متناظر با ۴۰٪ بار نهایی

S_1 : تنش متناظر با کرنش طولی پنجاه-میلیونیم

ε_2 : کرنش متناظر با ۴۰٪ بار نهایی

۳-۹ آزمایش و رسم منحنی تنش-کرنش

مجموعاً ۱۸ نمونه استوانه بتنی با قطر ۱۰ سانتیمتر و ارتفاع ۲۰ سانتیمتر ساخته شد. ۱۸ نمونه‌ی ساخته شده در ۶ گروه و با ۶ طرح اختلاط متفاوت، که هر گروه دارای سه نمونه استوانه‌ای می‌باشند، دسته بندی شدند. ۶ گروه مورد آزمایش شامل ۵ گروه بتن پلیمردار به همراه یک گروه بتن معمولی می‌باشد. ساخت تمامی نمونه ها کاملاً منطبق با طرح اختلاط‌های ذکر شده در بند ۳-۷ برای بتن‌های پلیمردار و جدول ۳-۲ برای نمونه بتن معمولی با مقاومت مشخصه ۳۰ مگاپاسکال بود و سپس نمونه‌ها به مدت ۲۸ روز داخل استخر آب نگهداری شدند. شکل ۳-۱۴ تمامی نمونه‌ها را در یک قاب نشان می‌دهد.



شکل ۳-۱۴ نمونه های استوانه‌ای بتن پلیمردار

پس از گذشت ۲۸ روز و سپری شدن مراحل ساخت و نگهداری^۱ نمونه‌های استوانه‌ای آماده انجام تست فشاری می‌شوند. بنابراین همان‌طور که در بند ۳-۸ مفصل چیدمان آزمایش توضیح داده شد، دو عدد رینگ در فاصله‌ی ۵ و ۱۵ سانتیمتری از سطح استوانه (یک-چهارم طول کل از هر طرف) به صورت کاملاً افقی و تراز قرار گرفته و توسط پیچ‌های تثبیت کننده به استوانه متصل می‌شوند. سپس دو عدد LVDT در طرفین قرار گرفته که تغییر شکل‌ها را در نیمه میانی استوانه که معادل ۱۰ سانتیمتر می‌باشد، برداشت کند. در نهایت کل مجموعه زیر جک فشاری قرار گرفته و آزمایش فشاری آغاز می‌شود.

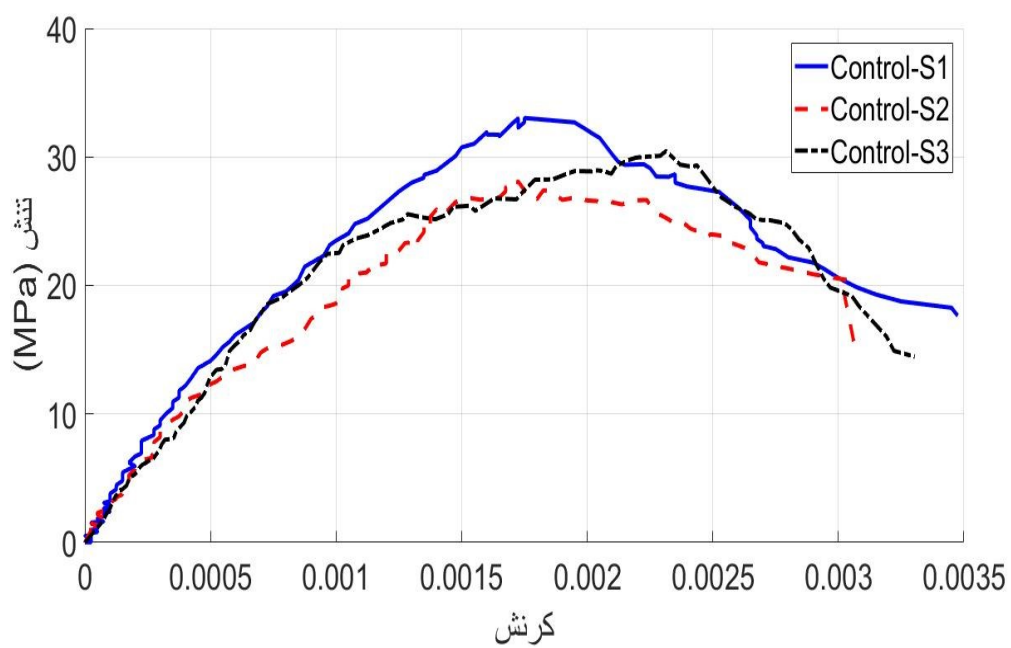
شکل ۳-۱۵ یک نمونه استوانه‌ای را همراه با مجموعه‌ی کامل چیدمان آزمایش شامل رینگ‌ها، LVDT و جک فشاری نشان می‌دهد.



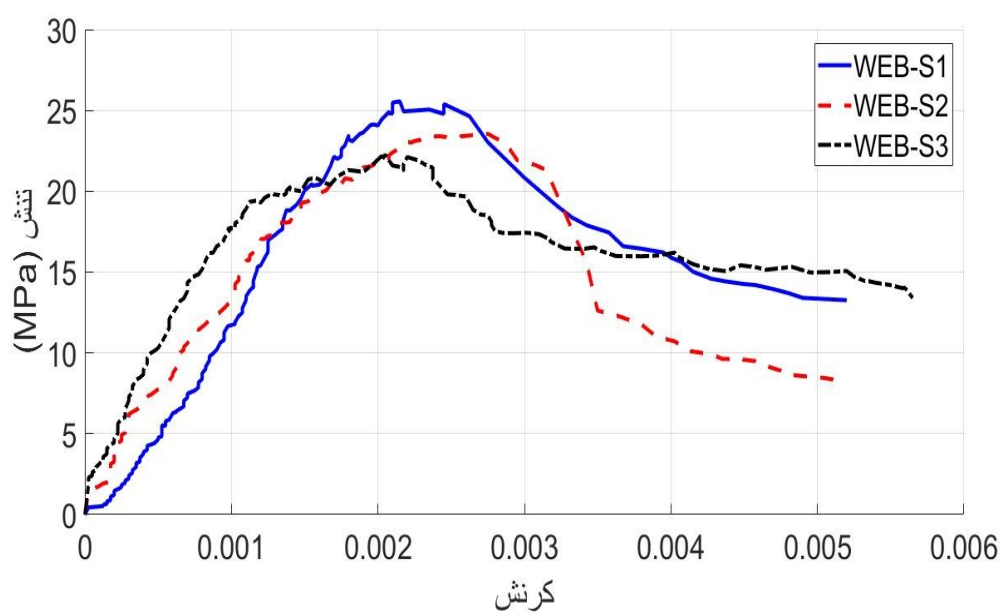
شکل ۳-۱۵ تست فشاری نمونه‌های استوانه‌ای بتن پلی‌مردار

پس از شکست نمونه‌های استوانه‌ای و اتمام مراحل آزمایش، اطلاعات بدست آمده به کمک روابط (۳-۱) و (۳-۲) به تنش و کرنش تبدیل گشت. سپس نمودارهای تنش کرنش هر گروه به طور مجزا ترسیم گردید. شکل ۳-۱۶ الی شکل ۳-۲۱ منحنی تنش کرنش نمونه‌های هر گروه مورد آزمایش را نشان می‌دهد.

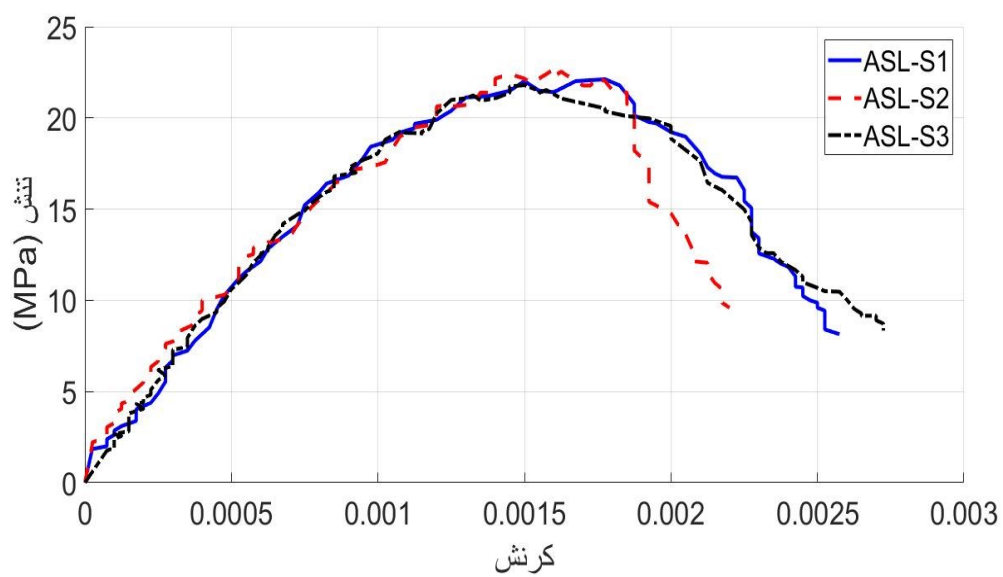
¹ curing



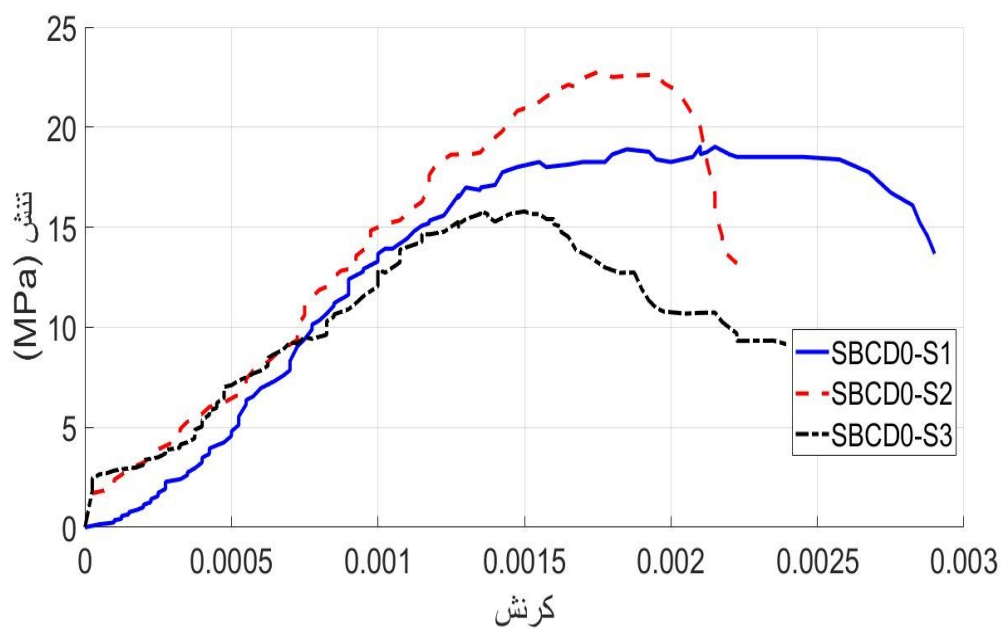
شکل ۳-۱۶ منحنی تنش کرنش گروه کنترل



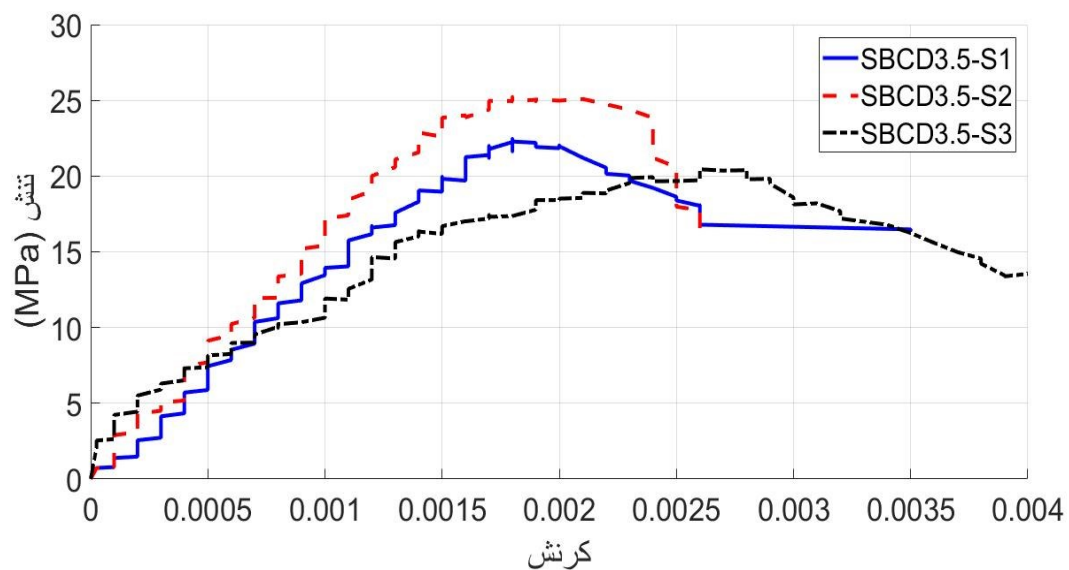
شکل ۳-۱۷ منحنی تنش کرنش گروه WEB307



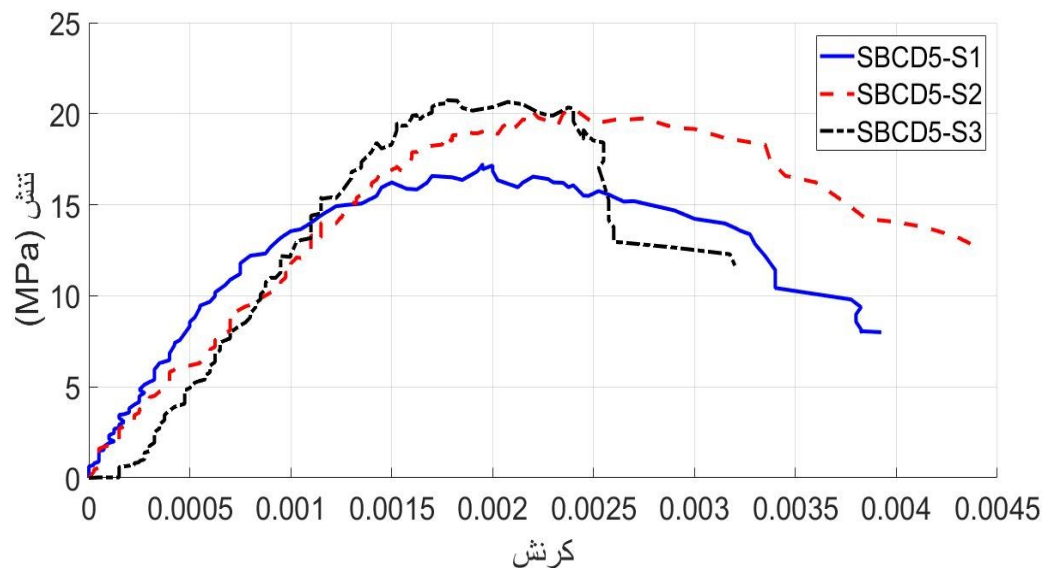
شکل ۳-۱۸ منحنی تنش کرنش گروه ASL303



شکل ۳-۱۹ منحنی تنش کرنش مجموعه SBC فاقد ضدفوم



شکل ۳-۲۰ منحنی تنش کرنش گروه SBC دارای ۳.۵٪ ضدفوم



شکل ۳-۲۱ منحنی تنش کرنش گروه SBC دارای ۵٪ ضدفوم

پس از رسم منحنی تنش کرنش هر گروه آزمایشی، به مقایسه نتایج بین آن‌ها پرداخته شد. جدول ۳-۸ نتایج حاصل از تست گروه‌های مختلف را نشان می‌دهد.

جدول ۳-۸ نتایج حاصل از منحنی تنش کرنش گروه های مورد آزمایش

نام گروه	نمونه	تنش حداکثر (MPa)	کرنش در حداکثر تنش	کرنش گسیختگی	مدول الاستیسیته (MPa)	میانگین تنش حداکثر (MPa)	میانگین کرنش در حداکثر تنش	میانگین کرنش گسیختگی	میانگین مدول الاستیسیته
Control	۱	۳۳.۰۳	۰.۰۰۱۸	۰.۰۰۳۵	۳۱۹۷۹.۵۶	۳۰.۵۳	۰.۰۰۱۹	۰.۰۰۳۳	۲۵۹۶۷.۶۴
	۲	۲۸.۰۹	۰.۰۰۱۷	۰.۰۰۳۱	۲۵۰۶۳.۱۶	-	-	-	-
	۳	۳۰.۴۶	۰.۰۰۲۳	۰.۰۰۳۳	۲۵۲۳۶.۱۱	-	-	-	-
WEB 307	۱	۲۵.۵۶	۰.۰۰۰۲	۰.۰۰۵۲	۱۱۴۶۷.۳	۲۳.۷۹	۰.۰۰۲۳	۰.۰۰۵۳	۱۴۳۷۱.۱۹
	۲	۲۳.۵۵	۰.۰۰۲۸	۰.۰۰۵۱	۱۳۱۰۴.۷۱	(-۲۲.۱) ^a	(+۲۱) ^b	(+۶۰.۶) ^b	(-۴۴.۶) ^c
	۳	۲۲.۲۶	۰.۰۰۲۱	۰.۰۰۵۶	۱۸۵۴۱.۵۷	-	-	-	-
ASL 303	۱	۲۲.۱۲	۰.۰۰۱۷	۰.۰۰۲۶	۱۸۰۷۲.۳۲	۲۲.۱۹	۰.۰۰۱۶	۰.۰۰۲۵	۲۰۴۶۷.۴
	۲	۲۲.۶۶	۰.۰۰۱۶	۰.۰۰۲۲	۲۰۶۸۵.۲۵	(-۲۷.۳)	(-۱۵.۸)	(-۲۴.۲)	(-۲۱.۲)
	۳	۲۱.۸	۰.۰۰۱۵	۰.۰۰۲۷	۲۲۶۴۴.۶۳	-	-	-	-
SBC-D0	۱	۱۹.۰۲	۰.۰۰۲۲	۰.۰۰۲۹	۱۱۸۴۵.۳۵	۱۹.۱۹	۰.۰۰۱۸	۰.۰۰۲۵	۱۰۷۰۲.۸۵
	۲	۲۲.۷۶	۰.۰۰۱۸	۰.۰۰۲۲	۱۱۳۰۹.۰۸	(-۳۷.۱)	(-۵.۳)	(-۲۴.۲)	(-۵۸.۸)
	۳	۱۵.۷۹	۰.۰۰۱۴	۰.۰۰۲۴	۸۹۵۴.۱۱	-	-	-	-
SBC-D3.5	۱	۲۲.۴۶	۰.۰۰۱۸	۰.۰۰۳۴	۲۲۲۷۳.۸۲	۲۲.۷۱	۰.۰۰۲۱	۰.۰۰۳۳	۱۴۲۸۰.۰۵
	۲	۲۵.۲۳	۰.۰۰۱۸	۰.۰۰۲۶	۲۳۶۰۷.۲۴	(-۲۵.۶)	(+۸.۸)	(۰)	(-۴۵)
	۳	۲۰.۴۵	۰.۰۰۲۶	۰.۰۰۳۹	۲۱۲۵۲.۰۱	-	-	-	-
SBC-D5	۱	۱۷.۲۱	۰.۰۰۰۲	۰.۰۰۳۹	۱۹۴۹۷.۸	۱۹.۴۱	۰.۰۰۲۱	۰.۰۰۳۸	۱۳۵۲۹.۵۵
	۲	۲۰.۲۹	۰.۰۰۲۴	۰.۰۰۴۴	۲۱۱۶۸.۷۷	(-۳۶.۴)	(+۸.۸)	(+۱۵.۱)	(-۴۷.۹)
	۳	۲۰.۷۴	۰.۰۰۱۸	۰.۰۰۳۲	۲۱۴۰۴.۳۸	-	-	-	-

(a) درصد تغییرات میانگین تنش حداکثر نمونه نسبت به میانگین نمونه کنترل

(b) درصد تغییرات میانگین کرنش نمونه‌ها نسبت به میانگین نمونه کنترل

(c) درصد تغییرات میانگین مدول الاستیسیته نمونه نسبت به میانگین نمونه کنترل

از بررسی نتایج تست فشاری نمونه‌های استوانه‌ای، مشاهده می‌گردد تمام نمونه‌ها با کاهش شدید در حداکثر تنش و مدول الاستیسیته نسبت به نمونه بتن معمولی همراه هستند. از طرف دیگر، کرنش گسیختگی نمونه WEB307 و SBC-D5 نسبت به بتن معمولی به ترتیب ۶۰.۶٪ و ۱۵.۱٪ افزایش داشت. به علاوه، کمترین و بیشترین کاهش تنش به ترتیب به نمونه‌های WEB307 و SBC-D0 با ۲۲.۱٪ و ۳۷.۱٪ کاهش نسبت به بتن معمولی اختصاص داشت. همچنین، در مقایسه مدول الاستیسیته نمونه‌های ASL303 و SBC-D0 به ترتیب با ۲۱.۲٪ و ۵۸.۸٪ کاهش نسبت به بتن معمولی، بیشترین و کمترین مدول الاستیسیته را بین نمونه‌های بتنی اصلاح شده با پلیمر دارند.

۳-۱۰ شکل‌پذیری

از مهم‌ترین اصول طراحی سازه، تامین شکل‌پذیری است. چرا که فارغ از ظرفیت باربری، از هر عضو سازه‌ای انتظار می‌رود وقوع شکست و تخریب را به منظور تامین ایمنی و بهسازی هشدار دهد. این اصل مهم در تیرهایی که از میلگرد کششی فولادی استفاده می‌شود، توسط ناحیه تسلیم میلگرد کششی تامین می‌شد که با طراحی بر اساس شکست خمشی در میلگرد فولادی کششی مهیا می‌گردد.

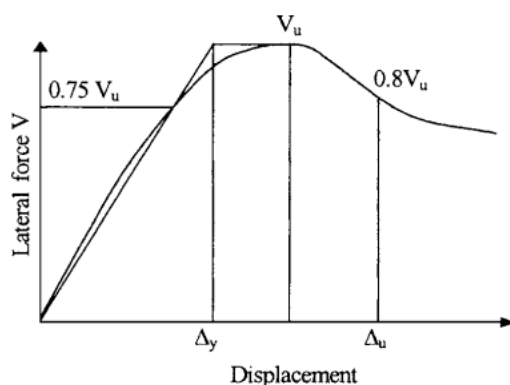
در این پژوهش، به دلیل آنکه میلگردهای FRP رفتاری الاستیک و کاملاً ترد شکن دارند، تامین شکل‌پذیری تیرها به عهده بتن فشاری است. بنابراین می‌توان با استفاده از منحنی تنش-کرنش بدست آمده از شکست نمونه‌های بتنی استوانه‌ای، تاثیر آن‌ها را در شکل‌پذیری تخمین زد. سپس در صورت بهبود شکل‌پذیری، اقدام به ساخت تیرهای بتنی پلیمردار مسلح به میلگرد FRP کرد.

برای مقایسه ظرفیت شکل‌پذیری، از شاخص μ استفاده شد. شاخص μ که برای محاسبه شکل‌پذیری تیرهای بتنی استفاده می‌شود، از تقسیم تغییر مکان نهایی (δ_u) بر تغییر مکان متناظر با تسلیم آرماتور (δ_y) مطابق رابطه (۳-۴) حاصل می‌گردد. به دلیل اینکه در آزمایش انجام گرفته، تغییر مکان جای خود را به کرنش داده است و منحنی تنش-کرنش محاسبه گردیده، بنابراین برای محاسبه ظرفیت شکل‌پذیری نمونه‌های استوانه‌ای، از تقسیم کرنش نهایی (ϵ_u) بر کرنش متناظر با تسلیم (ϵ_y) مطابق رابطه (۳-۵) استفاده گردید.

$$\mu = \delta_u / \delta_y \quad (۳-۴)$$

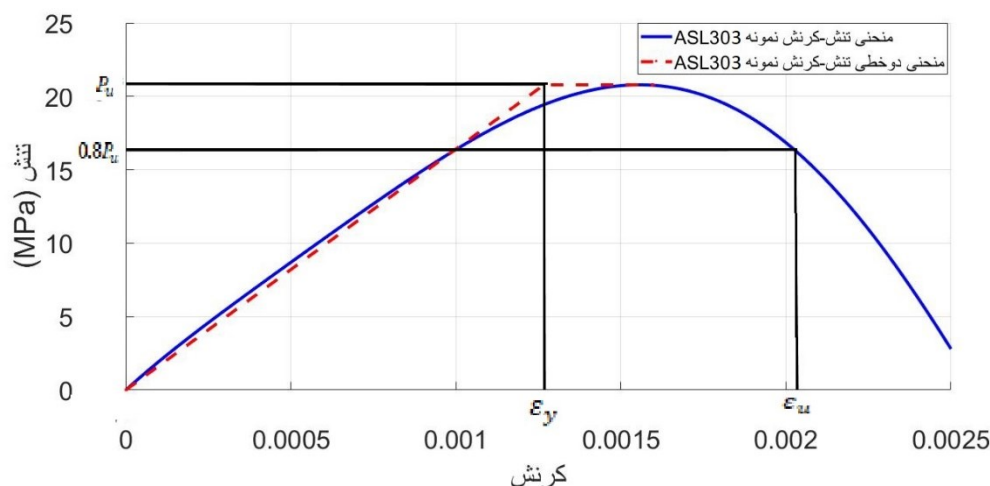
$$\mu = \epsilon_u / \epsilon_y \quad (۳-۵)$$

در رابطه (۳-۵) کرنش نهایی، در ناحیه نزولی منحنی تنش کرنش، در نقطه‌ای در نظر گرفته می‌شود که تنش در آن نقطه نسبت به تنش حداکثر، ۲۰ درصد کاهش پیدا کرده باشد. برای تعیین کرنش متناظر با تسلیم از روش پارک و پاولی که به منظور ایده آل سازی منحنی بار- تغییر مکان پیشنهاد شده، استفاده گردید. در این روش منحنی ایده آل بار- تغییر مکان مطابق شکل ۳-۲۲ ترسیم شده و تغییر مکان متناظر با تسلیم آرماتور (δ_y) بدست می‌آید [29].



شکل ۳-۲۲ روش دوخطی برای تعیین شکل پذیری [30]

در شکل ۳-۲۳ نمودار یکی از نمونه‌ها که با استفاده از روش پارک و پاولی به منحنی ایده آل دو خطی تنش کرنش تبدیل شده را به عنوان نمونه نشان داده و صرفاً به نتایج حاصل از نمودار در جدول ۳-۹ اکتفا شده است.



شکل ۳-۲۳ منحنی ایده آل تنش کرنش نمونه ASL303

در محاسبه انرژی مستهلک شده توسط نمونه‌های استوانه‌ای، سطح زیر نمودار منحنی بار تغییر مکان تا رسیدن به مقاومت ۸۰٪ مقاومت نهایی در شاخه دوم منحنی، محاسبه گردید.

جدول ۳-۹ مقایسه مقادیر شکل پذیری و استهلاک انرژی نمونه ها

گروه ها	نمونه ها	$\mu = \varepsilon_u / \varepsilon_y$ هر نمونه	استهلاک انرژی نمونه (kN.mm)	$\mu = \varepsilon_u / \varepsilon_y$ گروه	استهلاک انرژی گروه (kN.mm)
Control	۱	۱.۸	۴۶.۸۱	۱.۸۸	۴۵.۳۱
	۲	۱.۷۷	۴۱.۱۷	-	-
	۳	۲.۰۶	۴۷.۹۶		
WEB 307	۱	۱.۵۸	۳۸.۷۰	۱.۹۱	۳۹.۴۶
	۲	۱.۸۸	۴۳.۱۵	(/+.۱.۶) ^a	(/-.۱۲.۹) ^b
	۳	۲.۲۷	۳۶.۵۴		
ASL 301	۱	۱.۸۵	۲۵.۹۲	۱.۷۵	۲۵.۰۲
	۲	۱.۵۵	۲۲.۸۵	(/-.۶.۹)	(/-.۴۴.۸)
	۳	۱.۸۵	۲۵.۵۵		
SBC-D0	۱	۱.۹۷	۲۶.۲۹	۱.۵۹	۲۱.۶۵
	۲	۱.۳۵	۲۳.۴۵	(/-.۱۵.۴)	(/-.۵۲.۲)
	۳	۱.۴۴	۱۵.۲۱		
SBC-D3.5	۱	۱.۵۴	۲۹.۲۶	۱.۷۱	۳۳.۹۹
	۲	۱.۶۱	۳۲.۷۱	(/-.۹)	(/-.۲۵)
	۳	۱.۹۸	۴۰.۰۰		
SBC-D5	۱	۲.۵۹	۳۲.۸۲	۲.۰۶	۳۳.۶۱
	۲	۲.۰۴	۴۱.۵۱	(/+.۹.۵)	(/-. ۲۵.۸)
	۳	۱.۵۳	۲۶.۴۹		

(a) درصد تغییرات شکل پذیری گروه نسبت به گروه کنترل

(b) درصد تغییرات استهلاک انرژی گروه نسبت به گروه کنترل

بر اساس مقایسه صورت گرفته در جدول ۳-۹ مشخص گشت نمونه SBC-D5 با ۹.۵ درصد افزایش، شکل پذیری بتن را به بهبود بخشید. از طرف دیگر، در این نمونه کاهش ۲۵.۸ درصدی در استهلاک انرژی ناشی از افت ۳۶.۴ درصد مقاومت مشاهده می‌شود. همچنین نمونه WEB 307 با افزایش ناچیز ۱.۶ درصد در شکل پذیری به همراه کاهش ۱۲.۹٪ در استهلاک انرژی در کنار نمونه SBC-D5 تنها نمونه‌هایی هستند که شکل پذیری آنها نسبت به بتن معمولی بیشتر بود. دیگر نمونه‌ها به ترتیب ASL 303، SBC-D3.5 و SBC-D0 با کاهش شکل پذیری و استهلاک انرژی همراه بودند.

از طرف دیگر هنگام مقایسه استهلاک انرژی، مشاهده شد تمامی نمونه‌ها انرژی کمتری نسبت به نمونه بتن مرسوم مستهلک نمودند. این کاهش استهلاک انرژی در نمونه SBC-D0 با ۵۲.۲٪ کاهش نسبت به بتن معمولی، کمترین استهلاک انرژی و نمونه WEB 307 با کاهش ۱۲.۹٪ استهلاک انرژی نسبت به بتن معمولی، بیشترین استهلاک انرژی را بین نمونه‌های پلیمردار داشتند.

در نتیجه، با صرف نظر از افزایش ناچیز شکل پذیری نمونه WEB 307 تنها نمونه ای که شکل پذیری را بهبود بخشید، نمونه SBC-D5 می‌باشد. اگرچه این نمونه ۹.۵٪ شکل پذیری را افزایش داد، اما کاهش ۲۵.۸٪ استهلاک انرژی و کاهش ۳۶.۴٪ مقاومت نهایی این نمونه نسبت به بتن معمولی، سبب گشت تا استفاده از این نمونه توجیه پذیر نباشد.

فصل ۴ آزمایش های نهایی و تحلیل نتایج

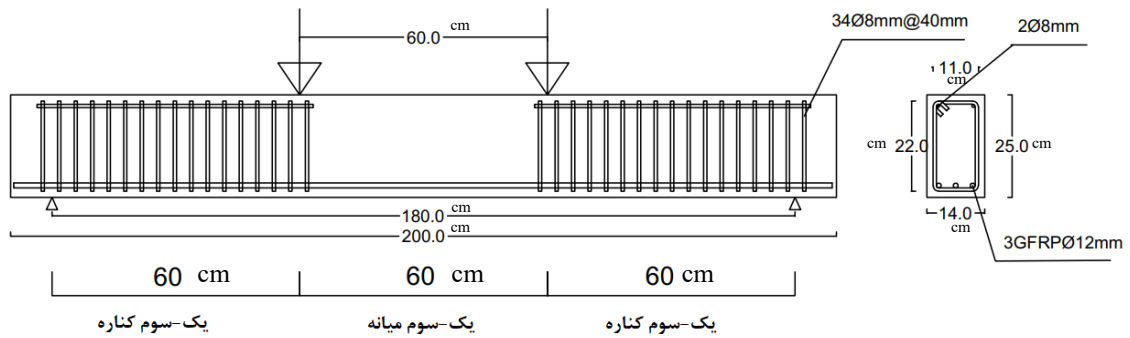
۴-۱ مقدمه

پس از بررسی آزمایشگاهی اثر افزودنی در عملکرد بتن و تاثیر ناچیز آن در ارتقاء شکل پذیری مصالح، رویکرد ایجاد محصور شدگی برای بتن فشاری مورد استفاده قرار گرفت. در این فصل به بررسی شکل پذیری تیرهای بتنی مسلح به میلگرد GFRP با اعمال تغییرات در نحوه ساخت پرداخته شده است. بنابراین در این بخش از پژوهش، با استفاده از اثر محصور شدگی و ایجاد تغییرات رفتاری در بتن فشاری، شکل پذیری تیر بتنی بهبود داده می‌شود.

۴-۲ مشخصات تیرها

پیش از ساخت نمونه‌های اصلی آزمایش، با هدف بررسی عملکرد تیرهای بتنی مسلح به میلگرد GFRP، ۲ عدد تیر به عنوان نمونه اولیه با عرض ۱۵ سانتیمتر، ارتفاع ۲۰ سانتیمتر و طول دهانه ۱۰۵ سانتیمتر تحت خمش ۴ نقطه قرار گرفت که جزئیات و نتایج حاصل از آزمایش این دو نمونه در پیوست پرداخته شده است. پس از بررسی نمونه‌های اولیه، طراحی نمونه‌های آزمایش اصلاح گردید. بنابراین تعداد ۸ نمونه تیر بتنی دارای مقطع به عرض ۱۴ سانتیمتر و ارتفاع ۲۵ سانتیمتر همراه با طول ۲ متر و دهانه ۱۰۸ متر مسلح به ۳ عدد میلگرد کششی GFRP به قطر ۱۲ میلیمتر و ۲ عدد میلگرد فشاری فولادی با قطر ۸ میلیمتر در یک‌سوم کناری ساخته شد. محل اعمال بار در کلیه نمونه‌ها در یک‌سوم میانه و به فاصله ۶۰ سانتیمتر از محل تکیه‌گاه می‌باشد.

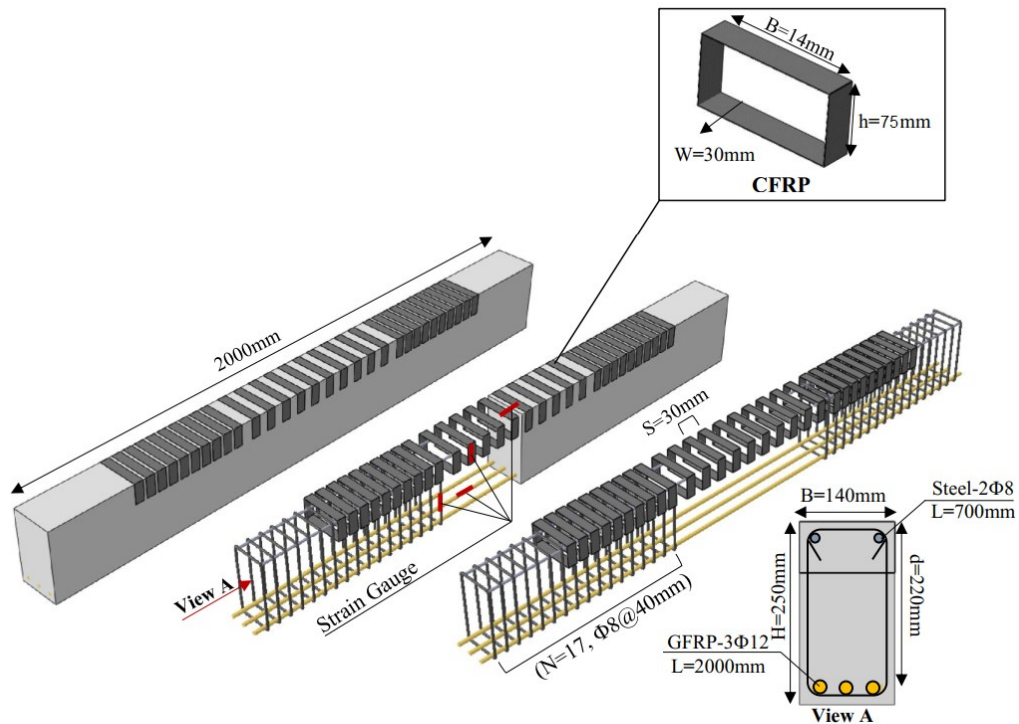
به منظور جلوگیری از شکست برشی در یک‌سوم‌های کناری، ضرورت بر استفاده از خاموت می‌باشد. به دلیل آنکه در شرایط فعلی، امکان ساخت خاموت با میلگرد GFRP توسط شرکت سازنده میسر نبود، به ناچار از ۱۷ عدد خاموت بسته، ساخته شده با میلگرد فولادی با قطر ۸ میلیمتر و به فاصله ۴ سانتیمتر از یکدیگر، در هر یک‌سوم کناری استفاده گردید. شکل ۴-۱ تصویر شماتیک از ابعاد، محل قرار گیری میلگردها و همچنین ناحیه‌های یک‌سوم کناری و یک‌سوم میانه و شکل ۴-۲ تصویر سه بعدی نمونه‌ها را نشان می‌دهد.



شکل ۴-۱ تصویر شماتیک جانمایی میلگردها در تیرها

نمونه‌های ساخته شده بر اساس نوع محصورشدگی در چهار گروه طبقه بندی می‌شوند:

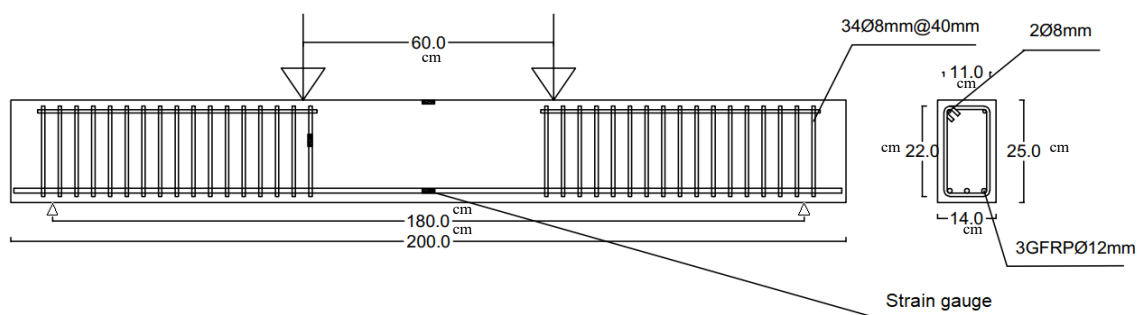
- ۱- نمونه تیر کنترل فاقد محصورشدگی
- ۲- گروه دارای محصورشدگی ناپیوسته و منقطع
- ۳- گروه دارای محصورشدگی ناپیوسته و مارپیچ
- ۴- گروه دارای محصورشدگی پیوسته و مارپیچ



شکل ۴-۲ تصویر شماتیک سه بعدی نمونه محصور شده

۴-۲-۱ نمونه تیر کنترل فاقد محصور شدگی

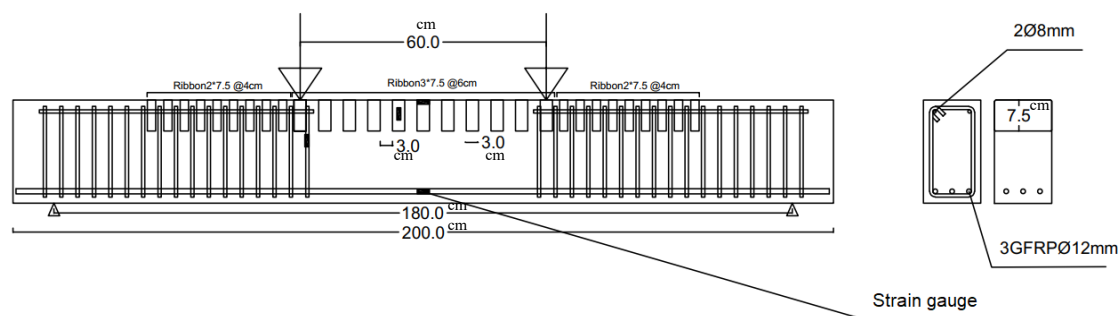
شامل یک نمونه تیر فاقد محصور شدگی که به منظور مقایسه و سنجش اثر محصور شدگی در دیگر نمونه‌ها ساخته و مورد آزمایش قرار گرفت. مطابق شکل ۴-۳ نمونه تیر کنترل دارای ۳ عدد میلگرد GFRP به قطر ۱۲ میلیمتر در ناحیه کششی، تعداد مجموعاً ۳۴ عدد خاموت فولادی (هر طرف ۱۷ عدد)، دو عدد میلگرد فولادی در هر طرف در ناحیه فشاری که به منظور ثابت نگه داشتن خاموت‌ها مورد استفاده قرار گرفت و سه عدد کرنش سنج جهت تعیین کرنش میلگرد کششی، خاموت و بتن فشاری در محل‌های مشخص نصب شدند.



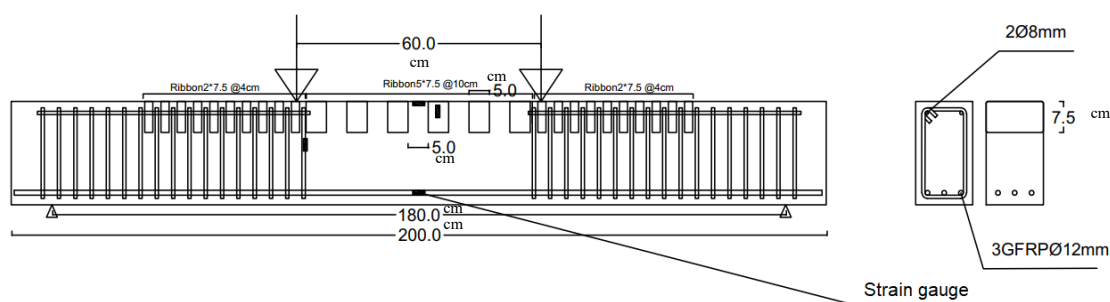
شکل ۴-۳ تصویر شماتیک نمونه کنترل

۴-۲-۲ گروه دارای محصور شدگی ناپیوسته و منقطع

شامل دو نمونه تیر به نام‌های R.D.3 و R.D.5 می‌باشد. در نام‌گذاری این گروه، حرف اول (R) بیان‌گر محصور شدگی توسط نوارهای قائم، حرف دوم (D) نشان دهنده منقطع بودن نوارها و حرف سوم عرض نوار را بر حسب سانتیمتر نشان می‌دهد. همانطور که در شماتیک ارائه شده در شکل ۴-۴ و شکل ۵-۴ نشان داده شده است، میلگردهای کششی GFRP، خاموت‌ها و میلگردهای ناحیه فشاری کاملاً منطبق با نمونه کنترل جانمایی شده اند. محصور شدگی در یک‌سوم میانی این تیرها به ترتیب توسط نوارهای CFRP با عرض ۳ و ۵ سانتیمتر با فاصله داخل به داخل به ترتیب ۳ و ۵ سانتیمتر تامین گردید. در یک‌سوم کناری نیز به دلیل وجود خاموت‌ها و محدودیت ابعادی موجود، هر دو نمونه توسط نوارهایی با عرض ۲ سانتیمتر و به فاصله داخل به داخل ۲ سانتیمتر محصور شدند. نوارهای CFRP ارتفاع ۷.۵ سانتیمتر از بالای مقطع را پوشش می‌دهند. در نهایت، تعداد ۴ عدد کرنش سنج در بتن فشاری، میلگرد کششی، خاموت و نوار CFRP به منظور تعیین کرنش آن‌ها، در محل‌های مشخص نصب شد.



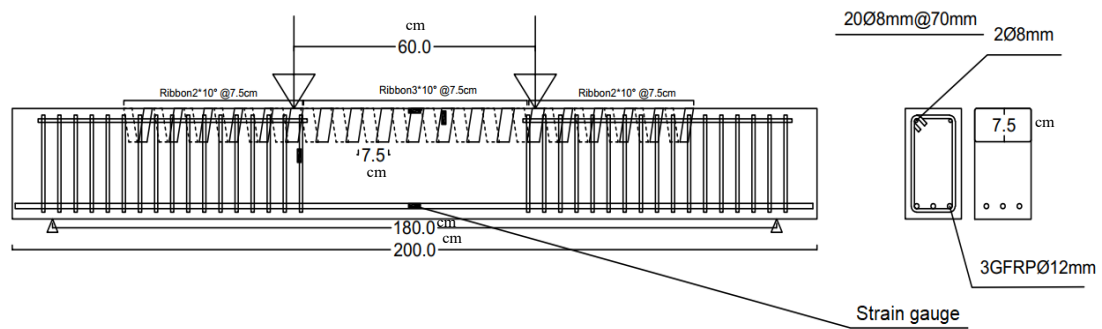
شکل ۴-۴ تصویر شماتیک نمونه R.D.3



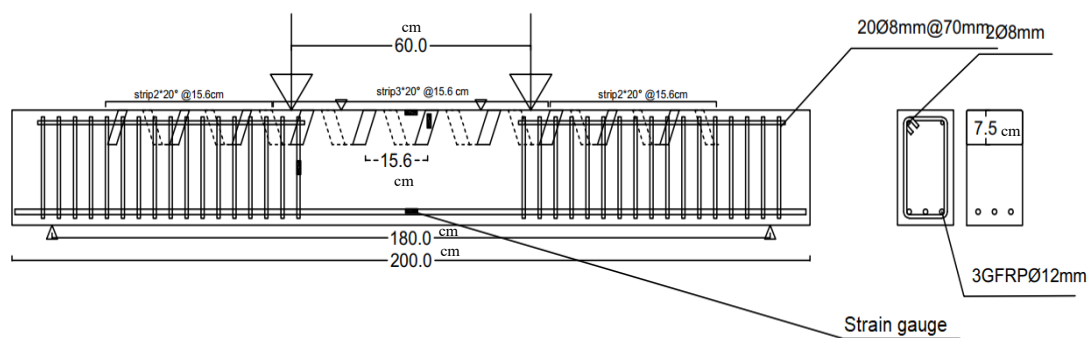
شکل ۴-۵ تصویر شماتیک نمونه R.D.5

۴-۲-۳ گروه دارای محصور شدگی ناپیوسته و مارپیچ

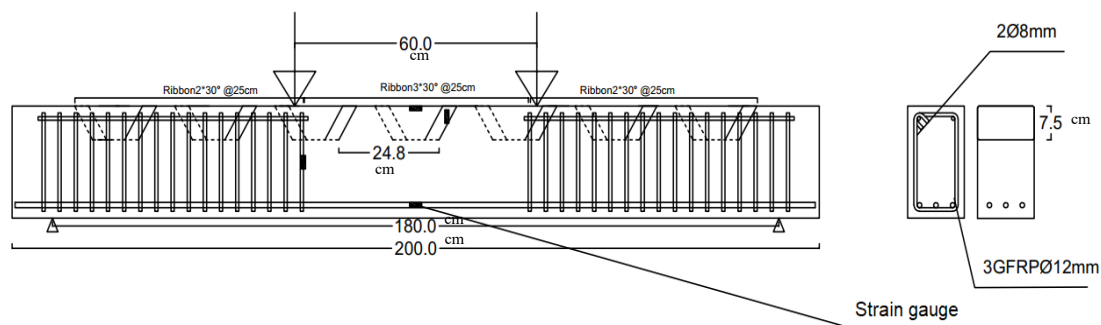
شامل سه نمونه تیر به نام‌های S.D.10 و S.D.20 و S.D.30 می‌باشد. در نام گذاری این نمونه‌ها، حرف اول (S) نشان دهنده مارپیچ بودن نوارها، حرف دوم (D) بیان گر منقطع بودن نوارها و عدد انتهایی زاویه نوارهای محصور کننده را با خط قائم نشان می‌دهد. در هر سه نمونه، کلیه آرماتور بندی‌ها مطابق نمونه کنترل صورت گرفت و همچنین در هر سه نمونه، یک سوم میانی توسط نوارهای به عرض ۳ سانتیمتر و یک سوم کناری توسط نوارهای به عرض ۲ سانتیمتر محصور شدند. تفاوت بین این سه نمونه در زاویه قرار گیری نوارها است که به ترتیب با زاویه ۱۰، ۲۰ و ۳۰ درجه به صورت مارپیچ پیچیده شدند. در نهایت، ۴ عدد کرنش سنج به منظور تعیین کرنش بتن فشاری، میلگرد کششی، خاموت و نوار CFRP در محل‌های مشخص نصب شد. شکل ۴-۶، شکل ۴-۷ و شکل ۴-۸ تصویر شماتیک این سه نمونه را نشان می‌دهد.



شکل ۴-۶ تصویر شماتیک نمونه S.D.10



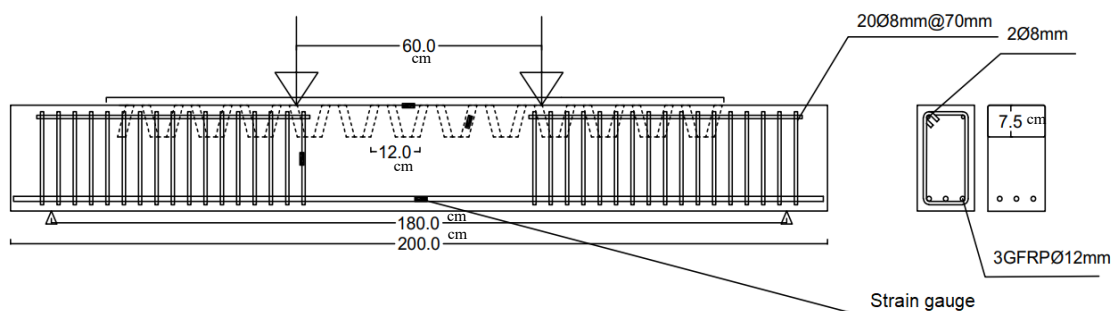
شکل ۴-۷ تصویر شماتیک نمونه S.D.20



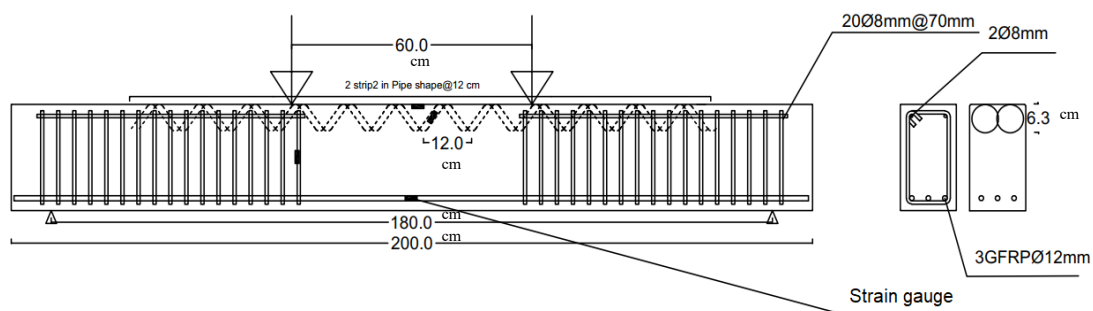
شکل ۴-۸ تصویر شماتیک نمونه S.D.30

۴-۲-۴ گروه دارای محصور شدگی پیوسته و مارپیچ

این گروه شامل ۲ نمونه تیر به نام‌های S.C.cube و S.C.pipe می‌باشد. در نام گذاری این نمونه‌ها حرف اول (S) نشان دهنده مارپیچ بودن محصور شدگی، حرف دوم (C) بیان گر پیوسته بودن نوارها و کلمه انتهایی نشان دهنده شکل محصور شدگی (مکعب یا استوانه) است. در هر دو نمونه چیدمان آرماتوربندی کاملاً مطابق با نمونه کنترل صورت گرفت. از طرف دیگر، هر دو نمونه توسط نوارهای با عرض ۲ سانتیمتر و به فاصله داخل به داخل ۱۰ سانتیمتر محصور شدند. تفاوت حائز اهمیت بین این گروه با گروه‌های دیگر در پیوستگی نوار است. در این گروه، نوارها پیش از بتن ریزی به قالب مشخص توسط رزین شکل گرفته و سپس در ناحیه فشاری بتن قرار داده شدند. شکل نوارهای محصور کننده در نمونه S.C.cube به صورت مکعبی با ابعاد مقطع 14×7.5 سانتیمتر بوده و در نمونه S.C.pipe از ۲ عدد قالب استوانه‌ای به قطر ۶.۳ سانتیمتر استفاده شد. این نوارها پس از شکل‌گیری، در ناحیه فشاری تیر در هم تابیده شدند. شکل ۴-۹ و شکل ۴-۱۰ به ترتیب تصویر شماتیک نمونه‌های S.C.cube و S.C.pipe را به نشان می‌دهد.



شکل ۴-۹ تصویر شماتیک نمونه S.C.cube



شکل ۴-۱۰ تصویر شماتیک نمونه S.C.pipe

جدول ۴-۱ شرح مختصر مشخصات محصور شدگی نمونه‌ها را نشان می‌دهد.

جدول ۴-۱ شرح مختصر مشخصات محصور شدگی نمونه‌ها

گروه‌ها	نام نمونه	ورق CFRP در یک- سوم کناری (cm)		ورق CFRP در یک- سوم میانه (cm)		پیوستگی نوارها
		فاصله نوارها	عرض نوارها	فاصله نوارها	عرض نوارها	
۱	Control	-	-	-	-	فاقد محصور شدگی
۲	R.D.3	۴	۲	۵	۵	ناپیوسته و موازی
	R.D.5	۴	۲	۳	۳	
۳	S.D.10	۷.۵	۲	۷.۵	۳	ناپیوسته و مارپیچ
	S.D.20	۱۲.۶	۲	۱۲.۶	۳	
	S.D.30	۲۱.۸	۲	۲۱.۸	۳	
۴	S.C.Cube	۱۰	۲	۱۰	۲	پیوسته و مارپیچ
	S.C.Pipe	۱۰	۲	۱۰	۲	

۴-۳ مراحل طراحی

۴-۳-۱ فرضیات اولیه

به دلیل رفتار نامشخص تیر در اثر محصورشدگی‌های متفاوت، فرضیات اولیه طراحی تیر باید به گونه‌ای باشد که نمونه، صرفاً در بتن فشاری واقع در ناحیه یک‌سوم میانه، دچار شکست خمشی شود. طول دهانه تیر بتنی برابر ۱.۸ متر در نظر گرفته شد که در نتیجه ی آن یک‌سوم میانه‌ی دهانه معادل ۰.۶ متر باشد. برش در ناحیه یک‌سوم میانه برابر صفر بوده و کلیه بررسی‌های رفتار خمشی و شکل پذیری در این ناحیه صورت می‌گیرد.

ابعاد مقطع تیر برابر ۲۵ سانتیمتر ارتفاع و به منظور ایجاد محصور شدگی عرض مقطع نیز برابر ۱۴ سانتیمتر در نظر گرفته شد. برای تامین محصور شدگی در مقاطع غیر دایروی نسبت طول به عرض ناحیه محصور شده باید از ۲ کمتر باشد. با فرض ارتفاع ناحیه محصور شده برابر ۷.۵ سانتیمتر عرض مقطع برابر ۱۴ سانتیمتر منطقی به نظر می‌رسید [5].

بتن مصرفی در نمونه‌ها دارای مقاومت مشخصه ۲۵ مگاپاسکال با کرنش ۰.۰۰۳ و مدول الاستیسیته ۲۳۵۰۰ مگاپاسکال فرض گردید. فرضیات اولیه و طرح اختلاط بتن مصرفی منطبق با جدول ۳-۱ و جدول ۳-۲ می‌باشد. همچنین با استفاده از نتایج حاصل از بند ۳-۴-۲ مشخصات میلگرد کششی برابر مقاومت کششی ۱۰۵۸ مگاپاسکال، کرنش نهایی ۰.۰۰۴۱۸ و مدول الاستیسیته ۲۵۳۲۵ مگاپاسکال لحاظ گردید.

۴-۳-۲ طراحی تیر

دو فلسفه طراحی برای شکست خمشی وجود دارد: شکست در ناحیه کششی و شکست در ناحیه فشاری.

تیرهای مسلح به میلگرد کششی فولادی که عمدتاً در سازه‌های معمول مورد استفاده قرار می‌گیرند، به دلیل شکل پذیری فولاد، بصورت شکست در ناحیه کششی طراحی می‌شوند اما در صورتی که هدف استفاده از میلگرد FRP در ناحیه کششی باشد، به دلیل شکست ترد این نوع میلگردها، آیین نامه ACI 440.1R-15 طراحی بر اساس شکست در ناحیه فشاری ترجیح داده می‌شود. با توجه به اینکه امکان اصلاح در عملکرد FRP وجود نداشته اما امکان اعمال تغییرات در بتن میسر می‌باشد، در این پژوهش از فلسفه طراحی بر اساس شکست در ناحیه فشاری استفاده شده است. به این منظور، ضرورت دارد تا درصد آرماتور طراحی بسیار بیشتر از حد بالانس باشد تا از شکست در ناحیه کششی حتی بعد از محصور شدگی جلوگیری شود [4].

پس از طراحی بر اساس آیین نامه ACI 440.1R-15 و پیوست D از آیین نامه ACI 440.2R-17 انتظار می‌رود تیرها در بارگذاری ۱۱ تن دچار شکست در ناحیه فشاری شوند. در این لحظه تنشی معادل ۳۲۵ مگاپاسکال در میلگردهای کششی GFRP ایجاد شده و تار خنثی در فاصله ۷ سانتیمتری از بالای مقطع قرار می‌گیرد [4], [5].

از آنجایی که عملکرد محصور شدگی به روش پیشنهاد شده، قابل پیش بینی نیست، کلیه نتایج بدست آمده از تحلیل‌های فوق، صرفاً به منظور رعایت اطمینان بوده و تفاوت با نتایج واقعی، دور از انتظار نخواهد بود.

۴-۴ مراحل ساخت تیرها

پس از مراحل طراحی، تهیه و تعیین مشخصات مصالح، مراحل ساخت و نگهداری نمونه‌ها آغاز می‌شود.

۴-۴-۱ آرماتور بندی

اولین مرحله برای شروع ساخت تیرهای بتن آرمه، آرماتور بندی است. به این منظور، در ابتدا متناسب با ابعاد طرح، خاموت‌های فولادی به صورت یکنواخت خم داده می‌شوند. سپس با قرار دادن خاموت‌ها در محل‌های مشخص شده روی میلگردهای کششی، با بهره‌گیری از سیم آرماتور بندی، شبکه میلگردها در کنار هم محکم متصل شد. شکل ۴-۱۱ تصویری از چند نمونه تیر پس از آرماتور بندی را نشان می‌دهد.

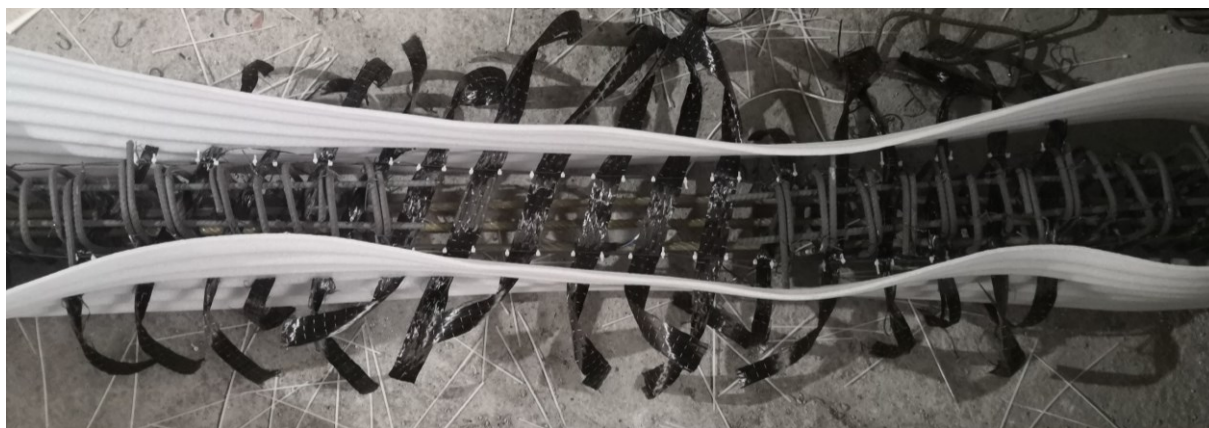


شکل ۴-۱۱ چند نمونه تیر آرماتور بندی شده

۴-۲-۴ جانمایی نوار های CFRP

پس از تکمیل آرماتور بندی، نوارهای CFRP در طول و عرض های مشخص، برش خورده و در محل های مورد نظر قرار می گیرد. از آنجا که نوارهای CFRP باید در فاصله ۷.۵ سانتیمتر از بالای مقطع، قرار گیرند، نیازمند نگهدارنده هایی بوده که نوارها را در ارتفاع مذکور ثابت نگه دارد. به منظور دستیابی به این مهم، از دو رشته سیم آرماتور در فاصله مشخص استفاده شد، نوارها بر اساس جانمایی های تعیین شده در طرح شماتیک، از میان سیم ها عبور کرده و محکم شدند.

حائز اهمیت است که نوارهای CFRP تنها در محل تار خنثی در بتن غرق شوند و سه ضلع دیگر پس از گیرش بتن، توسط رزین اطراف ناحیه فشاری تیر را محصور کنند. به منظور ممانعت از غرق شدن این نوارها درون بتن، از پلی فوم استفاده گردید. پلی فوم صفحاتی انعطاف پذیر و محکم است که در اطراف قالب قرار داده شد و نوارهای CFRP یک به یک از میان پلی فوم خارج گردید. بعبارت دیگر پلی فوم حائلی میان ورق CFRP و بتن قرار گرفته تا از آغشته شدن الیاف و چسبیدن آنها به بتن جلوگیری کند. شکل ۴-۱۲ یک نمونه تیر را پس از آرماتور بندی و جانمایی نوارهای CFRP نشان می دهد.



شکل ۴-۱۲ نمونه تیر پس از جانمایی نوار های CFRP

از طرف دیگر دو نمونه از تیرها، دارای محصورشدگی پیوسته هستند که باید نوارهای CFRP پیش از بتن ریزی توسط رزین محکم شوند. با وجود آنکه این نمونه ها نیاز به پلی فوم ندارند، برای فراهم آمدن یکنواختی شرایط آزمایش، از پلی فوم برای این تیرها و همچنین تیر کنترل نیز استفاده گردید.

شکل ۴-۱۳ نوارهای CFRP رزین خورده برای نمونه S.C.cube را نشان می دهد. این نوار پیش از بتن ریزی داخل آرماتورها بافته می شود.

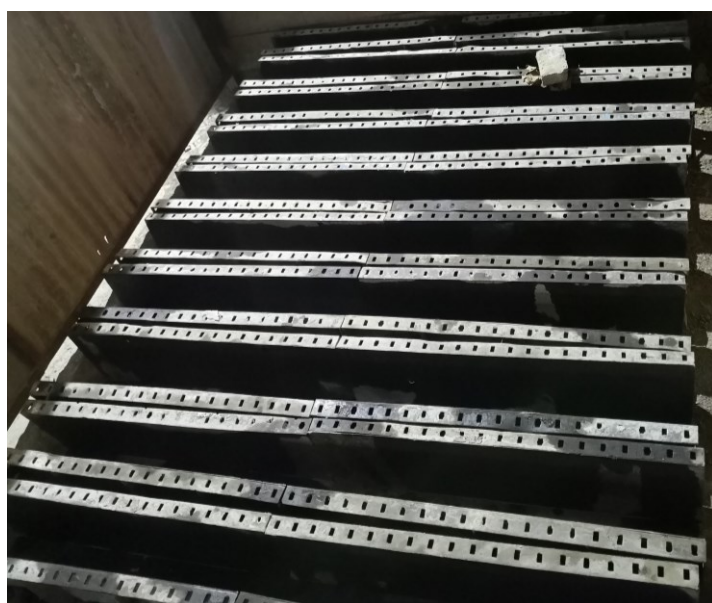


شکل ۴-۱۳ نوارهای CFRP آماده شده برای نمونه S.C.cube

۴-۳-۴ قالب بندی

مهم‌ترین اصل در قالب بندی، تراز بودن و شاقول بودن قالب هاست که این مهم را می‌توان توسط قالب‌های فلزی و یا قالب‌های چوبی تامین نمود. به جهت اینکه قالب‌های چوبی محدودیت ابعادی داشته و استحکام کمتری نسبت به قالب‌های فلزی دارند، استفاده از این قالب‌ها نیازمند رعایت رواداری‌هایی می‌باشد. بنابراین در این پژوهش از قالب‌های فلزی استفاده گردید.

شکل ۴-۱۴ قالب‌های فلزی را در کنار هم نشان می‌دهد. این قالب‌ها پس از ساخته شدن، بصورت کاملاً افقی و صاف قرار داده شدند. سپس سطح داخلی این قالب‌ها توسط روغن قالب و یا روغن سوخته به خوبی آغشته شده تا از چسبیدن بتن به آن‌ها جلوگیری شود.



شکل ۴-۱۴ قالب‌های فلزی جهت ساخت نمونه تیرهای آزمایش

۴-۴-۴ آماده سازی پیش از بتن ریزی

قبل از بتن ریزی، شبکه آرماتورها داخل قالب قرار داده شده و قالب‌ها توسط سیم قالب محکم بسته می‌شوند تا در هنگام بتن ریزی از یکدیگر فاصله نگیرند. سپس تراز بودن قالب‌ها در جهت‌های مختلف کنترل می‌شوند. شکل ۴-۱۵ نمونه S.C.pipe را پیش از بتن ریزی نشان می‌دهد.



شکل ۴-۱۵ نمونه S.C.pipe آماده ی بتن ریزی

به دلیل نیاز به جابه جایی نمونه تیرها و فاصله مکانی فی ما بین محل ساخت نمونه‌ها و محل تست‌ها و همچنین سنگینی نمونه‌ها، تمهیداتی صورت گرفت که بتوان نمونه‌ها را به راحتی توسط جرثقیل حمل نمود. به این منظور در طرفین تیرهای بتنی، میلگردهای خم شده به آرماتور متصل گردید که پس از گیرش بتن از آن‌ها برای حمل بتن استفاده شود. شکل ۴-۱۶ نمونه‌ها را آماده بتن ریزی نشان می‌دهد.



شکل ۴-۱۶ نمونه ها آماده بتن ریزی

۴-۴-۵ بتن ریزی

مهم ترین اصل در ساخت بتن، رعایت طرح اختلاط است. طرح اختلاط مناسب و یکسان، بتنی همسان با مشخصات یکسان می‌دهد. با هدف دستیابی به مقاومت فشاری ۲۵ مگاپاسکال از طرح اختلاط و دانه بندی ارائه شده در جدول ۲-۳ و جدول ۳-۳ استفاده شد که به آن، مقدار ۵۰۰ گرم منبسط شونده به ازای هر ۱۰۰ کیلوگرم سیمان افزوده شد. بنابراین طرح اختلاط نهایی بتن مورد استفاده در جدول ۲-۴ ارائه شده است. استفاده از منبسط شونده تنها در نمونه‌های S.C.Cube و S.C.Pipe ضرورت دارد. دلیل این ضرورت، انقباض بتن هنگام گیرش است. نوارهای CFRP باید در حالت کشش باشند تا عملکرد صحیح داشته باشند. و از آن جهت که نوارهای محصورکننده در این دو نمونه پیش از گیرش بتن داخل قالب قرار داده شده اند، وجود منبسط شونده باعث می‌شود که از انقباض بتن هنگام گیرش جلوگیری شده و محصورشدگی عمل کند. ماده منبسط شونده به دلیل حفظ شرایط یکسان بین نمونه‌ها و امکان مقایسه صحیح، در طرح اختلاط تمام نمونه‌ها استفاده شد. شکل ۴-۱۷ تصویری از نمونه‌ها در هنگام بتن ریزی را نشان می‌دهد.



شکل ۴-۱۷ نمونه ها در هنگام بتن ریزی

جدول ۴-۲ طرح اختلاط بتن منبسط شونده با مقاومت فشاری ۲۵ مگاپاسکال

وزن در هر متر مکعب kg/m^3	اجزای مخلوط
۳۷۳.۷۷	سیمان
۷۱۷.۲	درشت دانه
۹۶۱	ریز دانه
۲۲۸	آب
۱.۸	منبسط شونده پروگروت ۱۰۵

پس از ترکیب طرح اختلاط و حاصل شدن بتن همگن، بتن داخل قالب‌ها ریخته شده و سپس متراکم شد. تعداد ۳ نمونه مکعبی نیز به ابعاد $15 \times 15 \times 15$ سانتیمتر از مخلوط بتن به منظور سنجش مقاومت فشاری بتن ساخته شد. این مکعب‌ها در هنگام تست تیرها مورد آزمایش قرار گرفتند.

پس از تکمیل فرایند بتن ریزی، نمونه‌ها را با پلاستیک ضخیم پوشانده شد تا از تبخیر آب بتن جلوگیری شود. شکل ۴-۱۸ نمونه‌ها را پس از بتن ریزی نشان می‌دهد.



شکل ۴-۱۸ نمونه ها پس از بتن ریزی

۴-۴-۶ نگهداری و عمل آوری

نگهداری و عمل آوری بتن نقش بسزایی در مقاومت مشخصه بتن دارد. بتن پس از گیرش اولیه، باید تا روز بیست و هشتم مرتب آبیاری شده و مرطوب بماند و دمای محیط باید متعادل و مناسب باشد.

برای تامین رطوبت بتن پس از بتن ریزی از گونی چتایی که ظرفیت بالایی در نگهداری آب دارد استفاده شد و از آنجا که بتن ریزی در شب‌های سرد زمستانی انجام شد، محیط نمونه‌ها توسط پتو و بخاری در دمای مناسب تثبیت گردید.

پس از گذشت ۳ روز که بتن به مقاومت مناسب رسیده باشد، قالب‌ها باز شدند. تمامی نمونه‌ها در کنار هم و در شرایط یکسان به مدت ۲۸ روز نگهداری شده تا آماده تست شوند. شکل ۴-۱۹ نمونه‌ها را جهت حفظ رطوبت نشان می‌دهد.



شکل ۴-۱۹ نمونه های محافظت شده با گونی چتایی

۴-۴-۷ نصب ورق های CFRP

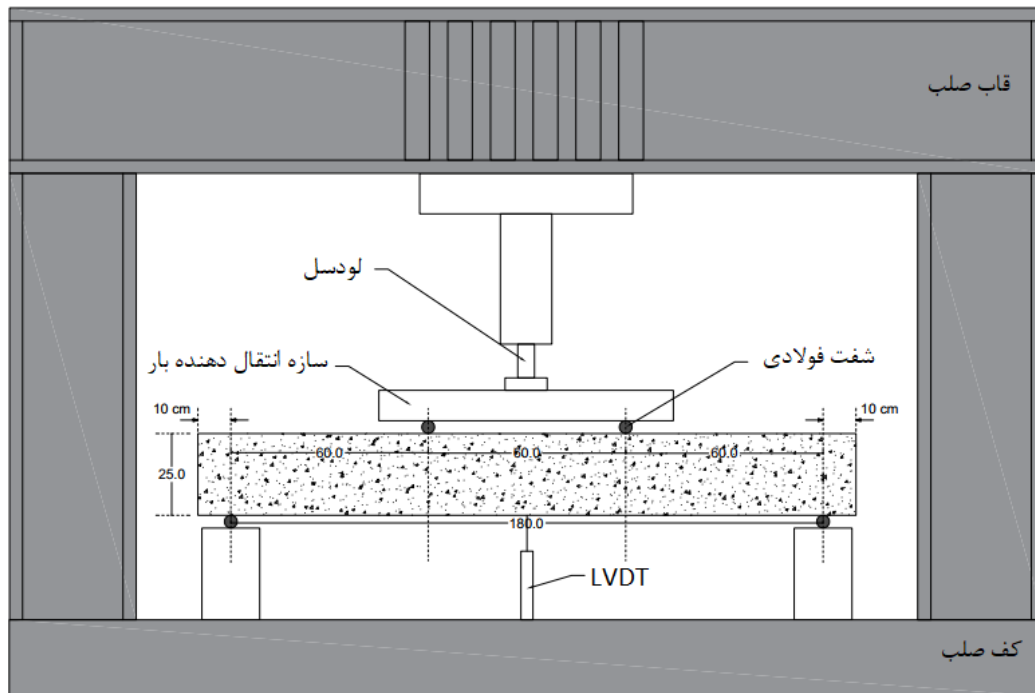
پس از گذشت حدود ۲۰ روز، نوارهای CFRP که از میانه تیرها بیرون آمده اند، توسط رزین مخصوص به سطح بتن چسبانده شد. این فرایند با دقت انجام شده و محصورشدگی ناحیه فشاری بتن را تامین می نماید. بعد از خشک شدن رزین ها، سطح تیر بتنی به رنگ سفید آغشته گردید که در هنگام آزمایش، ترک ها را به خوبی نمایان سازد. شکل ۴-۲۰ نمونه ها را پس از تکمیل نشان می دهد.



شکل ۴-۲۰ نمونه های تکمیل شده و آماده تست

۴-۵ چیدمان آزمایش خمش ۴ نقطه

چیدمان آزمایش مد نظر بر اساس آیین نامه ASTM C78/C78M-18 می‌باشد. شکل ۴-۲۱ تصویر شماتیک این چیدمان را نشان می‌دهد [31].



شکل ۴-۲۱ تصویر شماتیک سیستم خمش ۴ نقطه در تیرهای بتنی

برای این آزمایش دو عدد تکیه‌گاه در طرفین تیر بتنی با فاصله ۱۰ سانتیمتر از گوشه به منظور جلوگیری از شکست ناشی از لهیدگی قرار داده می‌شود. بارگذاری نیز در یک سوم میانی دهانه اعمال می‌گردد. محل تکیه‌گاه‌ها و بارگذاری توسط شفت‌های فولادی مشخص می‌گردد.

یک عدد دستگاه LVDT به منظور قرائت تغییر شکل وسط دهانه در طول آزمایش، در وسط دهانه تیر نصب می‌گردد و به تعداد مورد نیاز کرنش سنج نیز پیش از بتن ریزی در محل‌های مورد نظر قرار داده شده که در حین آزمایش کرنش اجزای داخلی را اندازه‌گیری نماید. برای اندازه‌گیری تغییر مکان در وسط دهانه توسط LVDT، یک قطعه صفحه آلومینیومی در وسط دهانه چسبانده شد. سپس LVDT را که روی پایه مجزا متصل است به گونه‌ای تنظیم گردید که تغییر مکان صفحه چسبانده شده را نشان دهد. شکل ۴-۲۳ محل قرارگیری LVDT را نشان می‌دهد. همچنین شکل ۴-۲۲ تصویر قاب صلب و جک اعمال نیرو را نشان می‌دهد.



شکل ۴-۲۲ قاب صلب و جک اعمال نیرو

تیر بتنی پس از اندازه گذاری‌های دقیق، به صورت تراز روی تکیه‌گاه‌ها قرار گرفت به طوریکه قسمت کششی در بالا و شفت‌های بارگذاری در فاصله یک سوم دهانه، از تکیه‌گاه‌ها قرار داشته باشند. کلیه ابزار آلات سنجش اعم از لودسل، LVDT و کرنش سنج‌ها به دستگاه دیتالاگر متصل شد.

پس از آماده سازی نمونه، بارگذاری به صورت یکنواخت به صورت تغییر مکان کنترل به تیر وارد می‌شود تا شکست حاصل شود [31]. در حین آزمایش ترک‌ها را با مازیک نشان داده و زمان وقوع آن را در کنار آن نوشته شد. شکل ۴-۲۳ یک نمونه تیر آماده بارگذاری را نشان می‌دهد.



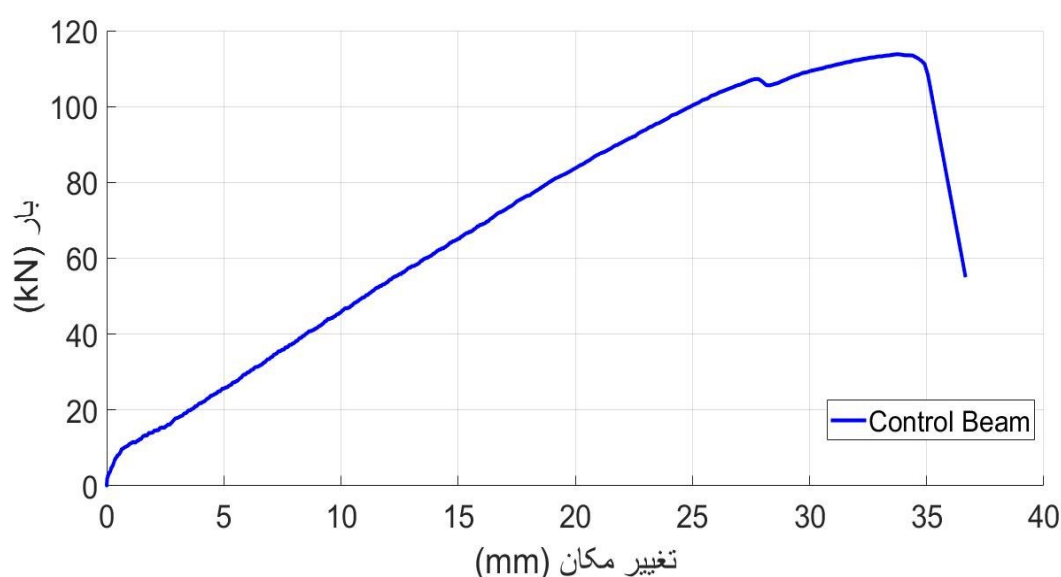
شکل ۴-۲۳ یک نمونه تیر پیش از بارگذاری

۴-۶ نتایج و تحلیل آزمایش ها

پس از آزمایش خمش ۴ نقطه تیرها، مشاهده شد تمامی نمونه‌ها در ناحیه فشاری شکسته شدند. در ادامه نتایج حاصل از بررسی آزمایش‌ها، منحنی‌های بار تغییرمکان، الگوی ترک، شکل پذیری و استهلاک انرژی نمونه‌ها به تفکیک گروه بندی ارائه شد. در نهایت تمامی نمونه‌ها با یکدیگر مقایسه شدند.

۴-۶-۱ نمونه های گروه اول (تیر کنترل)

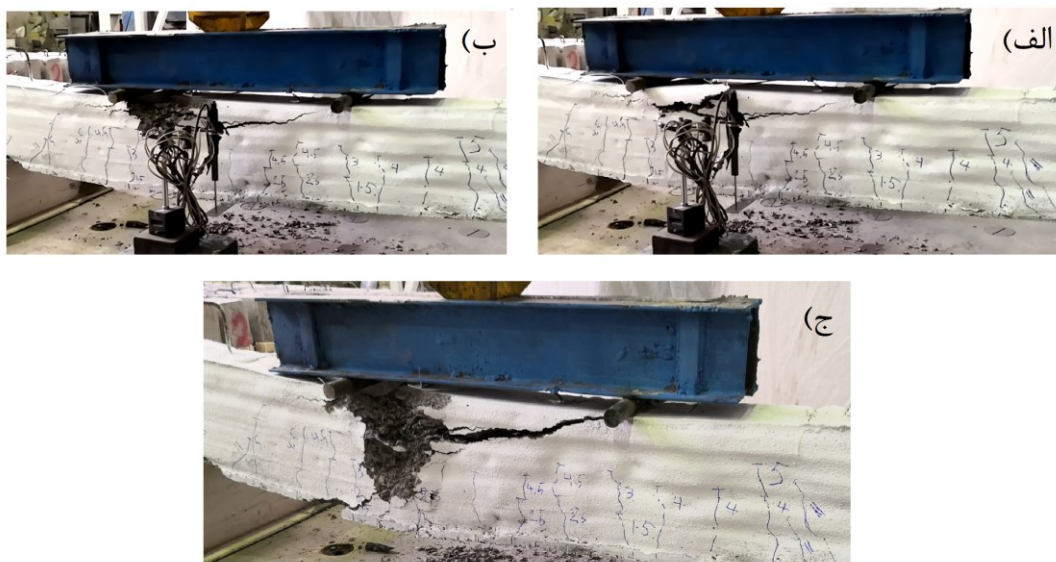
گروه اول شامل یک نمونه تیر فاقد محصور شوندگی بوده که به منظور مقایسه و سنجش عملکرد تیرهای محصور شده ساخته و مورد آزمایش قرار گرفت. رفتار بار تغییرمکان وسط دهانه این نمونه تحت بار خمشی ۴ نقطه در شکل ۴-۲۴ نشان داده شده است.



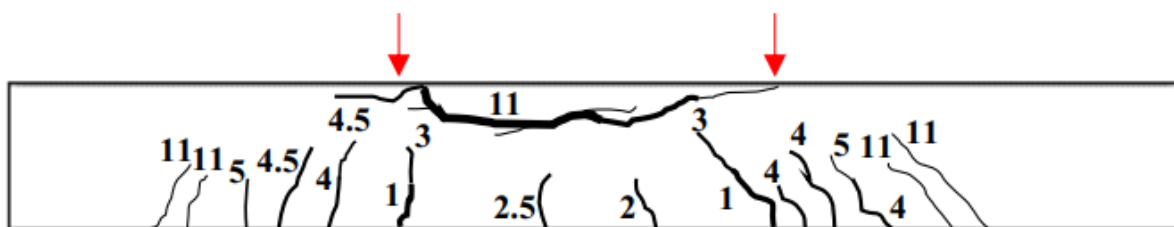
شکل ۴-۲۴ منحنی بار - تغییر مکان نمونه کنترل

در هنگام تست خمش این نمونه، اولین ترک تقریباً در بار ۱۴.۷ کیلونیوتن به صورت قائم خمشی در ناحیه کششی واقع در یک سوم میانی مشاهده شد. سپس با رسیدن به بار ۳۹.۲ کیلونیوتن، ناحیه ترک خوردگی به یک سوم‌های کناری توسعه پیدا کرده و ترک‌های خمشی مورب شکل گرفت. افزایش بارگذاری، به مرور طول ناحیه ترک را افزایش داده تا در نهایت این نمونه پس از عبور از حداکثر ظرفیت باربری معادل ۱۱۳.۷۸ کیلونیوتن توسط ترک‌هایی که در ناحیه فوقانی مقطع ایجاد شد، منهدم گشت. شکل ۴-۲۵ (الف) و (ب) به

ترتیب زمانی، ترک‌های تیر کنترل را در لحظات پیش از وقوع شکست نشان داده و شکل ۴-۲۵ (ج) تصویر تیر کنترل پس از شکست می‌باشد. در نهایت در شکل ۴-۲۶ تصویر شماتیک ترک‌های نمونه کنترل در طول دهانه ارائه شده است.



شکل ۴-۲۵ الگو ترک نمونه تیر کنترل در لحظات پایانی شکست



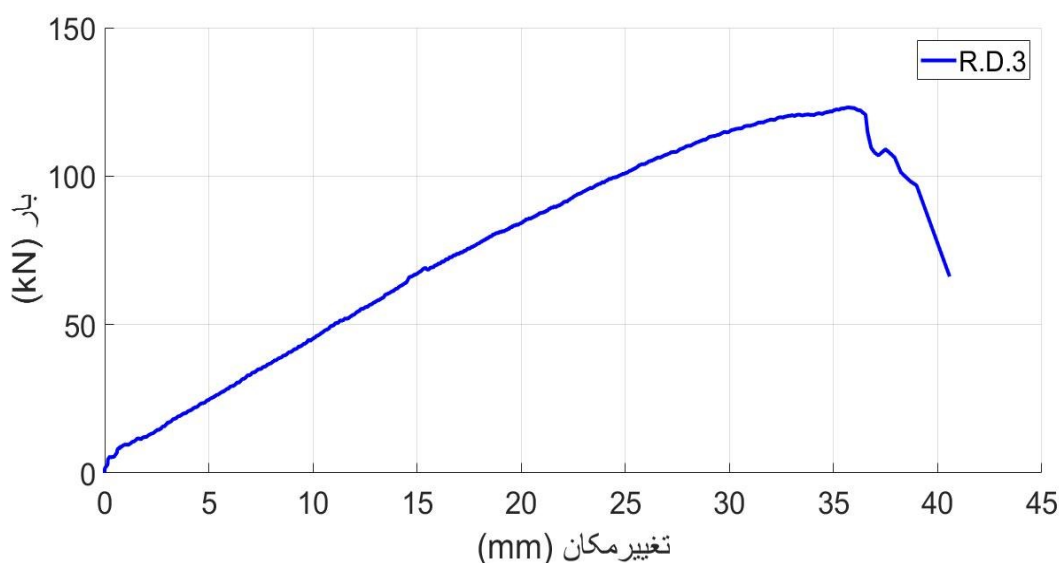
شکل ۴-۲۶ تصویر شماتیک ترک‌های نمونه کنترل

از تحلیل و بررسی نتایج حاصل از آزمایش مشخص شد این نمونه تیر با شکل‌پذیری معادل ۱.۳ و استهلاک انرژی برابر ۲۵۱۶.۸ کیلو نیوتن متر دارای شکست ترد و فاقد شکل‌پذیری است.

۴-۶-۲ نمونه های گروه دو

این گروه شامل دو نمونه تیر که محصور شوندگی در آنها توسط نوارهای قائم، موازی و ناپیوسته توسط یک لایه الیاف CFRP با عرض و فاصله به ترتیب ۳ و ۵ سانتیمتر تامین شده است، می باشد.

رفتار خمشی تحت بار خمشی ۴ نقطه اولین نمونه از گروه دو با نام R.D.3 در شکل ۴-۲۷ به صورت منحنی بار تغییر مکان وسط دهانه ترسیم شده است. از بررسی منحنی بار تغییر مکان این نمونه، شاخه دوم نزولی با شیب زیاد مشاهده می گردد که این شاخه تا لحظات پایانی شکست، ادامه پیدا می کند. بنابراین می توان اذعان داشت که این نمونه شکل پذیری مطلوبی ارائه نخواهد کرد.



شکل ۴-۲۷ منحنی بار - تغییر مکان تیر R.D.3

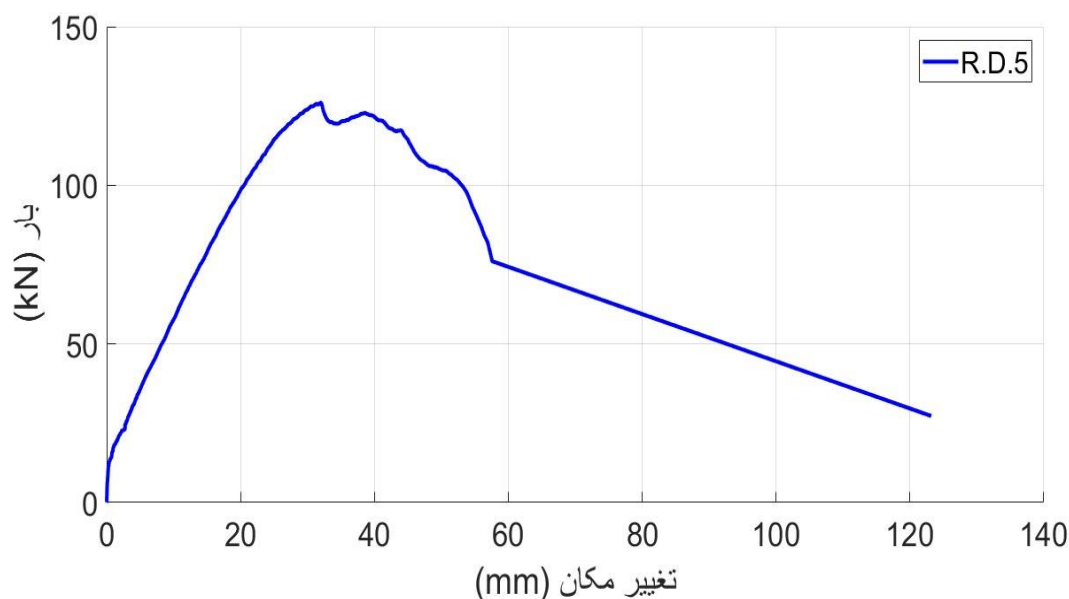
اولین ترک این نمونه در بار ۱۹.۶ کیلونیوتن در ناحیه یک سوم میانی به صورت قائم و خمشی شکل گرفت. سپس با رسیدن بار به ۴۹ کیلونیوتن، ترک ها به ناحیه یک سوم های کناری توسعه یافت و ترک های خمشی مورب شکل گرفت. به مرور با افزایش بارگذاری و رسیدن به بار ۹۸ کیلونیوتن، طول ناحیه ترک تقریباً تمام طول دهانه را در برگرفت تا در نهایت این نمونه در بار ۱۲۳.۱۳ کیلونیوتن به حداکثر ظرفیت تحمل بار رسید. نکته حائز اهمیت در این نمونه، وقوع ترک افقی در محل خروج ورق های CFRP از میانه مقطع تیر است. در این ناحیه، وجود ورق های CFRP باعث وقوع رفتاری مانند درز شده و بتن در این ناحیه شکسته شد. این رفتار

باعث شد تا پیش از آن که محصور شوندگی به خوبی وارد عمل شود، تیر منهدم گردد. شکل ۴-۲۸ الف) و ب) به ترتیب زمانی، ترک‌های نمونه R.D.3 را لحظاتی پیش از وقوع شکست نشان داده و شکل ۴-۲۸ ج) تصویر این نمونه بعد از شکست است.



شکل ۴-۲۸ ترک‌های نمونه R.D.3 پیش از وقوع شکست

دومین نمونه از این گروه با نام R.D.5 دارای نوارهای با عرض و فاصله ۵ سانتیمتر بوده که منحنی بار تغییرمکان وسط دهانه آن تحت آزمایش خمش ۴ نقطه در شکل ۴-۲۹ نشان داده شده است. مشاهده می‌گردد پس از رسیدن به ظرفیت باربری تیر، شاخه دوم منحنی با شیب کم نزولی بوده و سپس در شاخه سوم شیب این نمودار بیشتر می‌شود. در ادامه با کاهش شیب نزولی نمودار، شکست تیر مشاهده شد. در نتیجه انتظار می‌رود نمونه R.D.5 شکل پذیری مطلوبی داشته باشد.



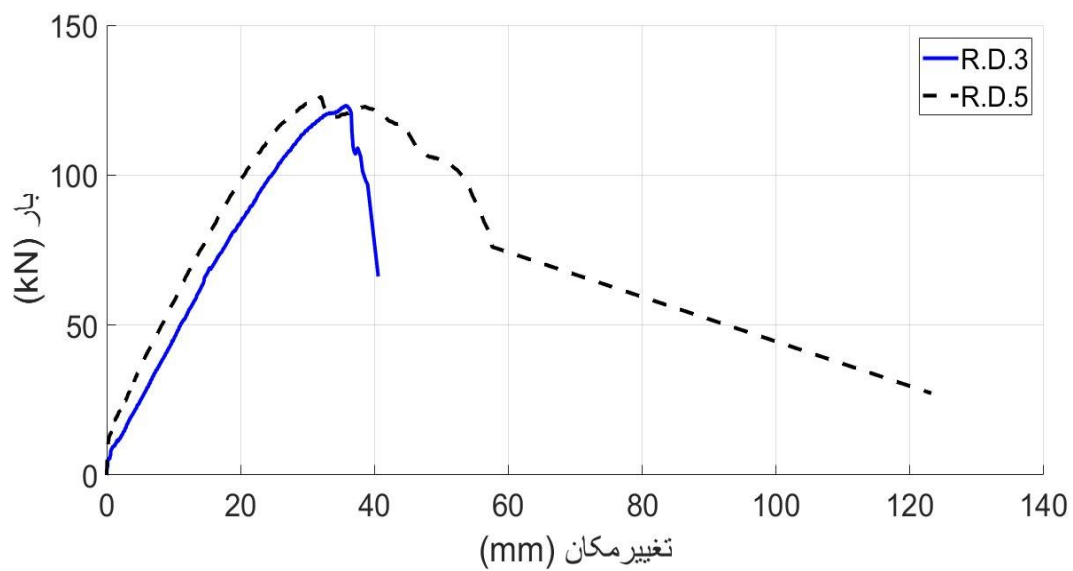
شکل ۴-۲۹ منحنی بار - تغییر مکان تیر R.D.5

در این نمونه اولین ترک در بار ۱۹.۶ کیلونیوتن به صورت قائم در ناحیه یکسوم میانی مشاهده گردید. پس از رسیدن بار به ۳۴.۳ کیلونیوتن ترک‌های مورب در یکسوم‌های کناری شکل گرفت. در این نمونه سرعت توسعه ترک در طول دهانه بیشتر بوده و در بار ۵۸.۸ کیلونیوتن، طول ناحیه ترک تقریباً در تمام طول دهانه گسترش یافت، گسترش ترک‌ها تا رسیدن تیر به حداکثر ظرفیت باربری برابر ۱۲۶.۰۲ کیلونیوتن ادامه داشت. نکته جالب توجه در بررسی ترک این نمونه، چگونگی و محل انهدام تیر است. با افزایش بار و گسترش ترک‌ها، مشاهده گردید بتن فشاری در محل‌های محصور شده مقاومت بیشتری از خود در مقابل شکست نشان دادند و بتن در حد فاصل دو نوار CFRP شروع به شکست کرد. در نهایت بتن فشاری در عمق بیشتر از ناحیه محصور شده و تقریباً در میانه ارتفاع تیر دچار شکست و انهدام شد. این مهم، حاکی از عملکرد محصور شدگی در ناحیه فشاری داشته و نشان دهنده آن است که بتن، پایین‌تر از ناحیه محصور شده به حد نهایی شکست خود رسیده و انهدام تیر در آن نقطه رخ داده است. در نتیجه، محصور شدگی این نمونه به حد کامل خود نرسید. بنابراین در صورتیکه ارتفاع ناحیه محصور شده بیشتر در نظر گرفته می‌شد، احتمالاً محصور شدگی عملکرد بهتری در این نمونه از خود نشان می‌داد. شکل ۴-۳۰ (الف) و (ب) به ترتیب زمانی، ترک‌های نمونه R.D.5 را لحظاتی پیش از وقوع شکست نشان داده و شکل ۴-۳۰ (ج) تصویر این نمونه بعد از شکست است.



شکل ۴-۳۰ ترک های نمونه R.D.5 در لحظات پایانی شکست

در ادامه با ترسیم منحنی بار تغییر مکان وسط دهانه هر دو نمونه R.D.3 و R.D.5 از گروه دو در شکل ۴-۳۱، به مقایسه نمونه های این گروه پرداخته شد.



شکل ۴-۳۱ منحنی بار - تغییر مکان گروه دو

مشاهده می‌شود اگرچه نمونه R.D.5 نسبت به نمونه R.D.3 افزایش ظرفیت باربری ناچیزی داشته، اما منحنی رفتاری بار تغییر مکان وسط دهانه آن چاق‌تر بوده و توانسته تغییر مکان‌های بیشتری را تحمل کند. از طرف دیگر همانطور که در شکل ۴-۳۲ و شکل ۴-۳۳ مقایسه بین ترک‌های این دو نمونه را بعد از شکست نشان می‌دهد، ترک‌های بیشتری در طول دهانه نمونه R.D.5 مشاهده می‌گردد. همچنین، ناحیه و نوع شکست نمونه‌ها بسیار جالب توجه است. نمونه R.D.3 توسط ترک‌های افقی به دلیل ایجاد درز سرد در بتن دچار شکست شد درحالی که نمونه R.D.5 در میانه ی ارتفاع و توسط ترک‌های خمشی دچار شکست گردید.



نمونه R.D.5 (ب)

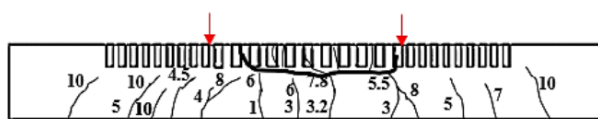


نمونه R.D.3 (الف)

شکل ۴-۳۲ ترک نمونه‌های گروه دو. الف) نمونه R.D.3 و ب) نمونه R.D.5



ب) تصویر شماتیک ترک های نمونه R.D.5



الف) تصویر شماتیک ترک های نمونه R.D.3

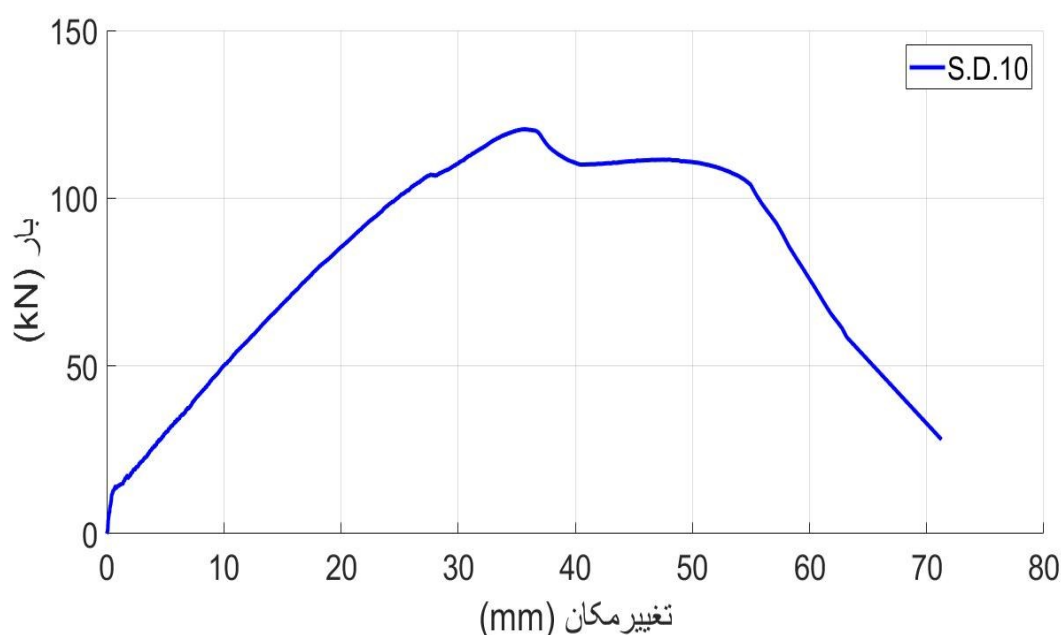
شکل ۴-۳۳ تصویر شماتیک ترک های گروه دو

در نهایت پس از تحلیل و استخراج نتایج، می‌توان دریافت نمونه R.D.5 با ۶۰٪ بهبود در شکل‌پذیری و ۹۷.۷ درصد افزایش استهلاک انرژی کل، رفتار خمشی بهتری نسبت به نمونه R.D.3 دارد. بررسی نتیجه این گروه نشان می‌دهد نسبت بهینه‌ای بین عرض نوارهای محصور کننده و فاصله بین آن‌ها وجود دارد که بهترین محصور شدگی را تامین نماید.

۴-۶-۳ نمونه های گروه سه

این گروه شامل سه نمونه تیر بتنی که محصور شوندگی در آن‌ها توسط ورق‌های CFRP به صورت مورب، موازی، مارپیچ و ناپیوسته تامین شده است. تفاوت بین نمونه‌ها در زاویه قرارگیری نوارهای محصور کننده می‌باشد که به ترتیب برابر ۱۰، ۲۰ و ۳۰ درجه نسبت به قائم است.

از بررسی منحنی بار تغییر مکان وسط دهانه اولین نمونه گروه سه با نام S.D.10 که در شکل ۴-۳۴ نشان داده شده، مشاهده می‌گردد این تیر پس از رسیدن به حداکثر ظرفیت باربری خود، مقدار اندکی افت مقاومت از خود نشان داده و سپس رفتار سخت شدگی همراه با افزایش در تغییر مکان در پی دارد. بنابراین می‌توان رفتار بار تغییر مکان این نمونه را در سه مرحله شامل شاخه صعودی، شاخه سخت شوندگی و شاخه نزولی مطرح نمود. در نتیجه می‌توان با مشاهده شاخه سخت شونده، از این نمونه انتظار رفتار شکل پذیر داشت.



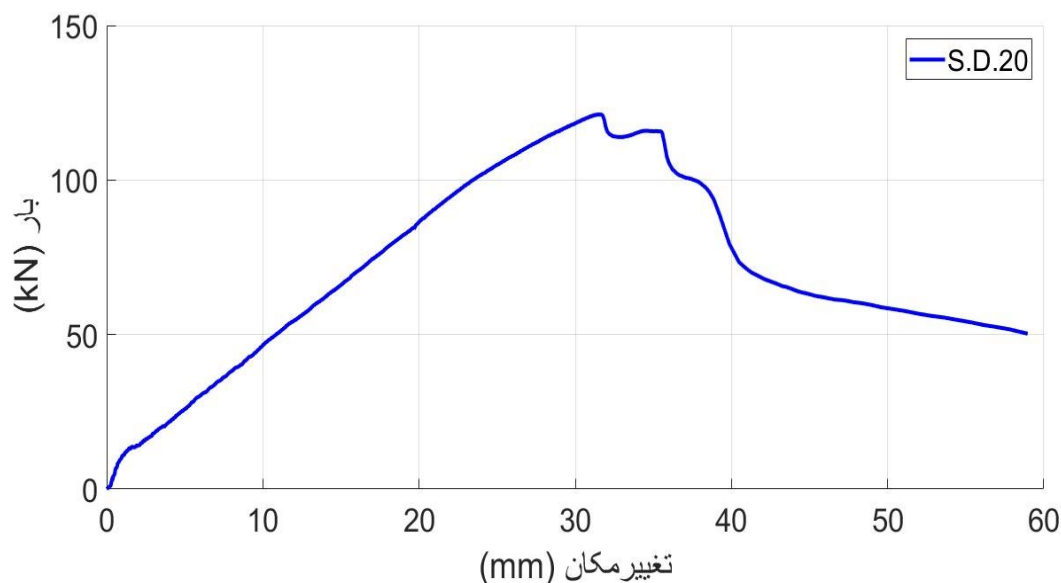
شکل ۴-۳۴ منحنی بار - تغییر مکان تیر S.D.10

در نمونه S.D.10 اولین ترک به صورت مورب خمشی در بار ۱۴.۷ کیلونیوتن و در ناحیه یک سوم میانی شروع به شکل گیری کرد. با رسیدن به بار ۲۴.۵ کیلونیوتن این ترک‌ها به خارج از ناحیه یک سوم میانی گسترش یافت. اما این ترک‌ها حتی بعد از عبور از ظرفیت بار خود معادل ۱۲۰.۵۳ کیلونیوتن، در کل طول دهانه گسترش پیدا نکرده و به تکیه‌گاه نرسید. با افزایش بارگذاری و رسیدن آن به بار ۷۳.۵ کیلونیوتن، ترک‌های خمشی وارد ناحیه محصور شدگی شد. سپس ترک‌های افقی در میانه ناحیه محصور شده و پایین آن مشاهده گردید. در لحظاتی قبل از انهدام تیر، بتن در ناحیه محصور شده در حال شکست بود اما پیش از آنکه به ظرفیت نهایی خود برسد، بتن زیرین در میانه ارتفاع تیر دچار شکست شد. نکته حائز اهمیت در بررسی ترک‌های این نمونه، ناحیه شکست تیر است. در هنگام انهدام این تیر، بتن فشاری در ناحیه محصور شده، در طول بیشتری اثرات شکست را به نمایش گذاشت که این موضوع نشان دهنده عملکرد خوب محصورشدگی در این نمونه می‌باشد. (شکل ۴-۳۵ الف) و (ب) به ترتیب زمانی، ترک‌های نمونه S.D.10 را لحظاتی پیش از وقوع شکست نشان داده و (شکل ۴-۳۵ ج) تصویر این نمونه بعد از شکست است.



شکل ۴-۳۵ ترک های نمونه S.D.10 در لحظات پایانی شکست

منحنی بار تغییر مکان وسط دهانه دومین نمونه از این گروه با نام S.D.20 دارای نوارهای با عرض ۳ سانتیمتر که با زاویه ۲۰ درجه نسبت به قائم در شکل ۴-۳۶ نشان داده شده است. منحنی بار تغییر مکان این نمونه نشان می‌دهد پس از رسیدن به ظرفیت باربری، نمودار شکل نزولی پلکانی به خود گرفته و پس از افت سریع بار، سخت شوندگی بسیار ناچیز از خود نشان داده و سپس شاخه نزولی با شیب بالا شکل گرفت.



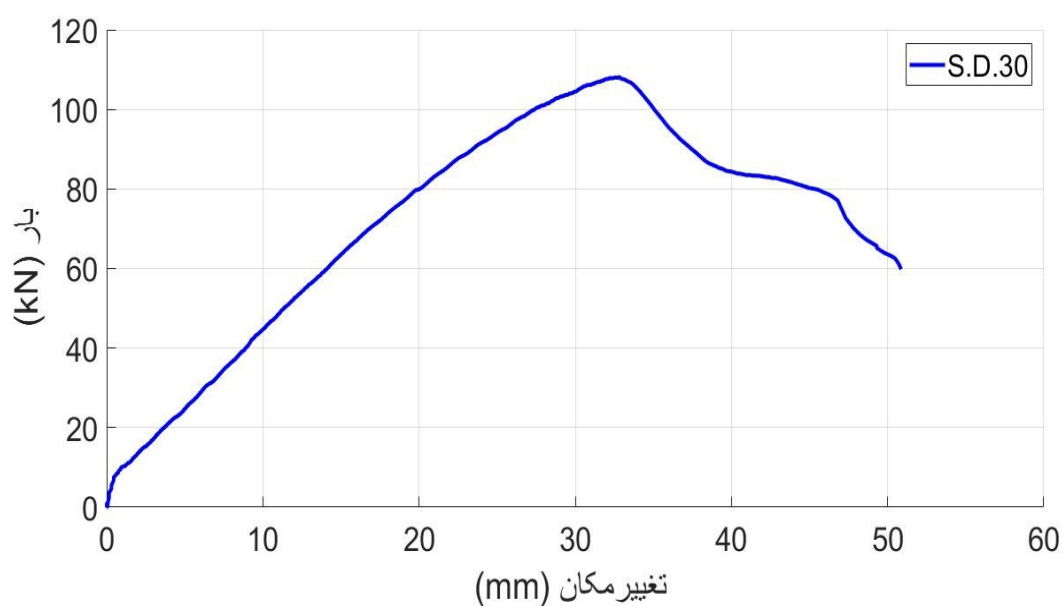
شکل ۴-۳۶ منحنی بار - تغییر مکان تیر S.D.20

در نمونه S.D.20 اولین ترک خمشی به صورت قائم در بار ۱۱.۷۶ کیلونیوتن در ناحیه یک سوم میانی شکل گرفت و با رسیدن به بار ۳۴.۳ کیلونیوتن این ترک‌ها به خارج از ناحیه یک سوم میانه گسترش یافت. سپس در بار ۱۰۷.۸ کیلونیوتن طول ناحیه ترک به نزدیکی تکیه‌گاه‌ها رسید و تا بعد از رسیدن به ظرفیت نهایی نمونه برابر ۱۲۱.۱۹ کیلونیوتن گسترش ترک‌ها ادامه یافت. با افزایش بارگذاری، ترک‌های افقی در محل خروج ورق‌های CFRP مشاهده شد. ترک‌های افقی پس از پیوستن به ترک‌های خمشی قائم در وسط دهانه، انهدام تیر را رقم زدند. از مشاهده ترک‌ها در هنگام شکست تیر نتیجه گرفته می‌شود که محصور شدگی وارد عمل شد اما پیش از این که بتواند تاثیر چشم‌گیری بر عملکرد نمونه داشته باشد، تیر از دو ناحیه، یعنی پایین تر از ناحیه محصور شده و در ناحیه محصور شده بر اثر بروز ترک‌های افقی، دچار انهدام و شکست شد. شکل ۴-۳۷ الف) و ب) به ترتیب زمانی، ترک‌های نمونه S.D.20 را لحظاتی پیش از وقوع شکست نشان داده و شکل ۴-۳۷ ج) تصویر این نمونه بعد از شکست است.



شکل ۴-۳۷ ترک‌های نمونه S.D.20 در لحظات پایانی شکست

سومین نمونه از گروه سه با نام S.D.30 که توسط نوارهای CFRP با عرض ۳ سانتیمتر و با زاویه ۳۰ درجه نسبت به قائم ساخته شدند، پس از انجام آزمایش خمش ۴ نقطه، منحنی بار تغییر مکان وسط دهانه آن ترسیم و در شکل ۴-۳۸ نشان داده شده است.



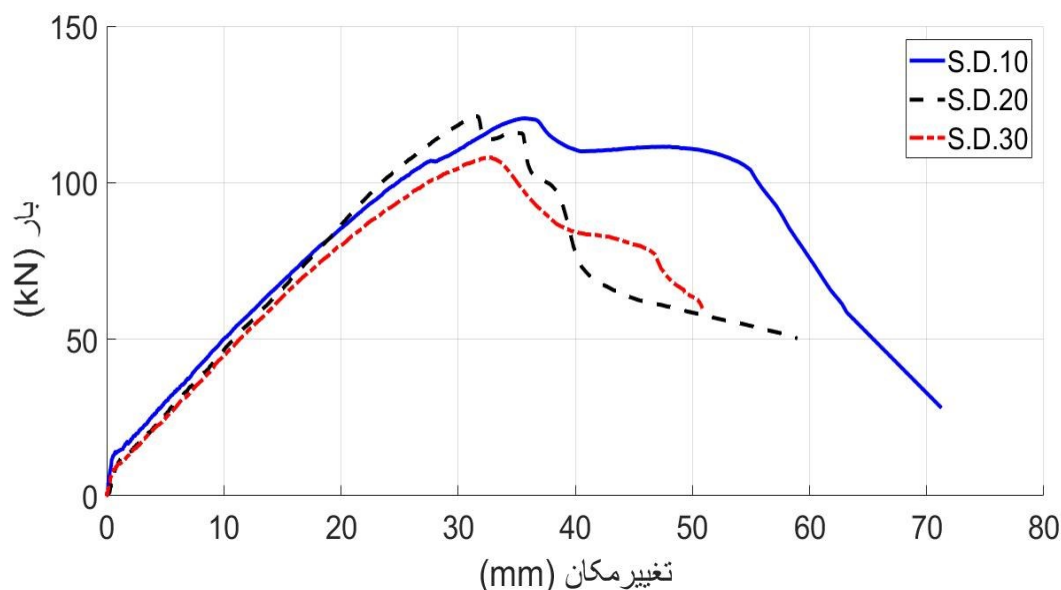
شکل ۴-۳۸ منحنی بار - تغییر مکان تیر S.D.30

در نمونه S.D.30 اولین ترک قائم خمشی در بار ۱۴.۷ کیلونیوتن در یک سوم میانی دهانه مشاهده شد. سپس با رسیدن به بار ۳۹.۲ کیلونیوتن، ترک‌های خمشی مورب به خارج از ناحیه یک سوم میانی رسید و در بار ۹۸ کیلونیوتن این ترک‌ها به نزدیکی تکیه‌گاه گسترش پیدا کرد و تا رسیدن به ظرفیت نهایی تیر معادل ۱۰۸.۱۲ کیلونیوتن ادامه یافت. اما آنچه که از مشاهده ترک‌ها مشخص شد، وقوع شکست در ناحیه فوقانی و نزدیک به سطح تیر بود که حاکی از عدم عملکرد صحیح محصور شدگی دارد. اگر چه ظاهر شدن ترک‌های افقی در فاصله بین نوارهای CFRP نشان می‌دهد که محصور شدگی مقداری در رفتار تیر تاثیر گذاشته است اما عملکرد آن به دلیل فاصله زیاد بین نوارهای CFRP مطلوب نبوده و تاثیر ناچیزی داشت. در این نمونه پس از گسترش ترک‌ها در ناحیه یک سوم میانی، بتن فشاری در حد فاصل بین نوارهای CFRP شکسته شد. (شکل ۴-۳۹ الف) و (ب) به ترتیب زمانی، ترک‌های نمونه S.D.30 را لحظاتی پیش از وقوع شکست نشان داده و شکل ۴-۳۹ ج) تصویر این نمونه بعد از شکست است.



شکل ۴-۳۹ ترک های نمونه S.D.30 در لحظات پایانی شکست

در ادامه با ترسیم منحنی بار تغییر مکان وسط دهانه هر سه نمونه S.D.10، S.D.20 و S.D.30 از گروه سه و ارائه آن در شکل ۴-۴۰ به مقایسه بین رفتار خمشی این سه نمونه پرداخته شد.



شکل ۴-۴۰ منحنی بار- تغییر مکان گروه سه

مشاهده می‌گردد اگرچه ظرفیت باربری بین نمونه‌های S.D.10 و S.D.20 تغییر محسوسی نداشته اما ظرفیت تحمل بار در نمونه S.D.30، ۱۰ درصد نسبت به S.D.10 کاهش یافت. از طرف دیگر، می‌توان چاق شدگی محسوس منحنی بار تغییر مکان را در نمونه S.D.10 نسبت به S.D.20 و S.D.30 مشاهده کرد. بنابراین تاثیر فاصله بین نوارهای محصور کننده به خوبی قابل مشاهده است. همچنین می‌توان نتیجه گرفت کاهش فاصله بین نوارها در ابتدا ظرفیت باربری را افزایش داده و با کمتر شدن این فاصله، می‌تواند تغییر مکان‌های بزرگتری را به ارمغان آورد.

از طرف دیگر همانطور که در شکل ۴-۴۱ و شکل ۴-۴۲ قابل مشاهده است، طول ناحیه ترک در نمونه S.D.10 بیشتر از دو نمونه دیگر بوده و تقریباً تا نزدیکی‌های تکیه‌گاه گسترش یافت. همچنین مشاهده می‌گردد ورود ترک‌ها به ناحیه یک‌سوم کناری در نمونه S.D.10 زودتر از دیگر نمونه‌ها رخ داده است. ورود ترک به ناحیه یک‌سوم کناری به ترتیب در بار ۲.۵، ۳.۵ و ۴ تن در نمونه‌های S.D.10، S.D.20 و S.D.30 گزارش شده است.

به علاوه، شکست در نمونه S.D.30 در ناحیه فشاری و محصور شده انجام شده اما گستره‌ی ناحیه شکست در طول دهانه و ارتفاع مقطع با کاهش زاویه نسبت به قائم (کاهش فاصله نوارهای محصور کننده) به ترتیب در نمونه‌های S.D.20 و S.D.10 بیشتر شده است. تا حدی که شکست در نمونه S.D.10 با ترک‌های افقی در ناحیه محصور شده که تقریباً ۷۵٪ ناحیه یک‌سوم میانه را در بر گرفته بود، با حجیم شدن بتن در این ناحیه و در نهایت شکست بتن در زیر ناحیه محصور شده همراه بود.



نمونه S.D.10 (ب)



نمونه S.D.20 (الف)



نمونه S.D.30 (ج)

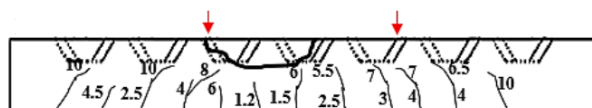
شکل ۴-۱۱ الگوی ترک نمونه‌های گروه سه بعد از شکست



ب) تصویر شماتیک ترک های نمونه S.D.20



الف) تصویر شماتیک ترک های نمونه S.D.10



ج) تصویر شماتیک ترک های نمونه S.D.30

شکل ۴-۱۲ تصویر شماتیک ترک‌های گروه سه

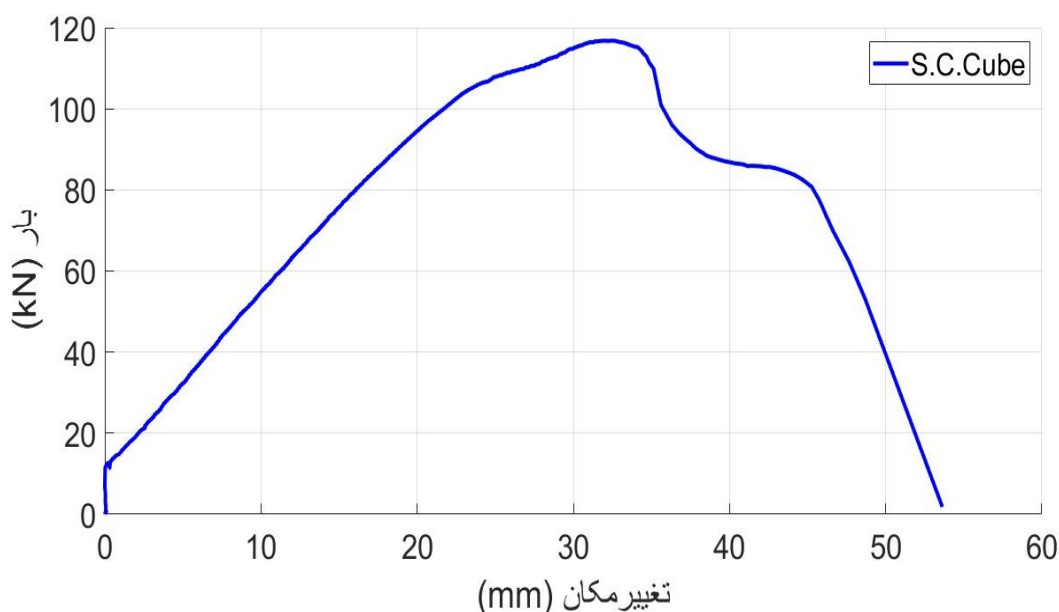
در نهایت می‌توان با تحلیل نتایج بدست آمده از آزمایش دریافت نمونه S.D.10 با ۳۸٪ بهبود در شکل پذیری و ۸۳.۹٪ افزایش استهلاک انرژی نسبت به نمونه S.D.30 بهبود عملکردی مطلوبی در بین نمونه‌های گروه سه داشته است. از طرف دیگر، نمونه S.D.30 با ۳.۶٪ شکل پذیری را نسبت به S.D.20 بهبود بخشید و این در حالی است که استهلاک انرژی در نمونه S.D.20 به مقدار ۸.۷۵٪ از نمونه S.D.30 بیشتر است.

بنابراین می‌توان نتیجه گرفت با کمتر شدن فاصله بین نوارهای محصور کننده، در ابتدا ظرفیت باربری و استهلاک انرژی افزایش یافته و سپس شکل پذیری افزایش پیدا می‌کند.

۴-۶-۴ نمونه های گروه چهار

محصور شوندگی این گروه توسط نوارهای مارپیچ و پیوسته CFRP به صورت مدفون داخل بتن تامین شده است. تفاوت بین نمونه ها را شکل هندسی مقطع محصور شده مشخص می کند که در دو نوع دایروی و مستطیلی در نظر گرفته شده است.

منحنی بار تغییر مکان وسط دهانه اولین نمونه از گروه چهار با نام S.C.Cube که محصور شدگی با مقطع مستطیلی تامین شده در شکل ۴-۴۳ نشان داده شده است. منحنی بار تغییر مکان این نمونه از چهار شاخه تشکیل شده است. پس از عبور از شاخه اول و رسیدن به ظرفیت باربری، شاخه دوم با شیب بسیار تند نزولی قابل مشاهده است. بعد از رسیدن به حدود ۸۰٪ ظرفیت باربری، شاخه سوم خط تقریباً افقی را تشکیل می دهد و سپس شاخه چهارم به صورت نزولی با شیب تند تشکیل شده که منجر به شکست تیر شد.



شکل ۴-۴۳ منحنی بار - تغییر مکان تیر S.C.Cube

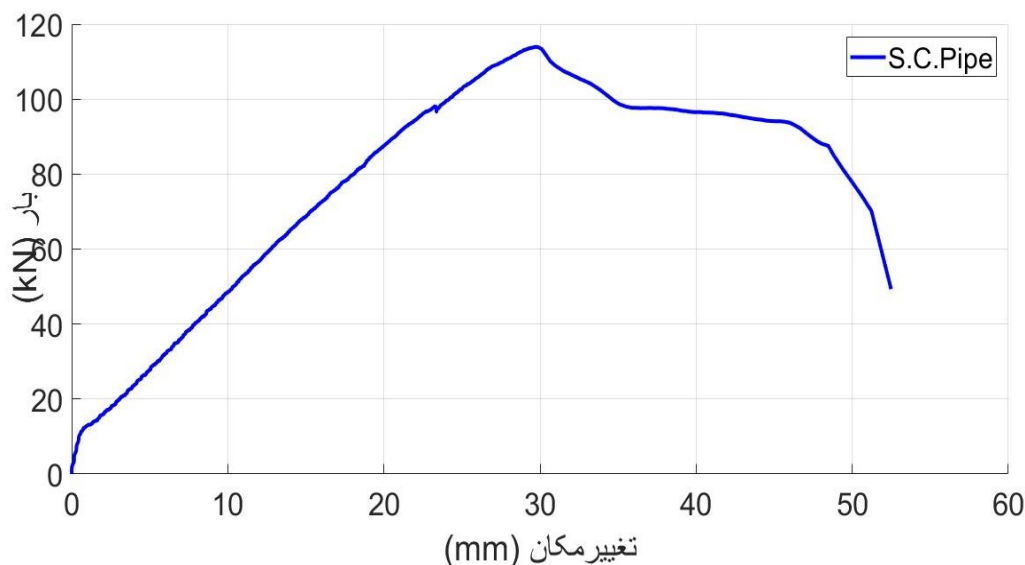
در نمونه S.C.Cube اولین ترک به صورت قائم خمشی در ناحیه یک سوم میانی با رسیدن به بار ۱۴.۷ کیلونیوتن مشاهده گردید. سپس، با رسیدن به بار ۲۹.۴ کیلونیوتن ترک های مورب خمشی در ناحیه یک سوم کناری شکل گرفت. با افزایش بارگذاری و رسیدن به بار ۹۸ کیلونیوتن این ترک ها سرتاسر طول دهانه را در بر گرفت. در ادامه تا رسیدن به ظرفیت نهایی برابر ۱۱۶.۸۱ کیلونیوتن عرض ترک ها در ناحیه یک سوم میانی بسیار زیاد شد.

با افزایش بارگذاری، ترک‌های افقی در ناحیه محصور شده که نشان دهنده عملکرد محصور شدگی است مشاهده گردید. به مرور، این ترک‌های افقی به ارتفاع پایین‌تر از ناحیه محصور شده گسترش یافت. با افزایش ارتفاع ترک‌های قائم و رسیدن آن‌ها به ترک‌های افقی شکست تیر را در زیر ناحیه محصور شده و تقریباً در وسط ارتفاع تیر به وجود آورد که نشان از عدم تکمیل عملکرد محصورشدگی در تیر دارد. شکل ۴-۴۴ (الف) و (ب) به ترتیب زمانی، ترک‌های نمونه S.C.Cube را لحظاتی پیش از وقوع شکست نشان داده و شکل ۴-۴۴ ج تصویر این نمونه بعد از شکست است.



شکل ۴-۴۴ ترک‌های نمونه S.C.Cube در لحظات قبل از شکست

دومین نمونه از گروه چهار با نام S.C.Pipe محصور شوندگی را توسط دو مقطع دایروی به قطر ۶۳ میلیمتر تامین می‌کند. منحنی بار تغییر مکان وسط دهانه این نمونه تحت آزمایش خمش ۴ نقطه در شکل ۴-۴۵ نشان داده شده است. این منحنی نشان می‌دهد پس از رسیدن به ظرفیت باربری، در شاخه دوم نمودار افت ۱۵ درصدی در مقاومت رخ داده، سپس ناحیه کوتاه تسلیم در شاخه سوم به صورت تقریباً افقی شکل می‌گیرد. در نهایت پس از افت شدید مقاومت تیر شکسته شد.



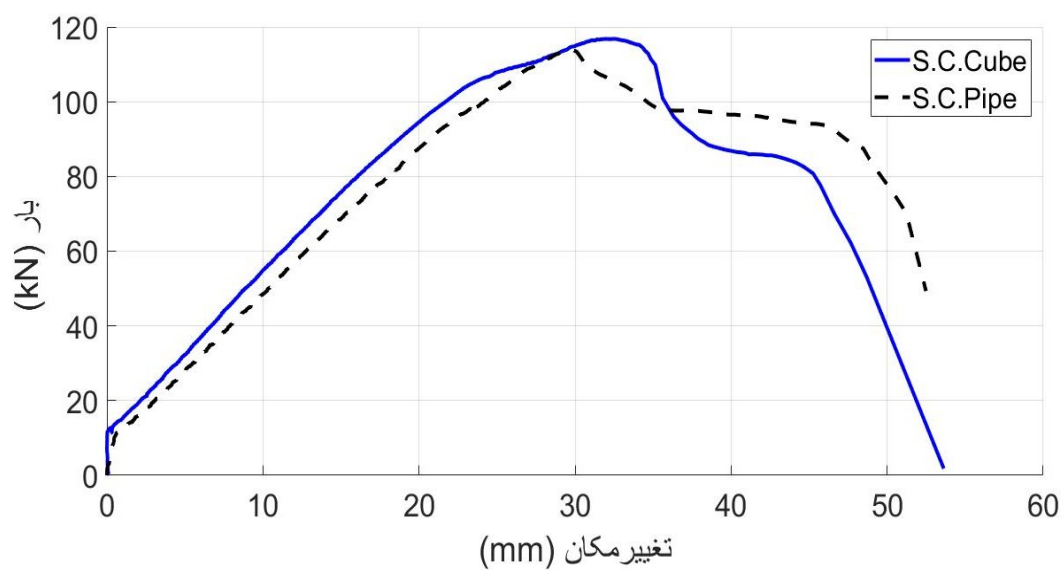
شکل ۴-۵ منحنی بار - تغییر مکان تیر S.C.Pipe

در نمونه S.C.Pipe، اولین ترک قائم خمشی در ناحیه یک‌سوم میانی در بار ۱۹.۶ کیلونیوتن مشاهده شد. سپس با رسیدن بار به ۲۹.۴ کیلونیوتن ترک‌های مورب خمشی در ناحیه یک‌سوم کناری شکل گرفت. با افزایش بار و رسیدن آن به ۵۸.۸ کیلونیوتن، طول ناحیه ترک تقریباً سه‌چهارم طول دهانه تیر را در بر گرفت. با افزایش بار گذاری تا ظرفیت باربری تیر معادل ۱۱۳.۹۴ کیلونیوتن، ترک‌ها در ارتفاع تیر شروع به بالا رفتن کردند اما وارد ناحیه محصور شده نشدند. سپس ترک‌های افقی در نزدیکی‌های سطح بتن واقع در ناحیه محصور شده شکل گرفت که نشان دهنده عملکرد محصورشدگی است. این ترک‌ها در ناحیه محصور شده گسترش پیدا کرده و نهایتاً با اتصال ترک‌های افقی ناحیه محصور شده و ترک‌های قائم خمشی، انهدام تیر در حد فاصل بین دو نوار CFRP و در زیر ناحیه محصور شده رخ داد. شکل ۴-۴۶ (الف) و (ب) به ترتیب زمانی، ترک‌های نمونه S.C.Pipe را لحظاتی پیش از وقوع شکست نشان داده و شکل ۴-۴۶ (ج) تصویر این نمونه بعد از شکست است.



شکل ۴-۶ ترک های نمونه S.C.Pipe در لحظات قبل از شکست

در ادامه با رسم منحنی بار تغییر مکان وسط دهانه هر دو نمونه‌ی S.C.Cube و S.C.Pipe از گروه چهار در شکل ۴-۷، به مقایسه رفتار آن‌ها تحت آزمایش خمش چهار نقطه پرداخته شد.



شکل ۴-۷ منحنی بار تغییر مکان گروه چهار

مشاهدات حکایت از افزایش ناچیز ۲.۵٪ در ظرفیت باربری نمونه S.C.Cube نسبت به نمونه S.C.pipe دارد. از طرف دیگر، چاق شدگی در نمودار بار تغییر مکان نمونه S.C.Pipe نسبت به نمونه S.C.Cube هرچند اندک، مشهود است. شایان ذکر است ارتفاع ناحیه محصور شده در نمونه S.C.Pipe کمتر از نمونه S.C.Cube بود که این امر، می‌تواند دلیلی موثق بر کاهش ظرفیت باربری این نمونه باشد. با این وجود، چاق شدگی این نمونه قابل توجه است.

از طرف دیگر همانطور که در شکل ۴-۴۸ و شکل ۴-۴۹ قابل مشاهده است، طول ناحیه ترک نمونه S.C.Cube اندکی از نمونه S.C.Pipe بیشتر بوده و ترک‌ها تا نزدیکی تکیه‌گاه گسترش یافتند. به علاوه، ورود ترک‌های مورب خمشی به ناحیه یک‌سوم کناری در هر دو نمونه در بار ۳ تن رخ داد. از طرف دیگر، شکست هر دو نمونه در ناحیه یک‌سوم میانی و در بخش محصور شده و زیر آن رخ داد.



ب) نمونه S.C.Pipe

الف) نمونه S.C.Cube

شکل ۴-۴۸ الگوی ترک نمونه‌های گروه چهار بعد از شکست



ب) تصویر شماتیک ترک های نمونه S.C.Pipe

الف) تصویر شماتیک ترک های نمونه S.C.Cube

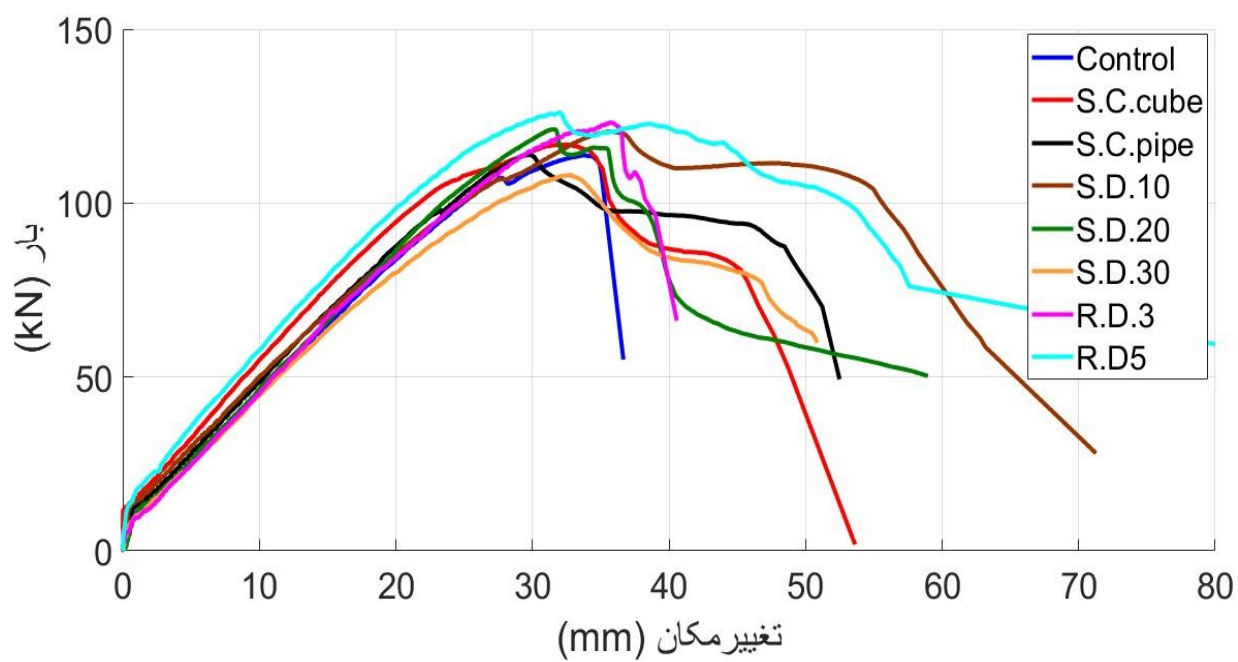
شکل ۴-۴۹ تصویر شماتیک ترک‌های گروه چهار

در نهایت با استفاده از تحلیل نتایج به دست آمده از آزمایش گروه چهار، بهبود ۱۸.۵ درصدی در شکل پذیری و ۲۵.۷۷ درصدی استهلاک انرژی در نمونه S.C.Pipe نسبت به نمونه S.C.Cube مشاهده می‌شود. اگرچه انتظار می‌رفت نمونه S.C.Cube به دلیل ارتفاع بیشتر محصور شدگی نسبت به نمونه S.C.Pipe شکل پذیری بهتری ارائه دهد اما کاهش ۸۱ درصدی مقاومت در شاخه دوم منحنی، اثر سخت شدگی در شاخه سوم را محو کرده و در نتیجه مقدار شاخص μ و استهلاک انرژی کاهش یافت.

۴-۶-۵ جمع بندی نتایج حاصل از آزمایش تیر ها

از جمله اصول مهم در طراحی سازه، تامین شکل پذیری است که در بخش ۳-۱۰ به طور مفصل توضیح داده شد. در طراحی و ساخت سازه‌ها، فارغ از ظرفیت باربری، از هر عضو سازه‌ای انتظار می‌رود وقوع شکست و تخریب را به منظور تامین ایمنی و بهسازی هشدار دهد. به همین دلیل، برای مقایسه ظرفیت شکل پذیری تیرها، شاخصی به نام μ معرفی گردید که از تقسیم تغییر مکان نهایی (δ_u) بر تغییر مکان متناظر با تسلیم آرماتور (δ_y) مطابق رابطه (۳-۴) حاصل می‌شود. بنابراین، در ابتدای این بخش، منحنی بار تغییر مکان وسط دهانه تمامی نمونه‌ها در شکل ۴-۵۰ ترسیم شده، سپس نتایج حاصل از آزمایش خمش ۴ نقطه به همراه شکل پذیری و استهلاک انرژی نمونه‌ها در جدول ۴-۳ ارائه شد.

در این پژوهش انرژی کل نمونه‌ها در دو فاز مورد بررسی و مقایسه قرار گرفت. در فاز اول، انرژی الاستیک نمونه‌ها معادل سطح زیر نمودار از ابتدا تا تغییر مکان متناظر با δ_y محاسبه گردید. در فاز دوم، انرژی پلاستیک نمونه‌ها معادل سطح زیر نمودار تا رسیدن به ۸۰ درصد ظرفیت باربری عضو (پس از نقطه حداکثر مقاومت) محاسبه گردید.



شکل ۴-۵ منحنی بار - تغییر مکان کلیه تیرها

جدول ۴-۳ مقایسه نتایج نمونه ها

گروه	نمونه	P_{cr} kN	δ_{cr} mm	P_{max} kN	$\delta_{P_{max}}$ mm	$0.8P_{max}$ kN	$\delta_{0.8P_{max}}$ mm	سختی	$\mu = \delta_u / \delta_y$	انرژی الاستیک kN.mm	انرژی پلاستیک kN.mm	انرژی کل kN.mm
گروه یک	Control	۹.۷۷	۰.۶۴	۱۱۳.۷۸	۳۳.۷۴	۹۱.۰۳	۳۵.۵۷	۴.۱۷	۱.۳	۱۶۰۶.۴	۹۱۰.۴	۲۵۱۶.۸
گروه دو	R.D.3	۸.۷	۰.۷۴	۱۲۳.۱۳ (/+.۸.۲۱) ^a	۳۵.۷۴ (/+.۵.۹) ^b	۹۸.۵ (/+.۸.۲۱) ^a	۳۸.۶۵ (/+.۸.۶۴) ^b	۴.۱۳ (/-.۱)	۱.۲۹ (/-.۰.۶۵) ^c	۱۸۹۳.۵ (/+.۱۷.۹) ^d	۱۰۲۹.۱ (/+.۱۳) ^d	۲۹۲۲.۷ (/+.۱۶.۱۲) ^d
	R.D.5	۱۲.۹	۰.۴۵	۱۲۶.۰۲ (/+.۱۰.۷۵)	۳۱.۹۵ (/-.۵.۲۹)	۱۰۰.۸۲ (/+.۱۰.۷۵)	۵۲.۷۰ (/+.۴۸.۱۴)	۵ (/+.۱۹.۶)	۲۰.۹ (/+.۵۹.۹۹)	۱۷۰۰.۴ (/+.۵.۸)	۳۱۹۹.۹ (/+.۲۵۱)	۴۹۰۰.۳ (/+.۹۴.۷)
گروه سه	S.D.10	۱۳.۶۳	۰.۷	۱۲۰.۵۳ (/+.۵.۹۲)	۳۵.۶۷ (/+.۵.۷۲)	۹۶.۴۲ (/+.۵.۹۲)	۵۶.۳۴ (/+.۵۸.۳۶)	۴.۱۹ (/+.۰.۴۵)	۱.۹۶ (/+.۵۰.۱۸)	۱۸۳۸.۲ (/+.۱۴.۴)	۳۰۷۸.۹ (/+.۲۳۸)	۴۹۱۷.۱ (/+.۹۵.۳۷)
	S.D.20	۱۳.۲۶	۱.۴۳	۱۲۱.۱۹ (/+.۶.۵۱)	۳۱.۵ (/-.۶.۶۴)	۹۶.۹۵ (/+.۶.۵۱)	۳۸.۴۵ (/+.۸۰.۸)	۴.۳۱ (/+.۳.۳۴)	۱.۳۷ (/+.۴.۸۶)	۱۷۴۳ (/+.۸.۵)	۱۱۶۳.۸ (/+.۲۷.۸)	۲۹۰۶.۸ (/+.۱۵.۵)
	S.D.30	۸.۱۹	۰.۶	۱۰۸.۱۲ (/-.۴.۹۸)	۳۲.۸۱ (/-.۲.۷۴)	۸۶.۴۵ (/-.۴.۹۸)	۳۸.۵۴ (/+.۸.۳۴)	۳.۹۷ (/-.۴.۷)	۱.۴۲ (/+.۸.۶۳)	۱۵۲۹.۷ (/-.۴.۸)	۱۱۴۴.۱ (/+.۲۵.۷)	۲۶۷۳.۸ (/+.۶.۲۴)
گروه چهار	S.C.Cube	۱۲.۲۹	۰.۱۳	۱۱۶.۸۱ (/+.۲.۶۶)	۳۲.۴۶ (/-.۳.۷۹)	۹۳.۴۶ (/+.۲.۶۶)	۳۶.۹۲ (/+.۳.۷۹)	۴.۸۵ (/+.۱۶.۳)	۱.۵۳ (/+.۱۷.۶۳)	۱۴۹۰.۲ (/-.۷.۲)	۱۴۲۵.۵ (/+.۵۶.۶)	۲۹۱۵.۷ (/+.۱۵.۸۵)
	S.C.Pipe	۱۱.۵۸	۰.۶۸	۱۱۳.۹۴ (/+.۰.۱۳)	۲۹.۷۵ (/-.۱۱.۸۳)	۹۱.۱۵ (/+.۰.۱۳)	۴۶.۹۸ (/+.۳۲.۰۷)	۴.۴ (/+.۵.۷)	۱.۸۲ (/+.۳۹.۴۳)	۱۵۲۹.۱ (/-.۴.۸)	۲۱۳۸ (/+.۱۳۵)	۳۶۶۷.۲ (/+.۴۵.۷۱)

(a) درصد تغییرات بار نسبت به نمونه کنترل

(b) درصد تغییرات جابجایی نسبت به نمونه کنترل

(c) درصد تغییرات شکل پذیری نسبت به نمونه کنترل

(d) درصد تغییرات انرژی جذب شده نسبت به نمونه کنترل

از بررسی نتایج شکل ۴-۵۰ و جدول ۴-۳ می‌توان نتیجه گرفت بیشترین و کمترین مقاومت به ترتیب مربوط به نمونه R.D.5 از گروه دو با ۱۰.۷۵ درصد افزایش و نمونه S.D.30 از گروه سه با ۴.۹۸ درصد کاهش نسبت به نمونه کنترل می‌باشد. نتایج حاکی از آن است که از جهت تاثیر در مقاومت، گروه دو با میانگین ۸.۳ درصد بهبود در رتبه اول، گروه سه در رتبه دوم و گروه چهارم با تغییرات ناچیز در رتبه آخر تاثیر گذاری قرار گرفتند. به عبارت دیگر، می‌توان اذعان داشت محصور شدگی به روش نوارهای قائم و ناپیوسته، بیشترین تاثیر بر ظرفیت باربری تیر داشته و مقاومت تیر را تا ۱۰٪ افزایش داده است.

بر اساس نتایج بدست آمده از جدول ۴-۳ مشاهده گردید نمونه‌ی تیر مرجع دارای شکل پذیری برابر ۱.۳ است. این مقدار شکل پذیری ناشی از رفتار غیرخطی بتن در فشار بوده و میزان مطلوبی نمی‌باشد.

به جهت مقایسه شکل پذیری بین نمونه‌های آزمایش شده، نمونه‌ای که بتن فشاری توسط نوارهای CFRP با عرض ۵ سانتیمتر و فاصله آکس تا آکس ۱۰ سانتیمتر از هم به صورت قائم و منقطع محصور شده (R.D.5) بهترین عملکرد در شکل پذیری را داشت. این نوع محصور شدگی توانست شکل پذیری را نسبت به نمونه تیر کنترل تا ۶۰٪ بهبود بخشد. از سویی دیگر، افزایش ۹۴.۷ درصدی ضریب استهلاک انرژی این نمونه نسبت به تیر کنترل نیز بسیار جالب توجه است.

بعد از نمونه R.D.5 در مقایسه شکل پذیری، نمونه‌ای که با نوارهای CFRP به صورت منقطع و مارپیچ با زاویه پیچش ۱۰ درجه محصور شده بود (S.D.10) و همچنین نمونه‌ای که بتن فشاری توسط دو عدد نوار CFRP مارپیچ دایروی (S.C.Pipe) به ترتیب ۵۰.۱۸٪ و ۳۹.۴۳٪ شکل‌پذیری را افزایش دادند که از جهت بهبود شکل‌پذیری در مرتبه دوم و سوم قرار می‌گیرند. از طرف دیگر استهلاک انرژی این نمونه‌ها که به ترتیب ۹۵.۳۷ درصد و ۴۵.۷۱ درصد بوده، بسیار جالب توجه است.

نکته حائز اهمیت در بررسی این نمونه‌ها، تکمیل نشدن فرایند محصورشدگی است که از مقایسه الگوهای ترک مورد استنتاج قرار گرفت. الگوهای ترک نشان داد در صورتیکه ارتفاع ناحیه محصور شده بیشتر بود، می‌توانست عملکرد بهتری در شکل‌پذیری داشته باشد. زیرا نمونه‌های مذکور، در زیر ناحیه محصور شده شکسته شد.

در ادامه نمونه‌های S.D.Cube، S.D.30 و S.D.20 به ترتیب با ۱۷.۶۳٪، ۸.۶۳٪ و ۴.۸۶٪ بهبود در شکل‌پذیری در رده‌های بعدی بهبود عملکرد محصور شدگی قرار می‌گیرند. در مورد این نمونه‌ها می‌توان اذعان داشت که عملاً محصورشدگی به طور مطلوب در فرایند شکست وارد نشده است. در ادامه نمونه R.D.3 عملاً تاثیری بر شکل‌پذیری نشان نداد. همچنین محصور شدگی به جز در نمونه R.D.5 و S.C.Cube که به ترتیب ۱۹.۶٪ و ۱۶.۳٪ سختی نمونه‌ها بهبود یافت در دیگر نمونه‌ها تغییرات سختی بسیار ناچیز و زیر ۶٪ بوده است.

از طرف دیگر، نتایج نشان می‌دهد محصور شدگی تاثیر چندانی در انرژی الاستیک نمونه‌ها نداشته و حتی در نمونه‌های گروه چهار با کاهش انرژی همراه بوده اما انرژی پلاستیک را به طور چشم‌گیری افزایش داده است. به طوریکه حدوداً افزایش انرژی ۲۵۰ درصدی در نمونه‌های R.D.5 و S.D.10 قابل ملاحظه است.

در نهایت می‌توان نتیجه گرفت استفاده از نوارهای قائم و ناپیوسته بهترین تاثیر در شکل‌پذیری و استهلاک انرژی دارند. به علاوه، با احتساب کمتر بودن عمق ناحیه محصور شده در نمونه S.C.Pipe و با توجه به استهلاک انرژی بالا، شکل‌پذیری مطلوب و سهولت اجرا، می‌توان نتیجه گرفت یکی از حالات مناسب برای تامین شکل‌پذیری ناحیه فشاری، استفاده از نوارهای پیوسته مارپیچ با مقطع دایروی می‌باشد.

از طرف دیگر، با مقایسه رفتار نمونه‌های گروه دو و سه، می‌توان دریافت که عرض و فاصله بین نوارها، مقدار بهینه‌ای دارد. در صورتیکه فاصله بین نوارها زیاد باشد، محصورشدگی رخ نمی‌دهد، با کمتر شدن فاصله بین نوارها، در ابتدا مقاومت نمونه افزایش یافته و سپس در شکل‌پذیری تاثیر مثبت می‌گذارد. اما در صورتیکه این فاصله بیشتر شود، نوارهای محصور کننده مانند درز سرد عمل کرده و پیش از آنکه محصور شدگی عمل کند، تیر بتنی دچار شکست می‌شود.

قابل به ذکر است، در حین مراحل ساخت و بتن‌ریزی، عمده کرنش‌سنج‌ها دچار آسیب و از مدار خارج شد. نتیجه کرنش‌سنج‌های باقیمانده نیز با نویز بسیار زیاد همراه بود. بنابراین به علت خطای زیاد این کرنش‌سنج‌ها، نتایج ارائه نگردید.

فصل ۵. نتیجه گیری

۵-۱ مقدمه

استفاده از میلگردهای FRP در محیط‌های قلیایی نظیر سواحل که بر خلاف فولاد مقاومت بالایی مقابل خوردگی دارند، در سال‌های گذشته توجه بسیاری از مهندسين را به خود جلب کرده است. ظرفیت کششی بسیار بالا و وزن سبک در کنار مقاومت مقابل خوردگی، کاربرد این نوع میلگردها را بیشتر می‌کند. از طرف دیگر، رفتار کاملاً الاستیک و فاقد ناحیه تسلیم در این نوع میلگردها، شکل‌پذیری اعضای بتنی را کاهش داده و شکست ترد ایجاد می‌کند.

در این پایان‌نامه، تحقیقات صورت گرفته پیرامون تیرهای بتنی مسلح به میلگرد FRP و راه حل‌های مختلف پیشنهاد شده، شرح داده شده است. سپس با هدف یافتن راهکاری مناسب، جهت افزایش شکل‌پذیری تیرهای بتنی مسلح به میلگرد FRP، دو رویکرد پیشنهاد گردید.

در رویکرد اول، تغییر رفتاری منحنی تنش-کرنش بتن فشاری با اصلاح طرح اختلاط بتن پیشنهاد گردید. با ساخت ۱۸ نمونه استوانه‌ای شامل بتن معمولی به عنوان نمونه کنترل و ۵ طرح اختلاط بتن اصلاح شده توسط پلیمر، عملکرد فشاری نمونه مقایسه شد. در ادامه با رسم منحنی تنش-کرنش، شکل‌پذیری و استهلاک انرژی هر طرح اختلاط مقایسه گردید.

رویکرد دوم تغییر رفتاری بتن فشاری را به صورت فیزیکی و توسط محصورشدگی با استفاده از الیاف CFRP ارائه می‌کند. بنابراین ۸ نمونه تیر با طول دهانه ۱.۸ متر شامل یک نمونه تیر کنترل فاقد محصور شونده و هفت نوع متفاوت محصور شدگی در ناحیه فشاری تیر ساخته و مورد آزمایش خمش ۴ نقطه قرار گرفت. درصد آرماتور کششی تمام نمونه‌ها بیشتر از درصد بالانس و به گونه‌ای طراحی گردید که شکست خمشی در ناحیه بتن فشاری رخ دهد. بنابراین سه عدد میلگرد GFRP با نمره ۱۲ در ناحیه کششی قرار گرفت. به منظور جلوگیری از شکست برشی، تعداد ۱۷ عدد خاموت فولادی با نمره ۸ در یک‌سوم کناری از هر طرف استفاده شد. در نهایت ناحیه فشاری بتن با استفاده از نوارهای CFRP در سه گروه به صورت قائم و منقطع، مارپیچ و منقطع و مارپیچ و پیوسته محصور شد. در ادامه نمونه‌ها تحت بار خمش ۴ نقطه قرار گرفته و ظرفیت باربری، تغییر شکل، شکل‌پذیری، استهلاک انرژی و الگوی ترک نمونه‌ها بررسی و مقایسه گردید.

۵-۲ نتایج

پژوهش‌های این پایان‌نامه، نتایجی به همراه داشت که در ادامه به مهم‌ترین آن‌ها به تفکیک رویکرد، اشاره شده است.

۵-۲-۱ رویکرد اول: اصلاح بتن فشاری توسط پلیمر

۱. افزودن پلیمرهای WEB307، ASL303 و انواع SCB301 به بتن، مقاومت آن را بین ۲۲٪ تا ۳۷٪ کاهش داد.
۲. افزودن پلیمر WEB307 به بتن باعث ۲۱٪ افزایش و پلیمرهای ASL303 و انواع SCB301 باعث کاهش ۵ تا ۱۶٪ در کرنش معادل حداکثر تنش نسبت به بتن معمولی شدند.
۳. کلیه نمونه‌های اصلاح شده با کاهش ۲۰ تا ۶۰ درصد مدول الاستیسیته همراه بودند که نمونه ASL303 با ۲۱ درصد کاهش، بیشترین مدول الاستیسیته و نمونه SBC-D0 با ۵۹ درصد کاهش کمترین مدول الاستیسیته را ثبت کردند.
۴. بتن اصلاح شده با پلیمر SCB-D5 و WEB307 توانستند شکل پذیری بتن فشاری را به مقدار ناچیزی (به ترتیب ۹.۵٪ و ۱.۶٪ نسبت به بتن معمولی) بهبود بخشند. شکل‌پذیری در دیگر نمونه‌ها با کاهش بین ۷ تا ۱۶ درصد نسبت به بتن معمولی همراه بود.
۵. استهلاک انرژی در تمامی نمونه‌های اصلاح شده توسط پلیمر نسبت به بتن معمولی کاهش یافت. بیشترین استهلاک انرژی مربوط به نمونه WEB307 با ۱۳ درصد کاهش و کمترین استهلاک انرژی مربوط به نمونه SBC-D0 با ۵۲ درصد کاهش نسبت به بتن معمولی مشاهده شد.
۶. با صرف نظر از افزایش ناچیز شکل‌پذیری در نمونه WEB307، نمونه SBC-D5 با افزایش حدود ۱۰ درصدی در شکل‌پذیری بهترین پلیمر اصلاح کننده بود. از طرف دیگر کاهش ۲۶ درصدی استهلاک انرژی این نمونه نسبت به بتن معمولی که به دلیل کاهش ۳۶ درصدی در حداکثر تنش می‌باشد، سبب گردید که استفاده از این نوع پلیمرهای اصلاح کننده در طرح اختلاط بتن، جهت افزایش شکل‌پذیری آن توصیه نشود.

۵-۲-۲ رویکرد دوم: اثر محصورشدگی تیر بتنی مسلح به میلگرد FRP

۱. تمام نمونه تیرهای محصور شده به غیر از نمونه S.D.30 ظرفیت باربری تیر را افزایش دادند. بنابراین نمونه R.D.5 با افزایش ۱۱ درصدی نسبت به تیر کنترل بیشترین مقاومت و نمونه S.D.30 با ۵ درصد کاهش، کمترین ظرفیت باربری بین نمونه‌ها را به نمایش گذاشتند. از طرف دیگر، نتایج نشان داد نمونه تیرهایی که توسط نوارهای قائم و منقطع (گروه دو) محصور شده بودند، بیشترین تاثیر بر ظرفیت باربری تیرها داشته و مقاومت تیر را تا ۱۱٪ نسبت به تیر کنترل بهبود بخشیدند.

۲. عرض و فاصله نوارهای محصور کننده، از جمله موثرترین پارامتر در بهبود ظرفیت باربری است. در آزمایشات انجام شده مشاهده گردید که نحوه محصور شدگی (مارپیچ یا قائم) تاثیر چندانی در ظرفیت باربری نهایی تیر ندارد.

۳. در تمام نمونه‌های محصور شده بجز نمونه R.D.3 می‌توان بهبود شکل‌پذیری و استهلاک انرژی را نسبت به نمونه تیر کنترل شاهد بود. همچنین، نمونه تیرهای R.D.5، S.D.10 و S.C.pipe در بین نمونه‌های مورد آزمایش بهترین عملکرد را در بهبود شکل‌پذیری داشتند. در این نمونه‌ها به ترتیب می‌توان ۶۰٪، ۵۰٪ و ۴۰٪ افزایش شاخص شکل‌پذیری را نسبت به نمونه کنترل مشاهده کرد.

۴. نمونه تیرهای R.D.5، S.D.10 و S.C.Pipe انرژی کل بسیار بالاتری نسبت به نمونه تیر کنترل دارا بودند. این نمونه‌ها به ترتیب ۹۵٪، ۹۵٪ و ۴۶٪ انرژی کل بیشتری نسبت به نمونه تیر کنترل جذب نمودند.

۵. با توجه به بهبود بالای ۳۰ درصد در شکل‌پذیری یک نمونه از هر گروه، می‌توان نتیجه گرفت، نوع محصور شدگی اعم از مارپیچ یا قائم، پیوسته یا ناپیوسته بودن نوارها، تاثیر تعیین کننده نداشته بلکه عرض و فاصله نوار تاثیرگذار است.

۶. با بررسی نتایج بدست آمده از آزمایش گروه دو و سه، مشخص می‌شود، عرض و فاصله نوارها مقدار بهینه ای دارد. نتایج نشان داد، فاصله زیاد نوارها تاثیری در شکل‌پذیری نخواهد گذاشت. با کمتر شدن فاصله در ابتدا ظرفیت باربری نمونه افزایش پیدا کرده و سپس شکل‌پذیری بهبود می‌یابد. در صورتیکه این فاصله بیشتر شود، پیش از آنکه محصور شدگی وارد عمل شود، نوارهای CFRP مانند درز سرد عمل کرده و گسیختگی تیر را رقم خواهد زد. بنابراین شرایط تامین شکل‌پذیری فراهم نخواهد شد.

۷. با در نظر داشتن این مهم که عمق ناحیه محصور شده در نمونه S.C.Pipe کمتر از دیگر نمونه‌ها بوده (عمق ناحیه محصور شده در این نمونه ۱۶ درصد کمتر از دیگر نمونه‌ها است) در حالیکه در این نمونه افزایش ۴۰ درصدی شکل‌پذیری و ۱۳۵ درصدی در استهلاک انرژی مشاهده گردید، می‌توان نتیجه گرفت که محصور شدگی توسط نوارهای مارپیچ پیوسته با مقطع دایروی، از جمله موثرترین روش‌ها در بهبود شکل‌پذیری و استهلاک انرژی است. از طرف دیگر، از نظر اجرایی نیز این نوع محصور شدگی نسبت به دیگر انواع محصور شدگی استفاده شده در این پژوهش، بسیار ساده‌تر و سریع‌تر می‌باشد.

۳-۵ پیشنهادات

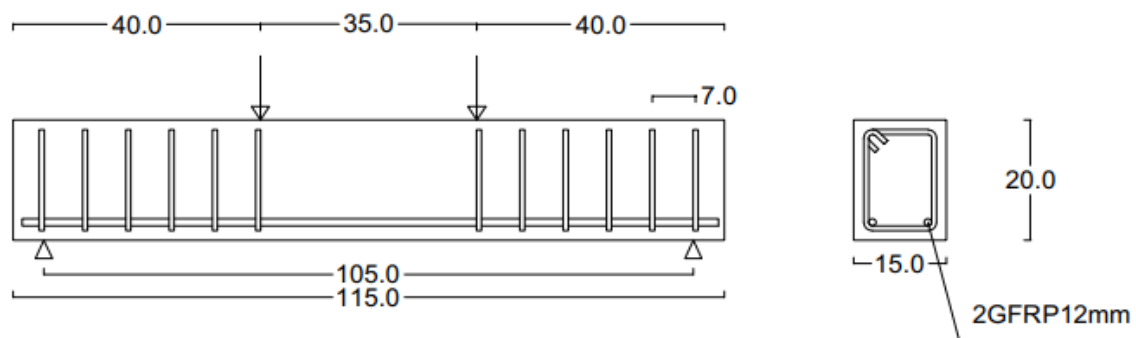
در ادامه پژوهش‌های انجام شده، تحقیق در موارد زیر پیشنهاد می‌گردد.

۱. آزمایش رفتار انواع دیگر بتن‌های اصلاح شده توسط پلیمر
۲. بررسی عمق بهینه محصور شدگی در تیرهای بتنی
۳. پژوهش پارامتری و آزمایشگاهی پیرامون بهینه سازی تناسب عرض و فاصله نوارهای محصور کننده
۴. مطالعه عملکرد تیرهای بتنی مسلح به میلگرد FRP محصور شده در ناحیه فشاری تحت بار چرخه‌ای
۵. مقطع مورد بررسی در این پژوهش، مقطع مستطیلی است، حال آنکه می‌توان اثر محصور شدگی را بر روی مقاطع دیگر نظیر مقاطع T شکل نیز مطالعه نمود.
۶. در این پژوهش، تنها به بررسی رفتار خمشی تیرها پرداخته شده است. بنابراین می‌توان به اثر دیگر نیروها مانند نیروی برشی و لنگر پیچشی نیز پرداخت.

سخت

ساخت و آزمایش نمونه‌های اولیه پیش از ساخت نمونه‌های اصلی، به منظور دستیابی به عملکرد کلی نمونه‌ها ضروری است. بررسی رفتار نتایج نمونه‌های اولیه یاری دهنده طراحی دقیق تر و رفع کننده خطاهای احتمالی طراحی می‌باشد. به همین منظور پیش از ساخت نمونه‌های اصلی، دو نمونه تیر ساخته و مورد بررسی قرار گرفت. در ادامه نتایج این نمونه‌ها ارائه شده است.

نخستین نمونه اولیه با ابعاد 20×15 سانتیمتر و طول دهانه ۱۰۵ سانتیمتر مسلح به دو عدد میلگرد GFRP به قطر ۱۲ میلیمتر ساخته و آزمایش شد. طرح اختلاط این نمونه با هدف مقاومت مشخصه ۲۵ مگاپاسکال مطابق جدول ۳-۲ در نظر گرفته شد. همچنین در این نمونه از میلگرد فولادی به قطر ۸ میلیمتر و فاصله ۷ سانتیمتر در یک‌سوم از هر طرف به عنوان خاموت استفاده گردید. تصویر ۱ شکل شماتیک نخستین نمونه اولیه را نشان می‌دهد.



تصویر ۱ شکل شماتیک نخستین نمونه اولیه

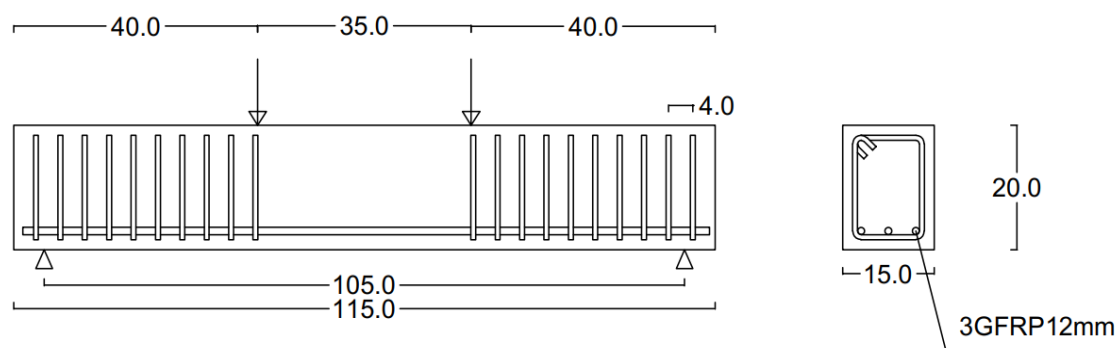
این نمونه پس از ۲۰ روز نگهداری، تحت خمش ۴ نقطه مورد آزمایش قرار گرفت. تصویر ۲ این نمونه را بعد از آزمایش نشان می‌دهد.



تصویر ۲ نخستین نمونه اولیه بعد از آزمایش خمش ۴ نقطه

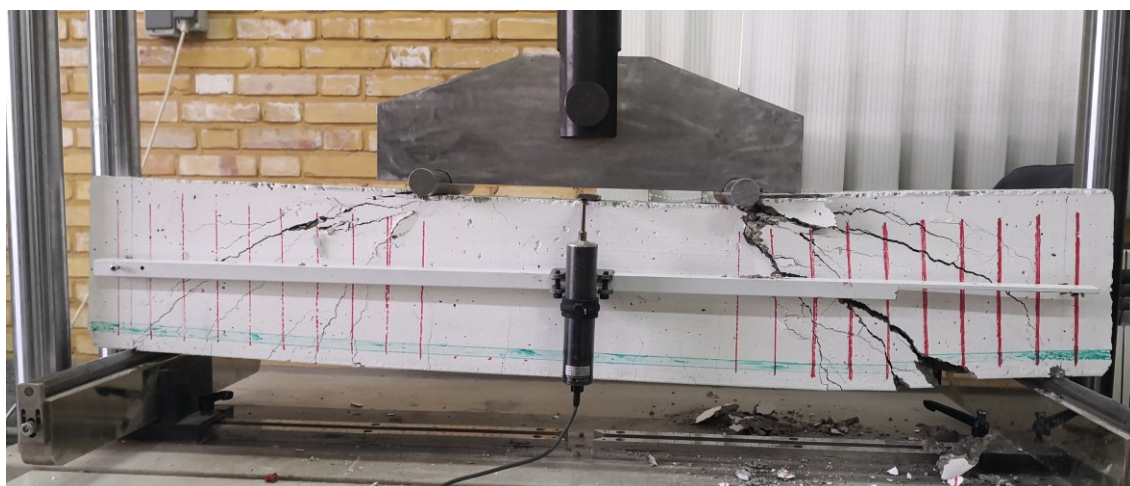
مشاهده گردید این نمونه در بار معادل ۹۸ کیلونیوتن و با حداکثر تغییر مکان وسط دهانه ۸ میلیمتر شکسته شد. بروز ترک‌های مورب در یک‌سوم‌های کناری نشان دهنده بروز مود شکست برشی است. از طرف دیگر نقش لهدگی نیز بی تاثیر نبوده و ترک نهایی که منجر به شکست نمونه شد، از محل تکیه‌گاه به صورت مورب آشکار شد.

پس از بررسی نتایج حاصل از نخستین نمونه اولیه، نمونه دوم با ابعاد یکسان و مقاومت مشخصه بتن فشاری برابر ۲۵ مگاپاسکال ساخته شد. در این نمونه از ۳ عدد میلگرد GFRP در ناحیه کششی استفاده شد. از طرف دیگر، از آنجا که هدف شکست در مود خمشی است، فاصله خاموت‌ها در این نمونه به ۴ سانتیمتر کاهش یافت تا مقاومت بیشتری مقابل برش داشته باشد. تصویر ۳ شکل شماتیک دومین نمونه را نشان می‌دهد.



تصویر ۳ شکل شماتیک دومین نمونه

پس از گذشت ۲۸ روز از ساخت و نگهداری نمونه، دومین آزمایش اولیه ۴ نقطه انجام گرفت. تصویر ۴ دومین نمونه را بعد از شکست نشان می‌دهد.



تصویر ۴ دومین نمونه بعد از شکست

از بررسی روند گسترش ترک‌ها، مشاهده شد در ابتدای آزمایش ترک‌های خمشی به صورت قائم در میانه‌ی دهانه شکل گرفت، اما با افزایش بارگذاری ترک‌های مورب خمشی-برشی در یک‌سوم‌های کناری مشاهده گردید. در نهایت با رسیدن به بار ۱۵۷ کیلونیوتن و تغییر مکان وسط دهانه برابر ۲۰ میلیمتر، این نمونه دچار شکست در مود خمشی-برشی در یک‌سوم کناری گردید.

در نتیجه‌ی این آزمایش‌ها، به منظور جلوگیری از حاکمیت مود برش، نمونه تیرهای اصلی آزمایش با طول دهانه ۱۸۰ سانتیمتر و ابعاد 14×25 به همراه خاموت‌های بسته با فاصله ۴ سانتیمتر طراحی و ساخته شد.



- [1] ACI-318, C. Mancuso, and F. M. Bartlett, "ACI 318-14 Criteria for Computing Instantaneous Deflections.," *ACI Struct. J.*, vol. 114, no. 5, p. 592, 2017.
- [2] J. G. M. James K. Wight, *REINFORCED CONCRETE Mechanics and Design*, 5th ed. 2009.
- [3] ACI-222R-01, "Protection of Metals in Concrete Against Corrosion Reported by ACI Committee 222," *Am. Concr. Inst.*, vol. 01, no. Reapproved, pp. 1–45, 2010.
- [4] "ACI 440-1R-15 Guide for the Design and Construction of Concrete Reinforced with Fiber Reinforced Polymers FRP Bars ACI 440.pdf." .
- [5] *440.2R-17: Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Concrete Structures*. 2017.
- [6] L. Lam and J. G. Teng, "Design-oriented stress–strain model for FRP-confined concrete," *Constr. Build. Mater.*, vol. 17, no. 6–7, pp. 471–489, 2003.
- [7] J. C. M. Ho, J. Y. K. Lam, and A. K. H. Kwan, "Effectiveness of adding confinement for ductility improvement of high-strength concrete columns," *Eng. Struct.*, vol. 32, no. 3, pp. 714–725, 2010, doi: 10.1016/j.engstruct.2009.11.017.
- [8] M. Nematzadeh, M. Mousavimehr, J. Shayanfar, and M. Omidalizadeh, "Eccentric compressive behavior of steel fiber-reinforced RC columns strengthened with CFRP wraps: Experimental investigation and analytical modeling," *Eng. Struct.*, vol. 226, p. 111389, 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2020.111389>.
- [9] H. F. Isleem, Z. Wang, D. Wang, and S. T. Smith, "Monotonic and cyclic axial compressive behavior of CFRP-confined rectangular RC columns," *J. Compos. Constr.*, vol. 22, no. 4, p. 4018023, 2018.
- [10] G. Campione, "Influence of FRP wrapping techniques on the compressive behavior of concrete prisms," *Cem. Concr. Compos.*, vol. 28, no. 5, pp. 497–505, 2006.
- [11] D. Lau and H. J. Pam, "Experimental study of hybrid FRP reinforced concrete beams," *Eng. Struct.*, vol. 32, no. 12, pp. 3857–3865, 2010.
- [12] M. A. Adam, M. Said, A. A. Mahmoud, and A. S. Shanour, "Analytical and experimental flexural behavior of concrete beams reinforced with glass fiber reinforced polymers bars," *Constr. Build. Mater.*, vol. 84, pp. 354–366, 2015.
- [13] W. Ge *et al.*, "Experimental study on flexural behavior of ECC-concrete composite beams reinforced with FRP bars," *Compos. Struct.*, vol. 208, pp. 454–465, 2019.
- [14] J. Cai, J. Pan, and X. Zhou, "Flexural behavior of basalt FRP reinforced ECC and concrete beams," *Constr. Build. Mater.*, vol. 142, pp. 423–430, 2017.
- [15] J. L. Pan and F. Yuan, "Experimental study on flexural behaviors of engineered cementitious composite beams reinforced with FRP bars," in *VIII International Conference on Fracture Mechanics of Concrete and Concrete Structures FraMCoS*, 2013, vol. 8.
- [16] H. Wang and A. Belarbi, "Ductility characteristics of fiber-reinforced-concrete beams reinforced with FRP rebars," *Constr. Build. Mater.*, vol. 25, no. 5, pp. 2391–2401, 2011.
- [17] V. C. Li and S. Wang, "Flexural behaviors of glass fiber-reinforced polymer (GFRP) reinforced engineered cementitious composite beams," *Mater. J.*, vol. 99, no. 1, pp. 11–21, 2002.
- [18] Y.-F. Wu, "New avenue of achieving ductility for reinforced concrete members," *J. Struct. Eng.*, vol. 132, no. 9, pp. 1502–1506, 2006.

- [19] X. C. Liu, Y. F. Wu, A. Y. T. Leung, and J. G. Hou, "Mechanical behavior of mild steel compressive yielding blocks," in *Proceedings of the first Asia-Pacific conference on FRP in structures, Hong Kong, China, 2007*, pp. 12–14.
- [20] Y. W. Zhou, Y. F. Wu, J. G. Teng, and A. Y. T. Leung, "Ductility analysis of compression-yielding FRP-reinforced composite beams," *Cem. Concr. Compos.*, vol. 31, no. 9, pp. 682–691, 2009.
- [21] Y. W. Zhou, Y. F. Wu, J. G. Teng, and A. Y. T. Leung, "Parametric space for the optimal design of compression-yielding FRP-reinforced concrete beams," *Mater. Struct.*, vol. 43, no. 1, pp. 81–97, 2010.
- [22] Y.-F. Wu, Y.-W. Zhou, and X.-Q. He, "Performance-based optimal design of compression-yielding FRP-reinforced concrete beams," *Compos. Struct.*, vol. 93, no. 1, pp. 113–123, 2010.
- [23] دانشگاه "FRP، ف. جندقی علایی،" بررسی شکل پذیری مقاطع بتنی مسلح به میلگرد های و م. عرب رحیمی صنعتی شاهرود، ۱۳۹۷.
- [24] K. W. Day *et al.*, "Standard Practice for Selecting Proportions for Normal , Heavyweight , and Mass Concrete (ACI 211 . 1-91)," no. Reapproved, pp. 1–38, 2002.
- [25] ASTM Standard C33, "Standard Specification for Concrete Aggregates," *ASTM Int.*, vol. i, no. C, p. 11, 2003, doi: 10.1520/C0033.
- [26] I. Standard, "INTERNATIONAL STANDARD," vol. 2008, 2008.
- [27] P. Matrix, C. Materials, G. P. Rod, W. S. Precision, A. U. Tensile, and C. A. Force, "Standard Test Method for Tensile Properties of Fiber Reinforced Polymer Matrix Composite Bars 1," vol. 06, no. Reapproved, 2011, doi: 10.1520/D7205.
- [28] C. C. Test, T. Drilled, and C. C. Test, "Standard Test Method for Static Modulus of Elasticity and Poisson ' s Ratio of Concrete," doi: 10.1520/C0469.
- [29] T. Paulay and M. J. N. Priestley, "Seismic design of reinforced concrete and masonry buildings," *Bull. New Zeal. Soc. Earthq. Eng.*, vol. 25, no. 4, p. 362, 1992, doi: 10.5459/bnzsee.25.4.362.
- [30] Y.-F. Y.-F. Wu, "New avenue of achieving ductility for reinforced concrete members," *J. Struct. Eng.*, vol. 132, no. 9, pp. 1502–1506, 2006, doi: 10.1061/(asce)0733-9445(2006)132:9(1502).
- [31] ASTM, "ASTM C78 / C78M-18, Standard Test Method for Flexural Strength of Concrete (Using Simple Beam with Third-Point Loading), ASTM International, West Conshohocken, PA, 2018, www.astm.org," vol. i, pp. 1–4, 2018, doi: 10.1520/C0078.

Abstract

Nowadays, building structures in corrosive environments require some considerations. Being light weight, high tensile strength and corrosion resistance are the features that make FRP bars an alternate to steel in the reinforcement of concrete. On the other hand, linear elastic behavior of FRP bars alongside with the brittle behavior of concrete, make a brittle member without considerable ductility. The urgency of ductility and necessity of warning before collapse, caused researches to be conducted in improving the ductility of concrete members reinforced with FRP bars. This study, experimentally investigates the improvement of FRP reinforced concrete beams in two manners.

First, for the purpose of changes in the stress-strain curves of concrete in compression, mix designs were modified with polymers. 18 cylindrical specimens consist of 5 different polymers were tested. A polymer was found with 10 percent improvement in ductility. Decreasing the ultimate strength in this type of polymer caused much lower energy dissipation compared to regular concrete. Therefore, using polymers for ductility improvement of concrete was ignored.

In the second approach, confining the compression region of concrete beams with FRP sheets was considered. 8 reinforced concrete beams with total length of 2m were cast in 7 types of confinements and tested. The 4-point bending test results shows that 3 types of concrete confinements (R.D.5, S.D.10 and S.C.Pipe) can improve beam ductility up to 30-60 percent.

Keywords (5 to 7 keywords): concrete beams, FRP bars, confinement, ductility, polymer modified concrete, four-point bending



Shahrood University of
Technology

Faculty of Civil Engineering

M.Sc. Thesis in Structural Engineering

Experimental investigation on ductility of reinforced concrete beams with FRP bars

By: Erfan Tahrirchi

Supervisor:

Dr. Farshid J. Alaei

Advisor:

Dr. Meysam Jalali

September, 2021