



تأثیر خاموت دورپیچ مستطیلی بر ظرفیت باربری تیر بتن آرمه تحت بار چرخه‌ای

مجتبی لیبب زاده*، فرهاد بستان شیرین، امین خواجه دزفولی
دانشکده عمران و معماری، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳۹۷-۰۳-۲۷
بازنگری: ۱۳۹۷-۰۵-۲۵
پذیرش: ۱۳۹۷-۰۶-۰۹
ارائه آنلاین: ۱۳۹۷-۰۶-۱۴

کلمات کلیدی:

تیربتنی مسلح
خاموت دورپیچ
روش اجزای محدود
بارگذاری چرخه‌ای
ظرفیت باربری

خلاصه: امروزه، استفاده از خاموت‌های دورپیچ مستطیلی به جای خاموت سنتی در ساخت تیرهای بتنی مورد توجه محققین قرار گرفته است. با این حال، تاکنون ظرفیت باربری تیرهای بتنی دارای خاموت دورپیچ تحت بارگذاری چرخه‌ای مورد ارزیابی قرار نگرفته است. در این تحقیق، ابتدا تیرهای بتنی با خاموت سنتی و دورپیچ مستطیلی با کمک روش اجزای محدود در نرم افزار آباکوس شبیه سازی شده و ظرفیت برشی آن‌ها تحت بار چرخه‌ای در قالب منحنی‌های هیستریزس و نیرو-جابجایی بدست آمد. سپس، نتایج مدل توسعه داده شده در این تحقیق با کمک نتایج بدست آمده از پژوهش‌های آزمایشگاهی موجود در ادبیات موضوع مورد اعتبارسنجی قرار گرفتند. در همین راستا و به منظور اعتبارسنجی بهتر نتایج بدست آمده در این تحقیق، از نتایج دو تحقیق مختلف آزمایشگاهی استفاده شده است. در نهایت با انجام مطالعه بصورت پارامتری، تأثیر استفاده از خاموت دورپیچ بر ظرفیت باربری تیرهای بتنی تحت بارهای چرخه‌ای بررسی شد. نتایج بدست آمده نشان داد که تیر با دورپیچ مستطیلی در بارگذاری یک‌سویه عملکردی برابر و بعضاً بهتر از تیر با خاموت‌های سنتی دارد. همچنین در بارگذاری چرخه‌ای، پارامترهای مختلفی نظیر اندازه ی گام، قطر و تغییر الگوی دورپیچ‌ها و مقاومت فشاری بتن، بر ظرفیت باربری تیرهای بتنی تأثیرگذار می باشند.

۱-مقدمه

طراحی و تولید کرد. دورپیچ‌های مستطیلی اگر در کارخانه‌ها تولید شده و در محل پروژه مونتاژ شود، می تواند از نظر زمانی سرعت پروژه را بهبود ببخشد. همچنین نمره میلگرد مارپیچ در مقایسه با میلگرد معمولی خیلی کمتر است و امکان مارپیچ نمودن آن در کارگاه فراهم است. با توجه به امتیازات مطرح شده، تأثیر استفاده از خاموت دورپیچ بر رفتار اعضای بتنی نظیر تیر و ستون توسط محققان مختلفی بررسی شده است.

لونیه مارول و همکاران [۱]، تأثیر استفاده از خاموت‌های دورپیچ در ستون‌های بتنی دایره‌ای شکل تحت بارگذاری‌های مختلف مانند بارگذاری‌های دینامیکی را به صورت گسترده بررسی کردند. در تحقیق آن‌ها که به صورت آزمایشگاهی انجام شده است، آرماتورهای دورپیچ، به صورت دایره‌ای شکل بوده‌اند. نتایج بدست آمده توسط آن‌ها نشان داد که استفاده از خاموت‌های دورپیچ در ستون‌های بتنی منجر به افزایش مقاومت نهایی و شکل‌پذیری ستون می شود. لیانگ و همکاران

تیرها و ستون‌های بتنی دو عضو بسیار مهم در سازه هستند که عملکرد آن‌ها بر یکدیگر تأثیر مستقیم دارد. بر همین اساس، در سال‌های گذشته پژوهش‌های مختلفی به صورت آزمایشگاهی، تحلیلی و عددی و به منظور بررسی رفتار این اعضا تحت بارگذاری‌های مختلف نظیر خمشی، برشی، فشاری، کششی و چرخه‌ای و دینامیکی انجام گرفته است. یکی از عواملی که می تواند منجر به تغییر ظرفیت باربری تیرها و ستون‌های بتنی شود، آرماتورهای برشی می باشند. تحقیقات انجام شده نشان می دهد که استفاده از آرماتورهای دورپیچ به عنوان خاموت برشی می تواند بسیار مؤثرتر از خاموت‌های سنتی باشد [۱-۴]. از سویی دیگر، افزایش سرعت اجرا و عملیات ساخت از اهمیت بسیار بالایی برخوردار است. به همین دلیل بسیاری از قطعات سازه‌ای را در کارخانه‌های ساخت قطعات پیش ساخته می توان

*نویسنده عهده‌دار مکاتبات: Labibzadeh_m@scu.ac.ir



با خاموت دورپیچ مستطیلی و خاموت سنتی تنگ بسته با اعمال لنگر خمشی ناشی از بارگذاری چهار نقطه‌ای به صورت یک‌سویه انجام دادند. در تحقیق آن‌ها، افزایش ۱۵٪ تا تقریباً ۲۲٪ در مقاومت برشی در تیرهای با خاموت دورپیچ مستطیلی نسبت به تیر بتنی با خاموت سنتی، و همچنین افزایش شکل‌پذیری در تیرهای با خاموت دورپیچ تا دو برابر نسبت به تیرهای با خاموت سنتی گزارش شده است. البته در تحقیق کارایانیس و همکاران [۷] نتایج خاصی در ارتباط با وضعیت توزیع تنش و کرنش در تیرهای بتنی دارای خاموت دورپیچ گزارش نشده است. در جدیدترین پژوهش در سال ۲۰۱۶، آزمایش‌هایی توسط نسیم شترت و همکاران [۸] پیرامون تیرهای بتنی دارای خاموت دورپیچ تحت بار یک‌سویه انجام شده است. در این تحقیق گسترده آزمایشگاهی، گزارش شده است که در تمام تیرها، ترک‌های مایل بین تکیه‌گاه و محل اعمال بار قرار دارد که نشان‌دهنده آن است که تمام تیرها بر اثر برش تخریب می‌شوند. در تحقیق آن‌ها بار دیگر مشخص شد که استفاده از خاموت دورپیچ باعث افزایش مقاومت برشی تیرهای بتنی تحت بار یک‌سویه نسبت به تیرهای بتنی دارای خاموت سنتی می‌شود. لیبب زاده و همکاران [۹] در پژوهشی عددی، ستون‌های کوتاه دارای آرماتورهای دورپیچ را شبیه‌سازی کردند. با کمک روش شبکه عصبی مصنوعی و با انجام مطالعه پارامتری، روشی جهت تخمین مقاومت محوری این نوع ستون‌ها تحت بارگذاری محوری ارائه دادند. مارانان و همکاران [۱۰] چندین نمونه تیر بتنی دارای خاموت سنتی و دورپیچ مستطیلی از جنس GFRP را در آزمایشگاه ساخته و تحت لنگر خمشی (بارگذاری چهار نقطه‌ای) یک‌سویه قرار دادند. مارانان و همکاران [۱۰] بیان کردند که استفاده از خاموت دورپیچ مستطیلی باعث افزایش ۲۰ درصدی مقاومت برشی تیر نسبت به حالت تیر دارای خاموت سنتی می‌شود. علت این افزایش مقاومت برشی، زاویه‌ی دورپیچ‌ها گزارش شده است که در جهت ترک‌های برشی بوده‌اند. براساس نتیجه بدست آمده در تحقیق آن‌ها، دورپیچ‌ها بر تنش‌های برشی به صورت مؤثر غلبه کرده و منجر به کنترل ترک‌های برشی می‌شوند و به همین دلیل جانشین مناسبی برای خاموت‌های سنتی می‌باشند. این تحقیق از لحاظ نوع آرماتور عرضی مورد استفاده که دورپیچ مستطیلی است، و همچنین از لحاظ نحوه‌ی بارگذاری یک‌سویه به بررسی‌های این مقاله شباهت دارد. یکی از روش‌های اقتصادی

[۲]، رفتار فشاری محوری ستون‌های کامپوزیت مستطیلی محصور شده با آرماتورهای مارپیچ مضاعف و با آرایش‌های جدید و مختلف را به کمک نمونه‌های آزمایشگاهی و با کمک پژوهش‌های پارامتری بر اساس مدل سازی در نرم افزار اجزای محدود بررسی کردند که نتایج نشان داد که ستون‌های کامپوزیت شامل مارپیچ‌های مضاعف به عنوان آرماتور عرضی و همچنین تقویت کننده‌ی آرماتورهای طولی، ظرفیت باربری محوری و شکل‌پذیری بسیار بهتری به دست می‌دهند که دلیل آن محصور شدگی بالای بتن هسته‌ی ستون بوسیله‌ی مارپیچ‌ها می‌باشد و با کم کردن گام مارپیچ‌ها، بار محوری، ظرفیت باربری و شکل‌پذیری افزایش می‌یابد. اوشین و همکاران در سال ۲۰۱۸ [۳] در تحقیق‌های آزمایشگاهی به بررسی رفتار ستون‌های با بتن الیافی با مقاومت بسیار بالا و محصور شده با آرماتورهای مارپیچ دایره‌ای و مستطیلی تحت بار محوری پرداختند که در آن بازدهی این دو نوع مارپیچ با یکدیگر مقایسه شدند. نتایج نشان داد که مارپیچ‌های دایره‌ای به میزان کافی و حتی بیشتر از مارپیچ‌های مستطیلی در شکل‌پذیری پس از پیک تأثیرگذار بوده‌اند. عقیفی و همکاران [۴]، به بررسی آزمایشگاهی رفتار فشاری ستون‌های بتنی تقویت شده با مارپیچ‌های از جنس GFRP پرداختند. نتایج این آزمایش‌ها نشان داد که این نوع آرماتورهای مارپیچ به صورت مؤثری هسته‌ی بتن را محصور می‌کنند و باعث افزایش مقاومت نهایی ستون می‌شوند. دی‌اچ جینگ و همکاران [۵] با کمک مطالعه آزمایشگاهی، تأثیر استفاده از آرماتورهای عرضی دورپیچ دایره‌ای را در ستون‌های دارای مقطع مستطیلی و تحت بارگذاری محوری یک‌سویه مورد ارزیابی قرار دادند. در تحقیق آن‌ها مشخص شد که استفاده از آرماتورهای عرضی دورپیچ دایره‌ای، منجر به افزایش چشمگیر ظرفیت باربری ستون‌ها می‌شود. دکورته و همکاران [۶] در پژوهش آزمایشگاهی دیگر در سال ۲۰۱۳ با تسهیل روش اجرای دورپیچ‌های مستطیلی، ۲۴ نمونه تیر بتنی دارای خاموت دورپیچ مستطیلی را به روش اعمال لنگر خمشی (بارگذاری چهار نقطه‌ای) یک‌سویه تحت بارگذاری قرار دادند. نتیجه بدست آمده از تحقیق آن‌ها نشان داد که استفاده از خاموت دورپیچ مستطیلی در تیر بتنی باعث افزایش شکل‌پذیری و مقاومت برشی آن در مقایسه با مشخصه‌های مشابه در تیر بتنی دارای خاموت سنتی می‌شود. در تحقیقی دیگر در سال ۲۰۱۳ کارایانیس و همکاران [۷] آزمایش‌هایی جامع‌تر بر روی تیر بتن آرمه

بدست آمده از مدل ساخته شده در این تحقیق، مقایسه ای میان نتایج این تحقیق و نتایج بدست آمده از کارهای آزمایشگاهی پیشین انجام گرفته است. در ادامه با انجام تعدادی مطالعه پارامتری، تأثیر استفاده از خاموت دورپیچ مستطیلی بر رفتار تیر بتنی مستطیلی تحت بار چرخه ای بررسی شده است.

۲- توسعه مدل عددی

در این پژوهش ابتدا تیرهای بتنی در نرم افزار اجزای محدود آباکوس شبیه سازی شده اند. مدل ها شامل تیرهای بتنی با خاموت سنتی تنگ بسته و خاموت دورپیچ مستطیلی می باشند. همچنین از نرم افزار شبیه سازی سالید وورک^۱، برای شبیه سازی دورپیچ های مستطیلی با اعمال فرضیه های ذکر شده برای ساخت آن ها استفاده شد. با تعریف مصالح بتن و میلگرد و اعمال شرایط مرزی و بارگذاری به مدل، جابه جایی مدل تحت اثر بارهای چرخه ای و یک سویه محاسبه می شود. در ادامه مراحل مختلف ساخت مدل عددی ارائه شده است.

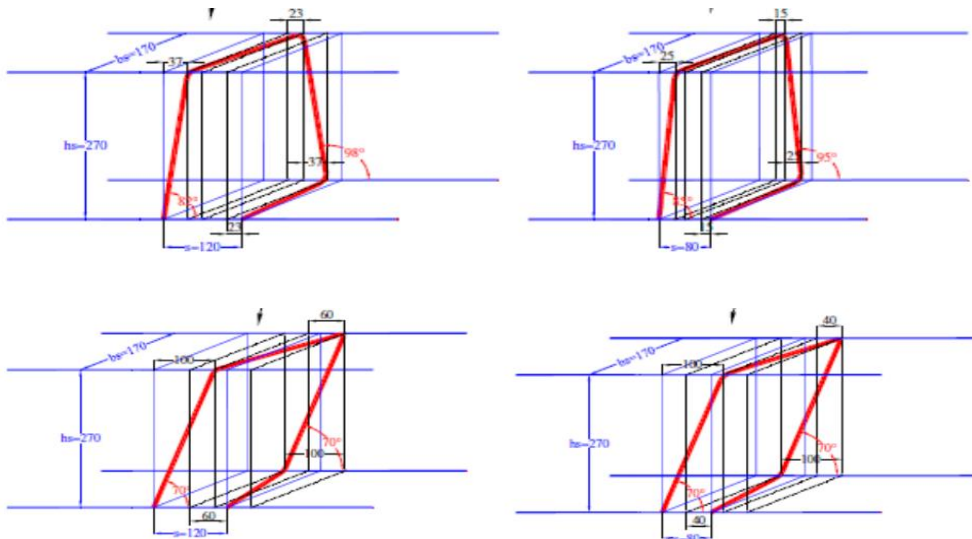
۱-۲- ساخت مدل اجزای محدود تیرهای بتنی

برای مدل سازی تیر بتنی مسلح نیاز است که جزئیات مختلف شامل هندسه ی تیر، مصالح، شرایط مرزی، اندرکنش های بین مصالح مختلف و نحوه ی بارگذاری به صورت صحیح در نظر گرفته شوند. برای مدل سازی تیرهای بتنی در نرم افزار آباکوس ابعاد تیر بتنی، اندازه و آرایش آرماتورهای طولی و خاموت ها در نرم افزار مشخص می شوند. همچنین طریقه ی ساخت دورپیچ های مستطیلی با جزئیات زوایا و اندازه ی آن ها در شکل ۱ قابل مشاهده می باشند که بر اساس آن دورپیچ های مستطیلی ساخته شده و در مدل سازی به کار گرفته می شوند. تفاوت تیرهای بتنی مدل سازی شده در نوع آرماتور عرضی آن هاست. دو نمونه دارای خاموت سنتی تنگ بسته هستند. دو نمونه دیگر به جای خاموت تنگ بسته، دارای دورپیچ مستطیلی هستند و در نهایت دو نمونه ی دیگر دارای دورپیچ مستطیلی اصلاح شده هستند که تفاوت آن ها در اندازه ی گام و زوایای آن ها می باشد. با توجه به نمونه های تیرهای بتنی ساخته شده در آزمایشگاه [۷] مشاهده می شود که این تیرها خرابی برشی دارند و در این نوع خرابی

به منظور انجام مطالعه ی پارامتری متعدد بر روی سازه های بتنی، استفاده از شبیه سازی های عددی می باشد. ابکدیر و همکاران [۱۱] در پژوهشی یک قاب بتنی تحت بار چرخه ای را در نرم افزارهای آباکوس^۱ و اوپنسیس^۲ مدل سازی کردند تا با بررسی منحنی های هیستریزیس، تأثیر مدل های رفتاری مختلف پیش بینی شده توسط مدل عددی را بررسی کنند. نتایج بدست آمده توسط آن ها نشان داد که مدل اجزای محدود در نرم افزار آباکوس می تواند پوش مقاومت تیر بتنی را با دقت مناسبی به دست آورد. در تحقیق پیش رو نیز مطابق این تحقیق، از بارگذاری چرخه ای و بررسی پوش مقاومت تیرهای بتنی استفاده می شود. از سویی دیگر و براساس پژوهش های انجام شده، عملکرد تیرهای بتنی تحت بارگذاری چرخه ای نسبتاً متفاوت با بارگذاری یک سویه می باشد [۱۲]. در همین راستا مینلی و هونگنان [۱۲] در طی تحقیق آزمایشگاهی نشان دادند که مقاومت تیر بتنی در حالت بارگذاری چرخه ای حدود ۱۰ درصد کمتر از مقاومت تیر بتنی در حالت بارگذاری استاتیکی و یک سویه می باشد. این موضوع بیانگر ضرورت بررسی رفتار تیربتنی دارای خاموت دورپیچ مستطیلی تحت بارگذاری چرخه ای می باشد. به خصوص اینکه زوایای ساق های قائم و افقی این آرماتورهای عرضی با خاموت های سنتی متفاوت است و امکان اختلاف بیشتر بین مقاومت تیر تحت بارگذاری های یک سویه و چرخه ای محتمل است. این امر درحالی است که در هیچ یک از تحقیق های انجام شده تاکنون، بررسی رفتار تیر بتنی با خاموت دورپیچ مستطیلی تحت بارگذاری چرخه ای انجام نشده است. مروری بر ادبیات موضوع نشان دهنده دو محدودیت عمده در این زمینه می باشد. نخست اینکه، کلیه تحقیق های انجام شده تاکنون به صورت آزمایشگاهی بوده و دید کاملی از چگونگی وضعیت تنش ها و کرنش های به وجود آمده در تیرهای دارای خاموت دورپیچ وجود ندارد. ثانیاً، در هیچ یک از تحقیق های انجام شده، تأثیر بارگذاری چرخه ای بر رفتار تیر بتنی دارای خاموت دورپیچ مستطیلی بررسی نشده است. این تحقیق در راستای رفع این محدودیت ها انجام شده است. بر همین اساس، در این تحقیق در ابتدا تیر بتنی دارای خاموت دورپیچ مستطیلی در نرم افزار اجزای محدود آباکوس شبیه سازی شده است. در این مدل عددی تیر بتنی تحت بارگذاری چهارنقطه ای یک سویه و چرخه ای قرار گرفته است. به منظور اعتبارسنجی نتایج

1 ABAQUS

2 OPENSEES



شکل ۱. جزئیات ساخت دورپیچ‌های مستطیلی معمولی و اصلاح شده با گام‌های ۸۰ و ۱۲۰ میلی‌متر [7]
 Fig. 1. Details of conventional and advanced rectangular spirals with 80 and 120 mm spacing

ترک خوردگی کششی و خرد شدگی فشاری فرمول‌بندی شده است. این مدل پرکاربردترین روش در میان مقالات مدل‌سازی عددی می‌باشد. بدین منظور برای تعریف حالت الاستیک بتن نیاز به تعریف مدول الاستیسیته و ضریب پواسون می‌باشد. مدول الاستیسیته بر اساس آیین نامه بتن آمریکا ACI 318 [۱۳] به صورت رابطه ی (۱) تخمین زده می‌شود.

$$E_c = 4730 * \sqrt{f_c} \quad (1)$$

که f_c مقاومت فشاری بتن بر حسب مگاپاسکال می‌باشد. همچنین طبق آیین‌نامه بتن آمریکا [۱۳] ضریب پواسون برای بتن 0.2 در نظر گرفته شد. برای تعریف دقیق رفتار پلاستیک بتن باید پارامترهای پلاستیسیته، رفتار کششی و فشاری به نرم‌افزار آباکوس داده شود.

۱-۲-۲-۱-۱ رفتار کششی و فشاری بتن

برای تعریف رفتار کششی بتن با استفاده از شکل ۲ تنش‌های کششی و کرنش‌های متناظر مطابق با مرجع [۹] به دست می‌آیند. همچنین برای تعریف رابطه تنش-کرنش فشاری بتن، نیاز است که تنش‌ها، کرنش‌های اینلاستیک نظیر تنش و پارامترهای آسیب با تنش‌های اینلاستیک متناظر آن‌ها وارد نرم افزار شود که بر اساس مرجع [۹] و بر اساس شکل ۳ پارامترهای ذکر شده به دست می‌آیند. دیگر پارامترهای پلاستیسیته بتن به صورت جدول ۱ که برگرفته از

ترک‌های مایل در تیر رخ می‌دهد. به همین دلیل برای غلبه بر این ترک‌ها و به اصطلاح دوختن این ترک‌ها به یکدیگر، دورپیچ‌هایی طراحی شد که ساق قائم آن‌ها بر راستای ترک‌های برشی در هر دو سمت تیر عمود باشد. این دورپیچ‌های مستطیلی در مقاله‌ی مرجع کارایانیس [۷] با عنوان دورپیچ‌های مستطیلی پیشرفته یا اصلاح شده (Advanced Rectangular Spirals) معرفی شده‌اند که دارای ساق‌های قائم سازگار شده با شکست برشی و ترک مایل می‌باشند و بر این ترک‌ها عمودند و با اصطلاح (SPA) در مقاله به اختصار نامیده شده‌اند.

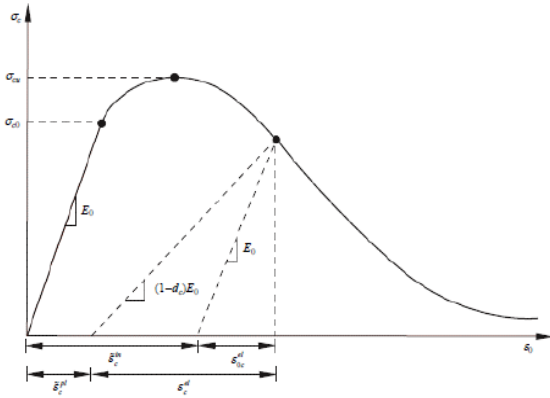
۲-۲-۲ مصالح

مدل اجزای محدود ساخته شده در این تحقیق از مصالح بتن و فولاد تشکیل شده است. در بخش‌های بعدی توضیحاتی در خصوص مدل رفتاری مورد استفاده برای بتن و فولاد ارائه شده است.

۲-۲-۱-۲ بتن

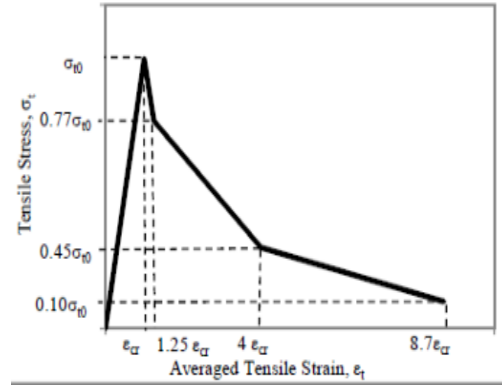
برای تعریف بتن در نرم‌افزار آباکوس برای اعمال حالت پلاستیک بتن در این تحقیق از مدل آسیب خمیری بتن^۱ استفاده شد. این مدل بر اساس دو فرض اصلی در مکانیزم گسیختگی یعنی روش

1 Concrete damage plasticity model



شکل ۳. نمودار تنش-کرنش فشاری برای بتن [۹]

Fig. 3. Compressive stress-strain relationship of concrete [9]



شکل ۲. نمودار برای تعریف رفتار کششی بتن در آباکوس [۹]

Fig. 2. Tensile behavior of concrete defined in ABAQUS software [9]

جدول ۱. پارامترهای پلاستیسیته بتن با مقاومت ۳۰ مگاپاسکال

Table 1. Plasticity parameters for concrete with compressive strength of 30 MPa

Dilation Angle	Eccentricity	fb_0/fc_0	K	Viscosity Parameter
۵۵	۰.۱	۱.۱۶	۰.۶۸	۰.۰۰۰۱

۲-۳- شرایط مرزی و اندرکنش ها در مدل سازی

در مدل عددی توسعه داده شده در این تحقیق، تکیه گاه ها در همه ی جهت ها مقید شدند و از حرکت آن ها جلوگیری شد. برای محل اعمال بار نیز دو استوانه ی اعمال بار در همه ی جهت ها به غیر از جهت اعمال بار که به صورت عمودی و رو به پایین است، مقید شد. لازم به ذکر است که اندرکنش بین تکیه گاه ها و دو استوانه ی اعمال بار با بتن، از نوع تماس صفحه به صفحه^۱ می باشد. همچنین آرماتورهای طولی و خاموت ها یا دورپیچ های مستطیلی موجود در تیرها به صورت مدفون^۲ در بتن در نظر گرفته شده و در شکل ۴ نشان داده شده است. وقتی آرماتورها در بتن به صورت مدفون در نظر گرفته می شوند، به این معنی است که کرنش های بتن و آرماتورهای مدفون در بتن به یک اندازه در نظر گرفته می شوند.

۲-۴- مش بندی و نوع المان ها

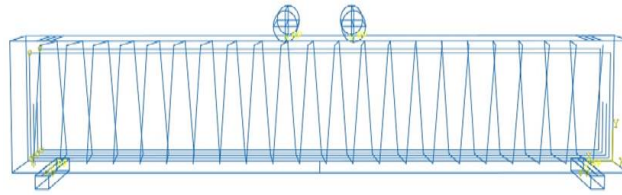
برای بتن از المان پر کاربرد C3D8R که المان غیرخطی سه بعدی

پیش فرض خود نرم افزار است، به عنوان مشخصات مصالح بتن در نرم افزار وارد می شوند. لازم به ذکر است که در آباکوس برای مدل کردن خاصیت پلاستیک بتن از تابع پتانسیل جریان پلاستیک یا تابع هایپربولیک دراکر-پراگر استفاده می شود که به زاویه ی اتصاع و خروج از مرکزیت وابسته است. fb_0/fc_0 نسبت حداکثر تنش فشاری در حالت دو محوره به حداکثر تنش فشاری تک محوره ی بتن است. پارامتر تعیین کننده ی شکل مقطع عرضی سطح تسلیم می باشد. پارامتر ویسکوزیته نیز برای در نظر گرفتن بتن به عنوان ماده ی ویسکوپلاستیک در نظر گرفته می شود.

۲-۲-۲- فولاد

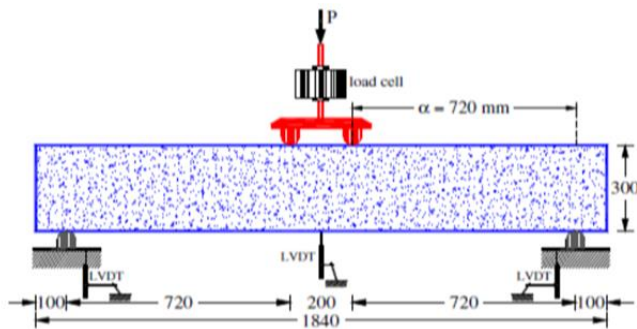
رفتار فولادهای مورد استفاده در مدل سازی مطابق با نمونه های آزمایشگاهی به صورت الاستو-پلاستیک دو خطی در نظر گرفته شده است [۹]. این مدل رفتاری در محیط نرم افزار آباکوس به کمک مدول الاستیسیته و ضریب پواسون و تنش تسلیم و کرنش متناظر تنش تسلیم شبیه سازی می شود. این مدل رفتاری، برای آرماتورهای طولی و عرضی شامل خاموت سنتی و دورپیچ مستطیلی در نظر گرفته شده است.

1 surface to surface contact
2 Embedded Region



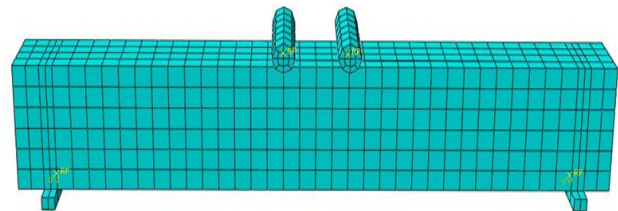
شکل ۴. جزئیات تیر بتن آرمه با دورپیچ مستطیلی مدل شده در آباکوس

Fig. 4. Details of RC beam with rectangular spiral simulated in ABAQUS



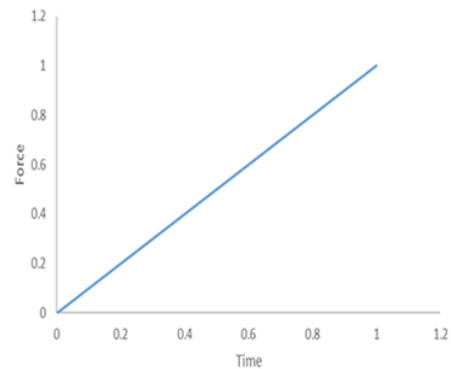
شکل ۷. جزئیات نحوه بارگذاری تیر به صورت خمشی ناشی از بارگذاری چهار نقطه‌ای [۷]

Fig. 7. Details of loading beam under four-point-bending pattern [7]



شکل ۵. جزئیات مش‌بندی تیر بتن آرمه در آباکوس

Fig. 5. Details of reinforcement of RC beam



شکل ۶. نرخ بارگذاری یک‌سویه

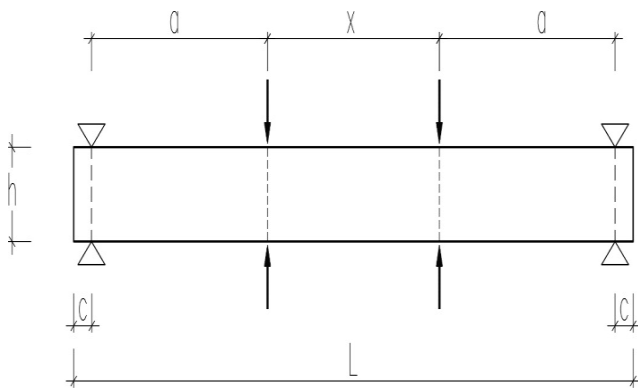
Fig. 6. Rate of monotonic load

۵-۲- روش بارگذاری

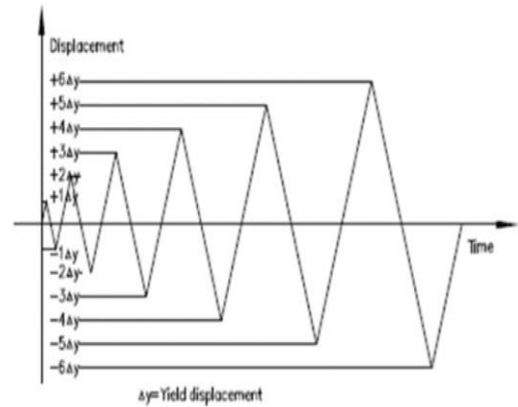
به تیرهای بتنی ساخته شده در آباکوس لنگر خمشی ناشی از بارگذاری چهارنقطه‌ای به صورت یک‌سویه [۷] و با الگویی خطی مانند شکل ۶ اعمال شد. جزئیات محل اعمال بارها و تکیه‌گاه‌ها در شکل ۷ قابل مشاهده است. در مدل‌سازی برای بارگذاری از کنترل جابه‌جایی استفاده شد. در ادامه با برداشت نیروهای وارده به تکیه‌گاه‌ها، منحنی‌های نیرو-جابه‌جایی بدست آمد. همچنین برای اعمال بارگذاری چرخه‌ای مجدداً از اعمال لنگر خمشی ناشی از بارگذاری چهارنقطه‌ای و به صورت رفت و برگشتی استفاده شد که فرکانس اعمال بار چرخه‌ای در شکل ۸ قابل مشاهده است.

بارگذاری چرخه‌ای انجام شده از طریق کنترل جابه‌جایی انجام شد و نیروها از طریق گیج‌های اندازه‌گیری نیرو در آزمایشگاه به دست آمد. در واقع فرکانس تغییر مکان‌های بار چرخه‌ای مضرب صحیحی از (Δy) می‌باشند که این مقدار معرف جابه‌جایی وسط دهانه تیر است در زمانی که اولین آرماتور کششی در اولین چرخه‌ی بارگذاری به تسلیم برسد. لازم به ذکر است که نرخ بارگذاری در طول

و هشت گرهی همگن است استفاده شد. نظر به اینکه آرماتورهای طولی و خاموت‌ها به صورت Wire مدل شده‌اند، لذا المان T3D2 که المان خطی و دوگره‌ی خرپایی (Truss) است، برای آن‌ها اختصاص یافت. مدل‌سازی تحت ابعاد مش گوناگون تحلیل شد تا بهترین اندازه مش بر اساس همگرایی نتایج و زمان تحلیل مناسب به دست آید که برای بتن مش با ابعاد ۵۰ در نظر گرفته شد و اندازه‌ی مش دیگر اعضای تیر نیز به همین اندازه انتخاب شد تا مش اعضای سازه بر یکدیگر منطبق باشند. در شکل ۵ نمایی از مش بندی مجموعه نشان داده شده است.



شکل ۹. شماتیک نحوه بارگذاری چرخه ای با تکیه گاه گیردار غلطکی
Fig. 9. Schematic cyclic loading with fixed roller supports



شکل ۸. مدل بارگذاری چرخه‌ای [۱]
Fig. 8. Cyclic loading model [1]

[۱۲] که تیر بتنی دارای خاموت سنتی را تحت بار چرخه‌ای قرار داده است، بهره گرفته شد.

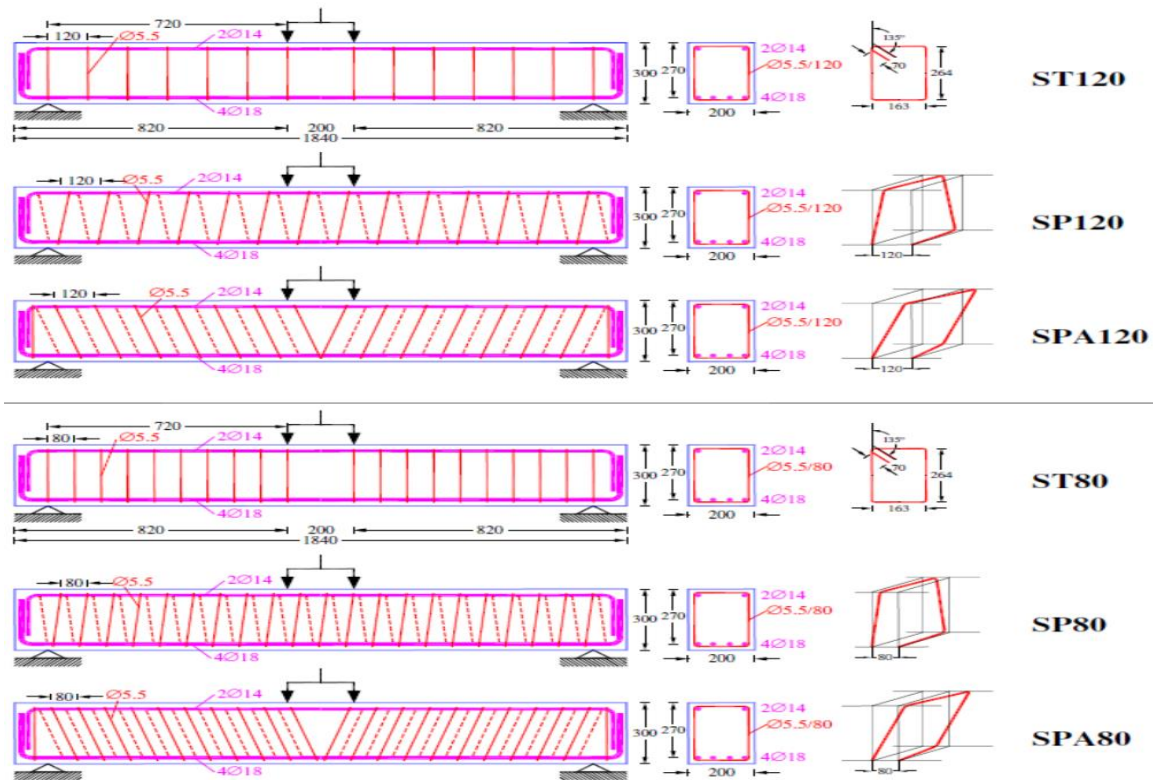
۳-۱- صحت‌سنجی نتایج مدل‌سازی تیرهای بتنی تحت بار یک‌سویه با تحقیقات آزمایشگاهی کارایانیس

در تحقیق آزمایشگاهی انجام شده توسط کارایانیس [۷]، ۶ نمونه تیر بتنی که جزئیات آن‌ها مطابق شکل ۱۰ می‌باشد، ساخته شده و تحت بارگذاری یک سویه قرار گرفته است. دو تیر دیگر موجود در مرجع [۷] که در این تحقیق مدل‌سازی نشده‌اند، بدون آرما تور عرضی می‌باشند. براساس اعلام کارایانیس [۷]، بتن با مقاومت فشاری ۳۰ مگاپاسکال و همچنین تنش تسلیم فولاد برای آرماتورهای طولی ۵۵۰ مگاپاسکال و برای آرماتورهای عرضی ۳۱۰ مگاپاسکال در نظر گرفته شده است. به منظور صحت‌سنجی نتایج مدل عددی توسعه داده شده در این مقاله، هر ۶ نمونه تیر بتنی نشان داده شده در شکل ۱۰ مدل‌سازی شد. در شکل ۱۱، منحنی‌های نیروی برشی-جابجایی ارائه شده توسط کارایانیس [۷] با نمونه متناظر آن که توسط مدل عددی بدست آمده است، مقایسه شده است. با توجه به شکل ۱۱، تطابق نسبتاً خوبی میان نتایج مدل عددی و آزمایشگاه مشاهده می‌شود. البته در تغییر مکان‌های بالا تفاوت‌هایی بین منحنی‌ها وجود دارد که شاید تفاوت‌های کوچک در مدل‌سازی نسبت به آزمایشگاه باعث بروز خطا بین نتایج آزمایشگاهی و مدل‌سازی شده است. برای نمونه تفاوت در مکان دقیق خاموت‌های

آزمایش ثابت است. همچنین نوع تکیه‌گاه در این بارگذاری به صورت گیردار غلطکی است که در شکل ۹ شماتیک آن قابل مشاهده است. تیر بتنی در تکیه‌گاه قرار گرفته و بار چرخه‌ای به صورت رفت و برگشتی در دو نقطه نشان داده شده در وسط تیر اعمال می‌شود که در مرکز تیر نیز دو محل اعمال بار گیردار شده و بارگذاری بر تیر اعمال می‌گردد. لازم به ذکر است که برای گیردار کردن تکیه‌گاه و محل اعمال بار، برای بارگذاری چرخه‌ای، از امکان (Coupling) برای اعمال شرایط اندرکنش تکیه‌گاهی در آباکوس استفاده شد. همچنین برای بارگذاری یک سویه از این طریق، جابه‌جایی یک سویه به سمت پایین به گره‌ی ایجاد شده به وسیله‌ی (Coupling) اعمال می‌شود.

۳-۲- صحت‌سنجی نتایج به دست آمده از مدل اجزای محدود

با مرور ادبیات موضوع مشاهده می‌شود که هیچ کار آزمایشگاهی یا عددی که در آن تیرهای بتنی دارای دورپیچ مستطیلی تحت بارچرخه‌ای قرار گرفته باشند، وجود ندارد. بر همین اساس، برای صحت‌سنجی نتایج بدست آمده از مدل اجزای محدود، از ترکیب نتایج موجود در ادبیات موضوع استفاده شد. بر همین اساس در ابتدا از تحقیق‌های آزمایشگاهی کارایانیس و همکاران [۷] که شامل تیرهای بتنی حاوی خاموت‌های سنتی و دورپیچ‌های مستطیلی تحت بارگذاری یک سویه است، برای اعتبارسنجی مدل‌سازی استفاده گردید. در ادامه و برای صحت‌سنجی مدل‌سازی تحت بارگذاری چرخه‌ای نیز از نتایج مطالعه‌های آزمایشگاهی مینلی و همکاران



شکل ۱۰. جزئیات ساخت تیرهای بتن آرمه دارای خاموت و دورپیچ مستطیلی در آزمایشگاه [۷]
 Fig. 10. Details of beams with rectangular spirals in laboratory [7]

مگاپاسکال است. دو ستون دیگر جدول نیز به ترتیب مقایسه‌ی تنش برشی نمونه‌های آزمایشگاهی با تنش برشی اسمی نمونه‌ها بر اساس آیین‌نامه و مقایسه‌ی تنش برشی نمونه‌های مدل‌سازی شده با تنش برشی اسمی نمونه‌ها می‌باشد.

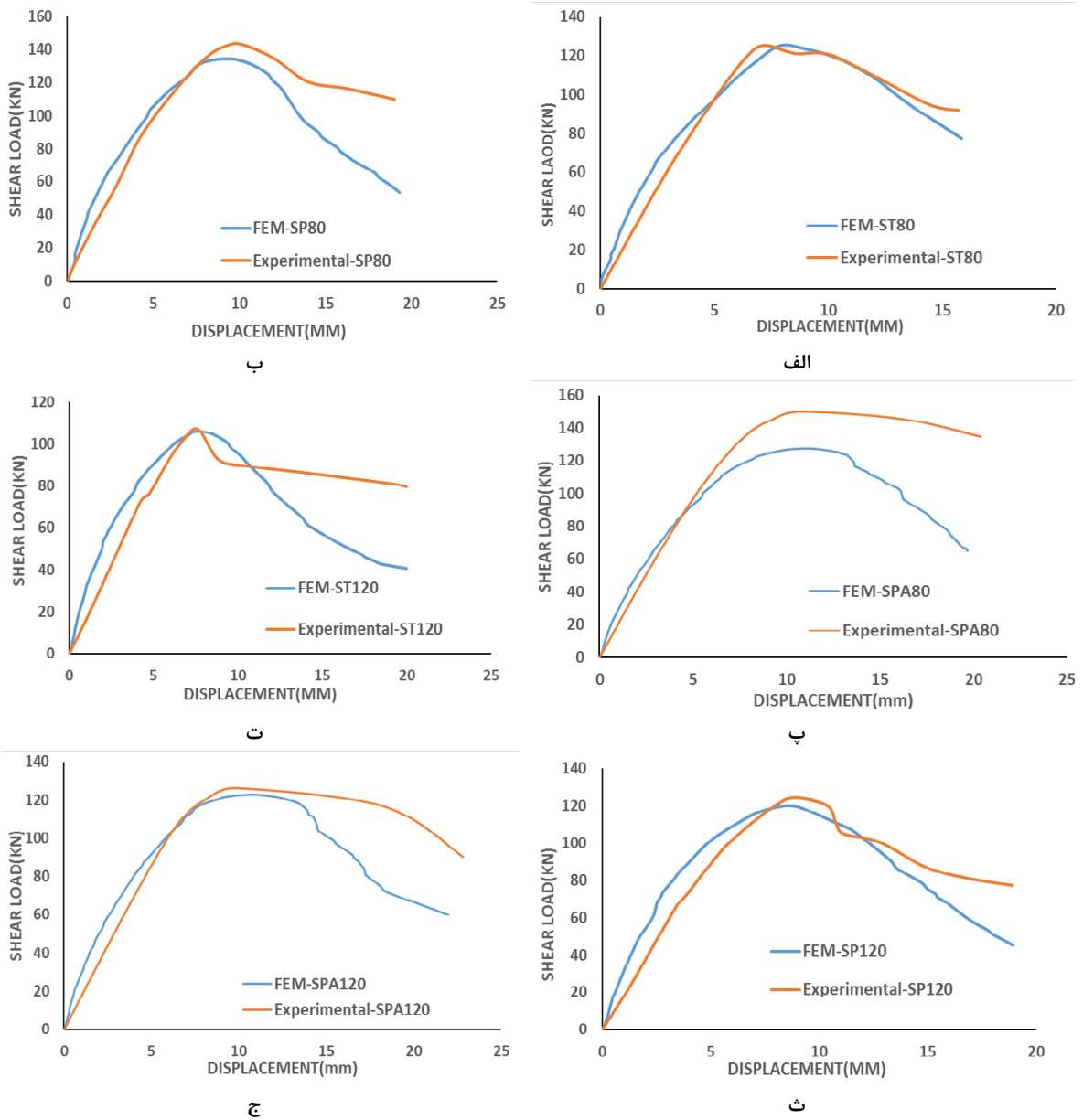
برای به دست آوردن تنش برشی اسمی بر اساس آیین‌نامه بتن آمریکا [۱۳] ابتدا باید نسبت فولاد کششی ρ_l و فشاری ρ'_l برای آرماتورهای طولی به ترتیب بر اساس روابط (۲) و (۳) و پس از آن نسبت آرماتورهای عرضی برای تیرهای دارای خاموت سنتی ρ_t و دورپیچ مستطیلی $\rho_{t\phi}$ به ترتیب طبق روابط (۴) و (۵) محاسبه شوند.

$$\rho_l = \frac{A_{sl}}{bd} \quad (2)$$

$$\rho'_l = \frac{A'_{sl}}{bd} \quad (3)$$

که در رابطه (۲)، A_{sl} مجموع سطح مقطع فولادهای کششی با

سنتی و دورپیچ‌ها، جزئیات قرارگیری آرماتورهای طولی، اندازه‌ی خم‌های آرماتورها، جزئیات نحوه‌ی قرارگیری آرماتورها در بتن که در این تحقیق به صورت مدفون در نظر گرفته شده‌اند. همچنین ساده و بدون آج در نظر گرفتن آرماتورها و تفاوت نحوه‌ی اندرکنش بین این آرماتورهای ساده شده با حالت آجدار و واقعی می‌توانند دلایلی برای تفاوت نتایج در تغییر مکان‌های بالا باشد که در حالت پلاستیک رخ می‌دهد. همچنین بیشترین نیروی برشی هر مدل که معرف ظرفیت برشی آن هاست، با ظرفیت برشی محاسبه شده از طریق آیین‌نامه بتن آمریکا [۱۳] که در مقاله مرجع [۷] برای نمونه‌های آزمایشگاهی محاسبه شده‌اند، مقایسه گردید و در جدول ۲ نمایش داده شده است. قابل ذکر است که در جدول ۲، $v_{u,Exp}$ معرف تنش برشی نمونه‌های آزمایشگاهی می‌باشد که واحد آن مگاپاسکال است. همچنین $v_{u,FEM}$ نشان‌گر تنش برشی نمونه‌های مدل‌سازی شده است که از تقسیم نیروی برشی در حاصل ضرب عرض سطح مقطع در عمق مؤثر مقطع به دست آمده است. v_n نیز تنش برشی اسمی برای هر مقطع بر اساس آیین‌نامه‌ی بتن آمریکا می‌باشد که واحد آن



شکل ۱۱. منحنی‌های نیروی برشی-جابجایی تیرهای مدل شده در آباکوس و نمونه‌های آزمایشگاهی جهت نمایش صحت‌سنجی

Fig. 11. Experimental and numerical shear load-displacement curves used for verification

در رابطه (۴) A_{st} سطح مقطع خاموت‌های سنتی با واحد میلی‌متر مربع می‌باشد که نشان دهنده‌ی سطح مقطع دو ساق قائم خاموت سنتی می‌باشد. همچنین s معرف گام خاموت سنتی بر اساس میلی‌متر می‌باشد که در رابطه (۵) نیز به کار برده شده است. در رابطه (۵)، $\sin\varphi_{front}$ سینوس زاویه‌ی ساق قائم در یک طرف مارپیچ مستطیلی و $\sin\varphi_{back}$ نیز سینوس زاویه‌ی ساق قائم طرف دیگر مارپیچ با راستای افق می‌باشد که زاویه بر اساس درجه در

واحد میلی‌متر مربع و b و d به ترتیب عرض و عمق مؤثر تیر بتنی بر اساس میلی‌متر می‌باشند. همچنین در رابطه (۳) A'_{sl} معرف سطح مقطع فولادهای فشاری طولی با واحد میلی‌متر مربع می‌باشد.

$$\rho_t = \frac{A_{st}}{bs} \quad (4)$$

$$\rho_{t\varphi} = \frac{A_{st}/2}{bs \sin\varphi_{front}} + \frac{A_{st}/2}{bs \sin\varphi_{back}} \quad (5)$$

جدول ۲. مقایسه ظرفیت برشی تیرها در آزمایشگاه، مدلسازی و آیین نامه ACI [۷]

Table 2. Comparison among the shear capacity of experimental, numerical and code

vu,FEM/vn,ACI	vu,Exp/vn,ACI	vn,ACI(MPa)	vu,FEM(MPa)	vu,Exp(MPa)	مدل
۱.۲۹	۱.۲۶	۱.۵۸	۲.۰۴	۱.۹۹	ST۱۲۰
۱.۴۱	۱.۴۵	۱.۵۷	۲.۲۲	۲.۲۹	SP۱۲۰
۱.۳	۱.۳۳	۱.۷۵	۲.۲۷	۲.۳۳	SPA۱۲۰
۱.۲۲	۱.۲۳	۱.۸۹	۲.۳۱	۲.۳۲	ST۸۰
۱.۳۲	۱.۴۲	۱.۸۸	۲.۴۹	۲.۶۷	SP۸۰
۱.۱۷	۱.۳۱	۲.۱۵	۲.۵۱	۲.۸۱	SPA۸۰

جدول ۳. مقایسه حداکثر ظرفیت برشی و کرنش متناظر حداکثر ظرفیت برشی تیرها در آزمایشگاه و مدلسازی

Table 3. Comparison between the experimental and numerical shear capacity and deflection

eror- δ_{peak} (%)	eror- V_u (%)	Δ_{peak} -Experimental(mm)	δ_{peak} -FEM(mm)	$V_u,Exp(KN)$	$V_u,FEM(KN)$	نام مدل
۸.۰۸	۰.۱۷	۷.۳	۷.۸۹	۱۲۵.۱۸	۱۲۴.۹۷	ST۸۰
۱۳.۷۶	۶.۶۶	۱۰.۳۲	۸.۹	۱۴۳.۲۵	۱۳۴.۳	SP۸۰
۰.۷۲	۱۰.۸۳	۱۱.۱۱	۱۱.۱۹	۱۵۰.۰۲	۱۳۵.۳۶	SPA۸۰
۰.۶۶	۱.۱۴	۷.۵۹	۷.۶۴	۱۰۷.۰۸	۱۰۵.۸۷	ST۱۲۰
۰.۴۵	۳.۸۹	۸.۸۴	۸.۸	۱۲۴.۵۸	۱۱۹.۹۲	SP۱۲۰
۵.۰۵	۱.۹۷	۱۰.۰۹	۱۰.۶	۱۲۵.۲۷	۱۲۲.۸۵	SPA۱۲

بتن، نقش آرماتورهای عرضی در تأمین مقاومت برشی پررنگ تر شده و تفاوت در عملکرد آرماتورهای عرضی بیشتر مشهود شود و تیرهای دارای آرماتورهای عرضی متفاوت عملکرد متفاوتی داشته باشند. چرا که در این صورت وظیفه ی تأمین مقاومت بیشتر بر عهده ی آرماتورهای عرضی می باشد.

$$v_s = \rho_t f_{yt} (\sin\phi + \cos\phi) \quad (۸)$$

در رابطه ی (۸) نیز f_{yt} معرف تنش تسلیم فولادهای عرضی شامل خاموت و دورپیچ مستطیلی است و ϕ زاویه ی ساق های قائم دورپیچ ها با راستای افقی است. با محاسبه ی روابط بالا برای تیرهای مدل سازی شده تنش برشی اسمی به دست آمده و در ستون چهارم جدول ۲ قابل مشاهده است. در جدول ۲ و در ستون آخر مشاهده می شود که بیشینه ی تنش برشی برای تیرهای مدل سازی شده در مقایسه با تنش برشی اسمی به دست آمده از آیین نامه بتن آمریکا

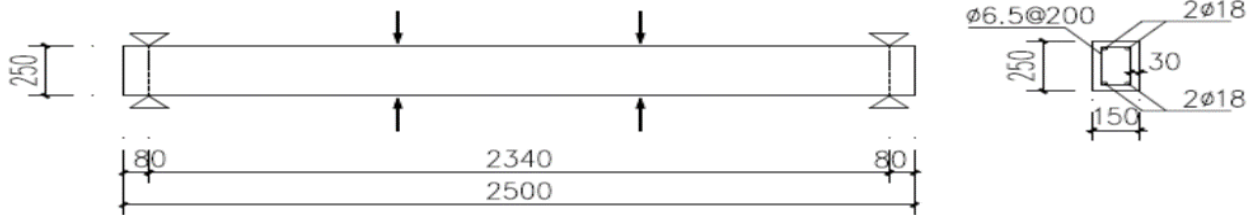
رابطه فرار می گیرد. برای بدست آوردن تنش برشی کل تیر $v_{n,ACI}$ می بایست تنش در بتن و فولاد جداگانه محاسبه شود و بر اساس رابطه (۶) تنش برشی کل به دست آید.

$$v_{n,ACI} = v_c + v_s \quad (۶)$$

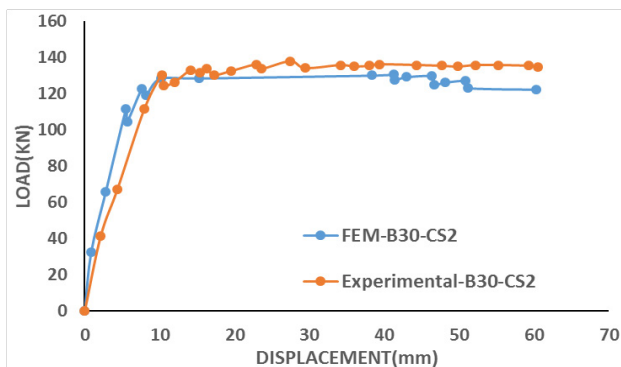
که در این رابطه v_c تنش برشی ناشی از بتن است که با رابطه ی (۷) به دست می آید و v_s تنش برشی ناشی از آرماتورهای عرضی است که طبق رابطه ی (۸) محاسبه می شود.

$$v_c = 0.158\sqrt{f_c} + 17.2 \frac{\rho_l}{a/d} \leq 0.291\sqrt{f_c} \quad (۷)$$

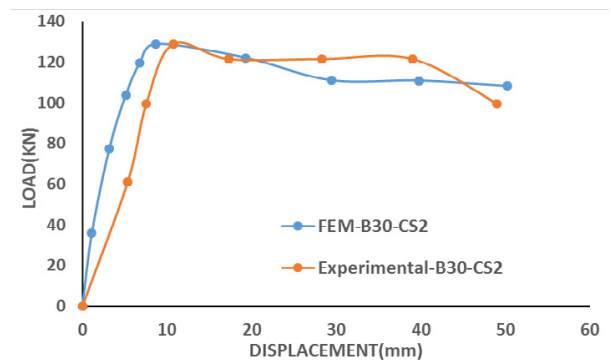
که در رابطه (۷) f_c مقاومت فشاری بتن بر حسب مگاپاسکال می باشد و a/d نیز نسبت دهانه ی برشی تیر به عمق مؤثر آن است. با توجه به رابطه (۷) انتظار می رود با کاهش مقاومت فشاری



شکل ۱۲. جزئیات تیر بتنی برای اعمال بارگذاری چرخه‌ای [۱۲]
Fig. 12. Details of cyclic loading for beam [12]



شکل ۱۴. نمودار نیرو-جابجایی بارگذاری یکسویه نمونه‌ی آزمایشگاهی مین لی و مدل‌سازی شده تحت بارگذاری چهارنقطه‌ای
Fig. 14. Load-displacement push-over curves of model and experiment [12]

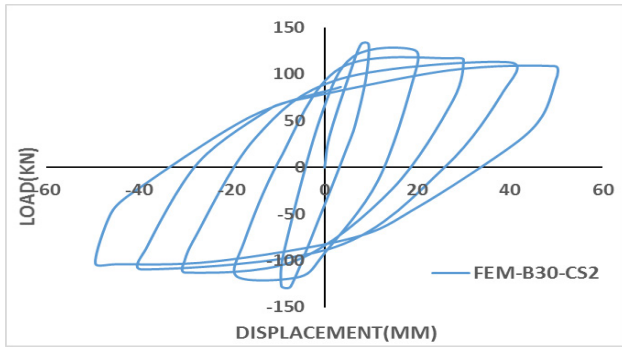


شکل ۱۳. منحنی پوش بارگذاری چرخه‌ای مدل‌سازی و نمونه آزمایشگاهی مین لی جهت صحت‌سنجی
Fig. 13. Envelope of hysteresis curves obtained from modeling and experiment [12]

۳-۲- صحت‌سنجی نتایج مدل‌سازی تیر بتنی تحت بار چرخه‌ای با تحقیقات آزمایشگاهی مین لی

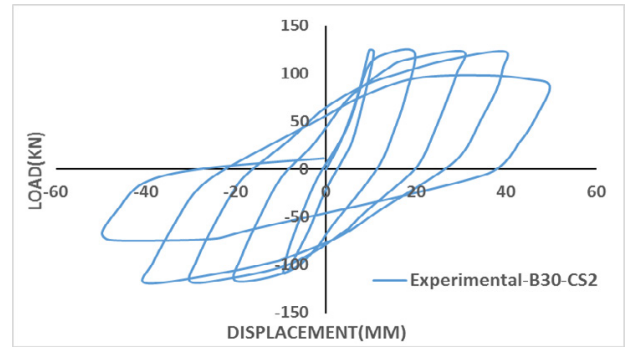
در تحقیق آزمایشگاهی مین لی و همکاران [۱۲] یک تیر بتنی دارای خاموت تنگ بسته تحت بارگذاری چرخه‌ای قرار گرفته است. جزئیات ابعاد تیر در شکل ۱۲ نمایش داده شده است. نسبت دهانه‌ی برشی به عمق موثر ۳ می‌باشد و بنابراین فاصله‌ی نقاط بارگذاری از مرکز تیر ۵۳۷ میلی‌متر می‌باشد که توسط دو استوانه در بالا و پایین تیر، به تیر حرکت چرخه‌ای در جهت بالا و پایین با یک فرکانس ثابت وارد می‌کنند. از بتن با مقاومت فشاری ۳۶ مگاپاسکال در این تحقیق استفاده شده است. برای خاموت‌ها تنش تسلیم ۳۸۸/۹ مگاپاسکال و برای آرماتورهای طولی تنش تسلیم ۳۸۱/۶۲ مگاپاسکال در نظر گرفته شد. برای صحت‌سنجی مدل‌سازی و دقیق بودن نحوه‌ی بارگذاری،

برای مدل‌های مختلف بین ۱۷ تا ۴۱ درصد بیشتر است که با نتایج آزمایشگاهی همخوانی دارد. این اختلاف نشان‌دهنده‌ی آن است که آیین‌نامه بتن آمریکا بصورت محافظه‌کارانه روابط تنش برشی برای تیرها را پیشنهاد داده است. این اختلاف در زمانی که تیرها دارای دورپیچ مستطیلی هستند بیشتر است. همچنین میزان اختلاف بیشترین ظرفیت باربری تیرهای بتنی مدل‌سازی شده در مقایسه با نمونه‌های آزمایشگاهی و همچنین کرنشی که این بیشینه‌ی ظرفیت در آن رخ داده است، به همراه درصد اختلاف آن‌ها در جدول ۳ قابل مشاهده است. با توجه به جدول ۳، درصد اختلاف بسیار ناچیزی میان ظرفیت برشی نمونه‌های مدل‌سازی شده و نمونه‌های متناظر آزمایشگاهی مشاهده می‌شود که این امر گواهی بر قابل‌اتکا بودن نمونه‌های مدل‌سازی شده است.



شکل ۱۶. منحنی هیستریزیس بارگذاری چرخه‌ای تیر بتنی مدلسازی شده در آباکوس

Fig. 16. Hysteresis curve of the beam obtained from modeling

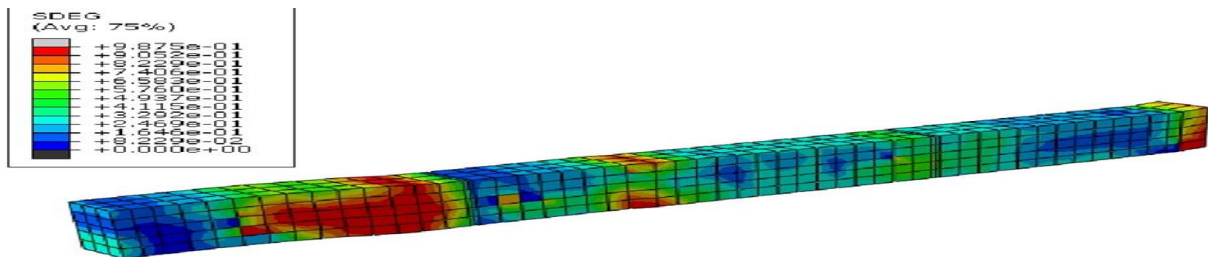


شکل ۱۵. منحنی هیستریزیس بارگذاری چرخه‌ای تیر بتنی در آزمایشگاه

Fig. 15. Hysteresis curve of the beam obtained from laboratory



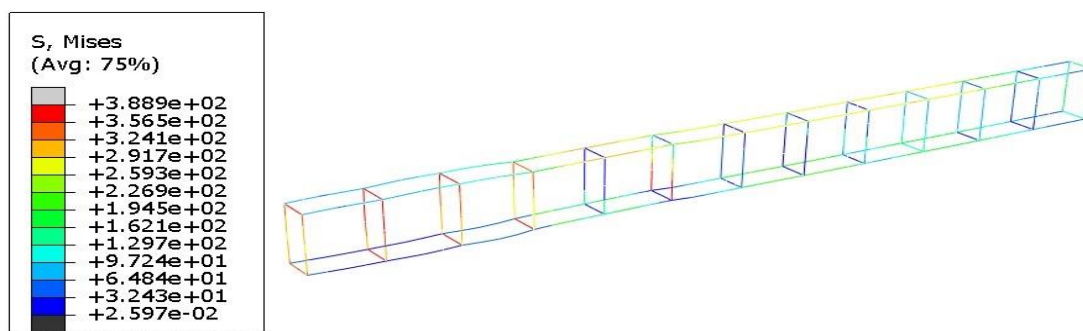
شکل ۱۷. مدل شکست X شکل بین تکیه‌گاه و محل اعمال بار در تیر بتنی آزمایشگاهی و نشانگر شکست برشی در بارگذاری چرخه‌ای [۷]
Fig. 17. X-shaped shear fracture of the beam between support and loading point in experiment



شکل ۱۸. مدل کرنش پلاستیک X شکل بین تکیه‌گاه و محل اعمال بار در تیر بتنی و نشانگر شکست برشی در مدلسازی براساس آزمایش مین لی
Fig. 18. X-shaped plastic strains of the beam between support and loading point in model

شکل های ۱۵ و ۱۶ نیز تطابق خوبی میان مقاومت نهایی هر چرخه و روند افت مقاومت و کرنش های هر چرخه مشاهده می گردد. طبق نتایج این آزمایش، وقتی نسبت دهانه برشی به عمق مؤثر برابر ۳ باشد مود خرابی تیر برشی می باشد و ترک های X شکل بین تکیه‌گاه و محل اعمال بار رخ می دهد در شکل ۱۷ خرابی برشی و ترک X شکل در تیر آزمایشگاهی مشاهده می شود و در شکل ۱۸ کرنش های پلاستیک مشابه ترک های X شکل در محدوده ی بین تکیه‌گاه و محل اعمال بار قابل مشاهده است. همچنین در شکل

منحنی پوش مدلسازی با منحنی متناظر نمونه ی آزمایشگاهی در بارگذاری چرخه‌ای مقایسه شد که در شکل ۱۳ قابل مشاهده می باشد. در شکل ۱۳، مقاومت های نهایی و همچنین افت مقاومت تیر در هر چرخه تطابق خوبی با منحنی پوش نمونه ی آزمایشگاهی دارد. همچنین با مقایسه ی منحنی نیرو-جابجایی از مدلسازی و منحنی متناظر نمونه ی آزمایشگاهی تحت بارگذاری یک سویه در شکل ۱۴، تطابق خوبی میان نتایج دیده می شود. با مقایسه منحنی هیستریزیس نمونه ی آزمایشگاهی و نمونه ی مدلسازی شده در



شکل ۱۹. مدل تنشهای موجود در فولادهای تیر بتنی و تسلیم شدن خاموتها در منطقهی ایجاد ترک X شکل و نشانگر شکست برشی
Fig. 19. Stress distribution in longitudinal bars and closed ties of beam at failure

استخراج گردید. منحنی‌های پوش مدل های ST80 و SP80 و SPA80 در شکل ۲۰-الف، مدل های ST120 و SP120 و SPA120 در شکل ۲۰-ب و منحنی‌های پوش مدل های ST200 و SP200 نیز در شکل ۲۱ نمایش داده شده است. براساس شکل های ۲۰ تا ۲۱، مشاهده می شود که تحت بار چرخه‌ای، تیرهای بتنی دارای خاموت سنتی و تیرهای بتنی با دورپیچ مستطیلی متناظر آن ها، که دارای بتن با مقاومت فشاری ۳۰ مگاپاسکال هستند، در چرخه‌های بارگذاری، مقاومت نهایی مشابهی دارند و روند افت مقاومت آن ها بسیار نزدیک است. همچنین در نمونه های خاموت های دورپیچ با گام ۱۲۰ میلی متر مشهود است که در چرخه‌های سوم به بعد افت مقاومت تیر با خاموت سنتی بیشتر است و دورپیچ‌ها باعث شده‌اند که افت مقاومت با آهنگ کمتری اتفاق بیفتد.

در شکل ۲۲ منحنی پوش مقاومت برای تیرهای بتنی شامل خاموت های سنتی و دورپیچ‌های مستطیلی با مقاومت ۲۰ مگاپاسکال و قطر خاموت ۶ و ۱۰ میلی متر و سه گام مختلف ۸۰، ۱۲۰ و ۲۰۰ میلی متر نشان داده شده است. همان گونه که در شکل ۲۲ نشان داده شده است، با توجه به اینکه دورپیچ اصلاح شده (پیشرفته) در بارگذاری یک سویه بهترین عملکرد را داشته ولی در شکل ۲۲ و در بارگذاری چرخه ای عملکردی به مراتب ضعیف تر از خاموت سنتی و دورپیچ مستطیلی دارد (برعکس بارگذاری یک سویه)، به منظور بررسی بیشتر، منحنی های هیستریزیسی که منحنی های پوش مقاومت شکل ۲۲-الف از آن ها برداشت شده اند، در شکل ۲۳ ترسیم شده اند. این دورپیچ از این نظر اصلاح شده است که ساق های قائم این دورپیچ در دو طرف تیر بر جهت ترک های مایل که ۴۵ درجه

۱۹ نیز که توزیع تنش های موجود در آرماتورهای طولی و عرضی را نشان می دهد، می توان دید که خاموت های موجود در ناحیهی شکل گیری ترک X شکل، به تسلیم رسیده و خراب شده اند. مشاهده می شود که این تنش معادل ۳۸۸ مگاپاسکال است. براساس شکل های ۱۳ تا ۱۹ می توان بیان داشت که نتایج مدل سازی با نمونهی آزمایشگاهی دارای تطابق نسبتاً خوبی است.

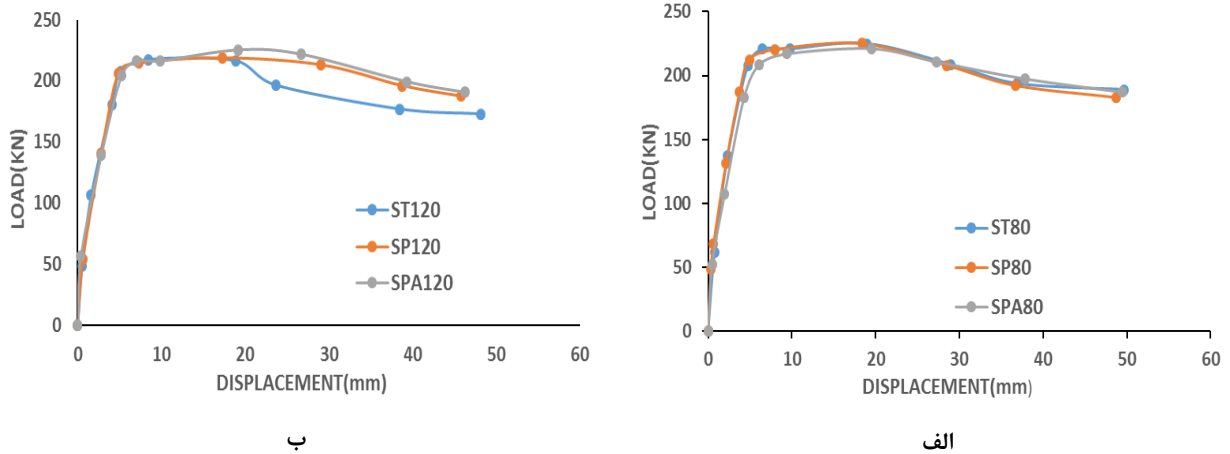
۴- مطالعهی پارامتریک

در این بخش تأثیر دقیق پارامترهای مختلف نظیر نوع آرماتور عرضی، قطر خاموت، گام خاموت، مقاومت بتن، طول تیر و مقاومت فشاری بتن به صورت دقیق بر رفتار تیر بتنی تحت بارگذاری چرخه ای بررسی می شود. مسلماً بررسی تأثیر تمامی این پارامترها با کمک تحقیق آزمایشگاهی بسیار پر هزینه و زمان بر است. مطابق با جدول ۴، در این تحقیق نمونه های مختلفی به صورت عددی ساخته شده اند که در آن ها نوع آرماتور عرضی، قطر خاموت، گام خاموت، مقاومت بتن و طول تیر تغییر کرده اند. به طور کلی نمونه ها دارای دو مقاومت فشاری بتن ۲۰ و ۳۰ مگاپاسکال می باشند. همچنین آرماتورهای عرضی خاموت سنتی و دورپیچ‌های مستطیلی معمولی و اصلاح شده (پیشرفته) با قطرهای ۶ و ۱۰ میلی متر و سه گام ۸۰، ۱۲۰ و ۲۰۰ میلی متر و همچنین دو اندازه طول تیر ۱۸۴۰ و ۳۷۰۰ میلی متر در نظر گرفته شده است. همچنین، در تمامی نمونه ها از دو آرماتور با قطر ۱۸ در بالا و پایین استفاده گردید [۱۲]. با ساخت نمونه های اشاره شده در جدول ۴ و اعمال باگذاری چرخه ای به آن ها، منحنی‌های پوش مقاومت هر یک از مدل ها

جدول ۴. مشخصات مدل‌های توسعه یافته برای مطالعات پارامتری تحت بارگذاری چرخه‌ای

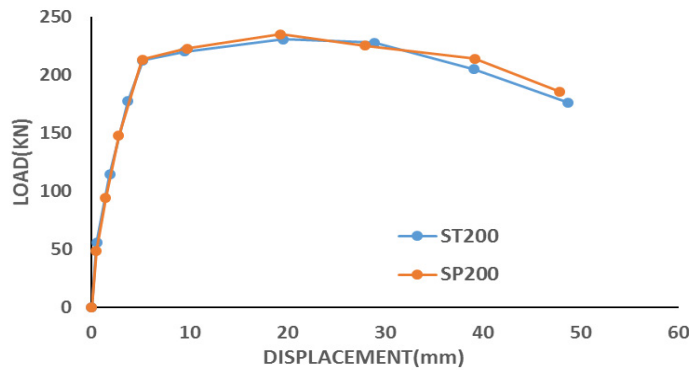
Table 4. Models properties simulated for parametric study

نام مدل	عرضی قطر آرماتور	عرضی گام آرماتور (mm)	بن‌مقاومت (MPa)	تیر طول (mm)
ST۸۰	خاموت سنتی	۶	۸۰	۱۸۴۰
SP۸۰	دورپیچ مستطیلی	۶	۸۰	۱۸۴۰
SPA۸۰	دورپیچ مستطیلی اصلاح شده	۶	۸۰	۱۸۴۰
ST۱۲۰	خاموت سنتی	۶	۱۲۰	۱۸۴۰
SP۱۲۰	دورپیچ مستطیلی	۶	۱۲۰	۱۸۴۰
SPA۱۲۰	دورپیچ مستطیلی اصلاح شده	۶	۱۲۰	۱۸۴۰
ST۲۰۰	خاموت سنتی	۶	۲۰۰	۱۸۴۰
SP۲۰۰	دورپیچ مستطیلی	۶	۲۰۰	۱۸۴۰
ST۸۰D۱F۲۰	خاموت سنتی	۶	۸۰	۱۸۴۰
SP۸۰D۱F۲۰	دورپیچ مستطیلی	۶	۸۰	۱۸۴۰
SPA۸۰D۱F۲۰	دورپیچ مستطیلی اصلاح شده	۶	۸۰	۱۸۴۰
ST۱۲۰D۱F۲۰	خاموت سنتی	۶	۱۲۰	۱۸۴۰
SP۱۲۰DF۲۰	دورپیچ مستطیلی	۶	۱۲۰	۱۸۴۰
SPA۱۲۰D۱F۲۰	دورپیچ مستطیلی اصلاح شده	۶	۱۲۰	۱۸۴۰
ST۲۰۰D۱F۲۰	خاموت سنتی	۶	۲۰۰	۱۸۴۰
SP۲۰۰D۱F۲۰	دورپیچ مستطیلی	۶	۲۰۰	۱۸۴۰
ST۸۰D۱۰F۲۰	خاموت سنتی	۱۰	۸۰	۱۸۴۰
SP۸۰D۱۰F۲۰	دورپیچ مستطیلی	۱۰	۸۰	۱۸۴۰
SPA۸۰D۱۰F۲۰	دورپیچ مستطیلی اصلاح شده	۱۰	۸۰	۱۸۴۰
ST۱۲۰D۱۰F۲۰	خاموت سنتی	۱۰	۱۲۰	۱۸۴۰
SP۱۲۰D۱۰F۲۰	دورپیچ مستطیلی	۱۰	۱۲۰	۱۸۴۰
SPA۱۲۰D۱۰F۲۰	دورپیچ مستطیلی اصلاح شده	۱۰	۱۲۰	۱۸۴۰
ST۲۰۰D۱۰F۲۰	خاموت سنتی	۱۰	۲۰۰	۱۸۴۰
SP۲۰۰D۱۰F۲۰	دورپیچ مستطیلی	۱۰	۲۰۰	۱۸۴۰
ST۱۶۰D۱F۳۰	خاموت سنتی	۶	۱۶۰	۳۷۰۰
ST۱۶۰D۱۰F۳۰	خاموت سنتی	۱۰	۱۶۰	۳۷۰۰
SP۱۶۰D۱F۳۰	دورپیچ مستطیلی	۶	۱۶۰	۳۷۰۰
SP۱۶۰D۱۰F۳۰	دورپیچ مستطیلی	۱۰	۱۶۰	۳۷۰۰
ST۱۶۰D۱F۲۰	خاموت سنتی	۶	۱۶۰	۳۷۰۰
ST۱۶۰D۱۰F۲۰	خاموت سنتی	۱۰	۱۶۰	۳۷۰۰
SP۱۶۰D۱F۲۰	دورپیچ مستطیلی	۶	۱۶۰	۳۷۰۰
SP۱۶۰D۱۰F۲۰	دورپیچ مستطیلی	۱۰	۱۶۰	۳۷۰۰



شکل ۲۰. الف و ب) منحنی‌های پوش تیرهای با خاموت سنتی و دورپیچ مستطیلی با طول گام ۸۰ و ۱۲۰ میلی‌متر

Fig. 20. Envelope curve comparisons of the beam with closed ties and rectangular spirals with 80 and 120 mm spacing

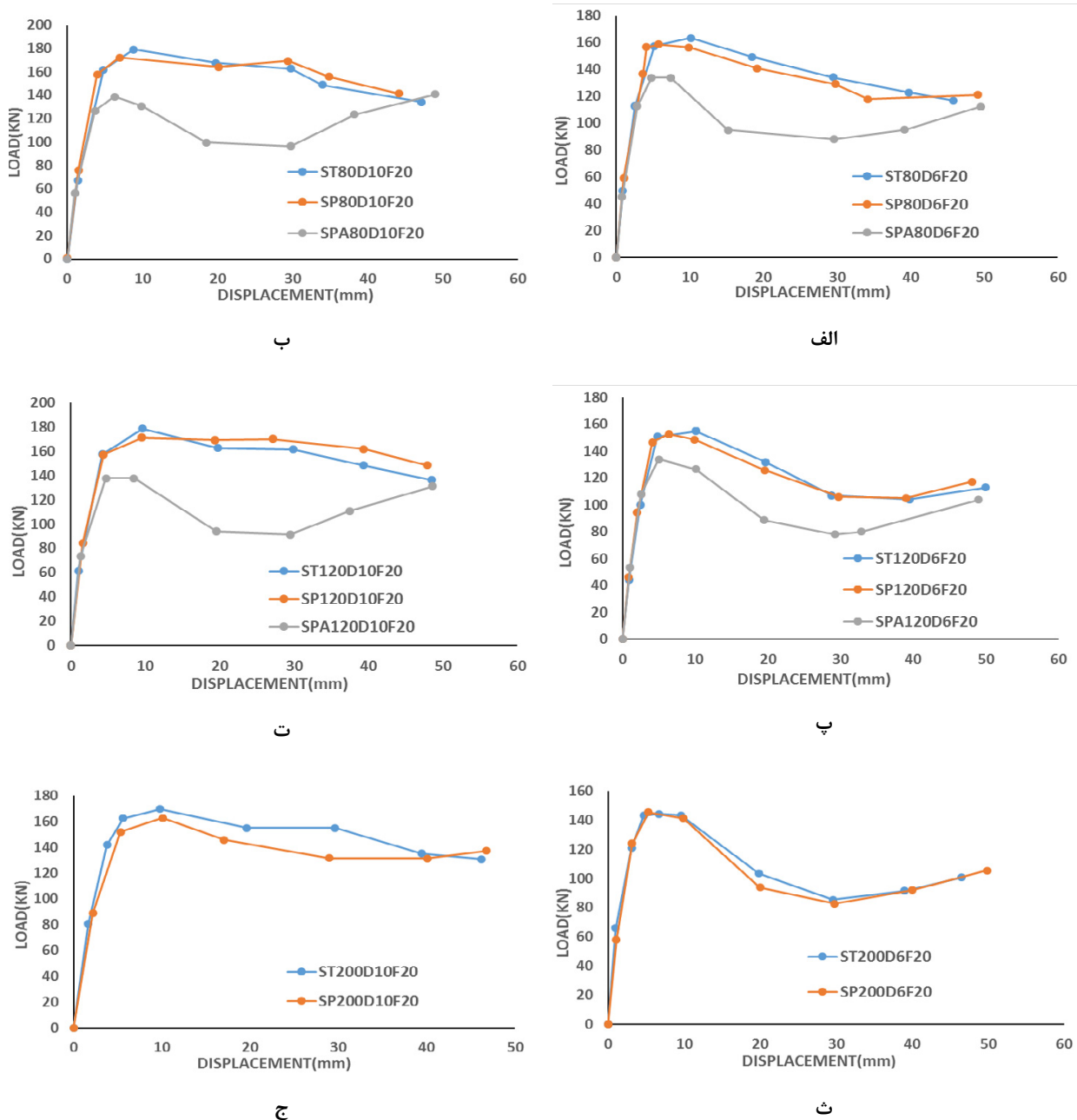


شکل ۲۱. منحنی پوش تیرهای با خاموت سنتی و دورپیچ مستطیلی با طول گام ۲۰۰ میلی‌متر

Fig. 21. Envelope curve comparisons of the beam with closed ties and rectangular spirals with 200 mm spacing

بتنی مقاومت نهایی کمتری را دارد. بر خلاف دورپیچ مستطیلی اصلاح شده (SPA)، دورپیچ مستطیلی معمولی (SP) در هر جهت بارگذاری چرخه ای، ساق‌های قائم حداقل یک طرف تیر بر ترک‌های تیر عمودند و عملکرد یکسانی در هر دو جهت بارگذاری چرخه ای دارند. پس می‌توان نتیجه گرفت که این آرایش دورپیچ مستطیلی در بارگذاری چرخه‌ای عملکرد قابل قبولی ندارد و می‌توان این ضعف را به زاویه‌ی دورپیچ‌ها در راستای قائم نسبت داد. در اکثر نمودارهای پوش ارائه شده در شکل ۲۲، مقاومت نهایی و روند افت توان باربری تیرهای بتنی با خاموت سنتی و دورپیچ مستطیلی تقریباً یکسان هستند که نشان می‌دهد در بارگذاری چرخه‌ای به یک اندازه قابل اتکا هستند. در تیرهای بتنی دارای آرماتور عرضی با گام ۲۰۰ میلی‌متر و قطر ۱۰

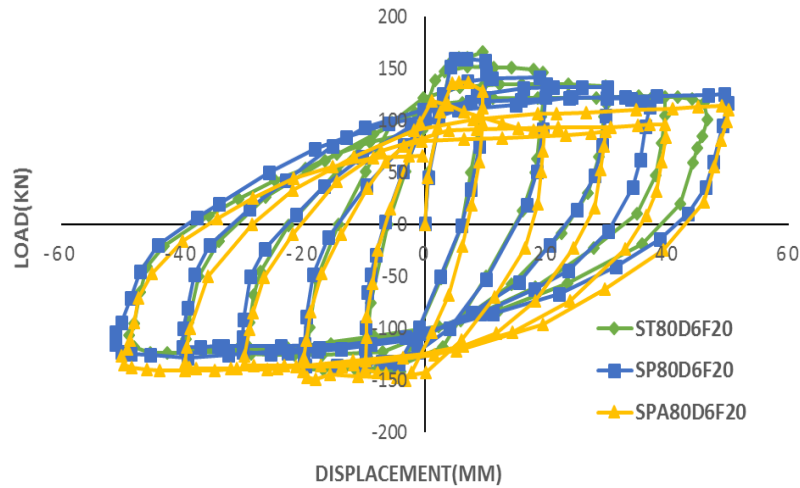
می‌باشند عمود هستند و در واقع ترک‌ها را به یکدیگر می‌دوزند و به این صورت مقاومت برشی تیر را بهبود می‌بخشند. اما در بارگذاری چرخه ای که جهت اعمال بار تغییر می‌کند، این دورپیچ‌ها تنها در یک جهت بر جهت ترک‌ها عمودند و در جهت دیگر بارگذاری با جهت ترک‌ها موازی می‌باشند. همان‌گونه که در شکل‌های ۱۷ و ۱۸ قابل مشاهده است، ترک‌های ناشی از بار چرخه ای به صورت X شکل هستند. همان‌گونه که در منحنی‌های هیستریزس شکل ۲۳ قابل مشاهده است، منحنی هیستریزس تیر دارای آرماتور عرضی SPA در یک جهت بارگذاری مقاومت نهایی ۱۳۶ کیلو نیوتن و در جهت دیگر بارگذاری مقاومت نهایی ۱۵۰ کیلو نیوتن دارد. این نشان می‌دهد که در جهتی که خاموت‌ها موازی جهت ترک هستند، تیر



شکل ۲۲. منحنی‌های پوش نمونه‌های با مقاومت بتن ۲۰ مگاپاسکال و قطر خاموت و دورپیچ ۶ و ۱۰ میلیمتر با گامهای ۸۰، ۱۲۰ و ۲۰۰ میلیمتر
 Fig. 22. Envelope curves of beams with 20 MPa concrete strength, 6 and 10 mm size spirals, and 80, 120, and 200 mm spacing

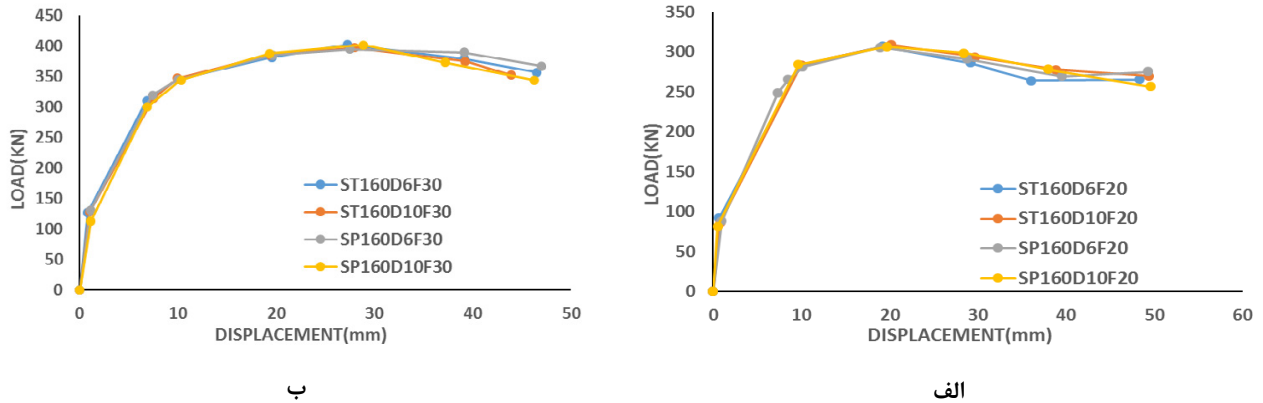
کرد که با افزایش گام، تراکم دورپیچ کم می‌شود و محصورکنندگی کمتری خواهد داشت. همچنین می‌توان گفت که با تسلیم شدن یک نقطه از دورپیچ مستطیلی در مقایسه با خاموت سنتی، محدوده‌ی بیشتری دچار اختلال در محصورشدگی هسته‌ی بتن می‌شود و اینگونه است که مقاومت هسته بتن دچار افت بیشتری می‌گردد و توان باربری تیر با سرعت بیشتری کاهش می‌یابد. همچنین با افزایش قطر خاموت

میلی متر مشاهده می‌شود که عملکرد خاموت سنتی در بارگذاری چرخه‌ای بهتر است و مقاومت نهایی آن در اولین سیکل بارگذاری ۵ درصد بیشتر و همچنین روند افت مقاومت کمتر است. به طوری که در چرخه‌های بعدی تیر دارای دورپیچ مستطیلی تا ۱۸ درصد بیشتر از تیر دارای خاموت سنتی افت مقاومت دارد که این مورد به وضوح در شکل ۲۲-ج قابل مشاهده است. این مورد را می‌توان این گونه توجیح



شکل ۲۳. منحنی هیستریزس منحنی های پوش مربوط به شکل ۲۲ الف

Fig. 23. Hysteresis curves of Fig. 22a



ب

الف

شکل ۲۴. منحنی های پوش تیرهای مدل سازی شده با ابعاد تیر و گام آرماتورهای عرضی دو برابر و قطرهای ۶ و ۱۰ میلیمتر دارای مقاومت (الف) ۲۰ و (ب) ۳۰ مگاپاسکال

Fig. 24. Envelope curves of the beams with double dimensions and spacing, 6 and 10 mm size spirals: a) 20 MPa b) 30 MPa

رفتار سازه از حالت خرابی برشی به حالت خرابی خمشی تغییر پیدا می کند و مقاومت نهایی و افت توان باربری آن ها نیز تحت تأثیر مقاومت بتن و آرماتورهای طولی تیر می باشد. مثلاً در اینجا با افزایش مقاومت بتن از ۲۰ به ۳۰ مگاپاسکال، مقاومت نهایی به میزان ۲۴٪ تا ۳۱٪ افزایش می یابد و افزایش مقاومت بیشتر، در تیرهای دارای دورپیچ مستطیلی رخ می دهد و این افزایش مقاومت در تیرهای دارای خاموت سنتی به میزان کمتر یعنی همان ۲۴٪ است.

۵. نتیجه گیری

با مشاهده نتایج به دست آمده از بارگذاری یک سویه و چرخه ای

و دورپیچ مستطیلی از ۶ میلی متر به ۱۰ میلی متر، مقاومت نهایی تیرهای بتنی ۹٪ تا ۱۵٪ افزایش می یابد و با افزایش مقاومت بتن از ۲۰ مگاپاسکال تا ۳۰ مگاپاسکال، مقاومت نهایی تیرهای بتنی با آرایش های مختلف آرماتور عرضی، به طور چشمگیری بین ۴۰٪ تا ۶۰٪ افزایش می یابد و روند افت توان باربری نیز بهبود می یابد. در شکل ۲۴ منحنی های پوش نمونه هایی حاوی خاموت سنتی و دورپیچ نشان داده شده است که ابعاد آن ها دو برابر شده است. با توجه به شکل ۲۴ می توان عنوان کرد که با افزایش ابعاد و مخصوصاً طول تیر بتنی، رفتار سازه تحت بارگذاری چرخه ای، با تغییر خاموت و دورپیچ مستطیلی و حتی افزایش قطر آن ها دچار تغییر نمی شود و در واقع

موارد زیر به عنوان نتایج مهم ذکر شده اند.

با بررسی مقایسه ظرفیت برشی تیرهای بتنی با خاموت و دورپیچ مستطیلی مشاهده می‌شود که هم بر اساس نتایج آزمایشگاه و هم بر اساس نتایج مدل‌سازی، آیین نامه بتن آمریکا به صورت محافظه‌کارانه و کمتر از مقدار آزمایش شده ظرفیت برشی را تخمین زده و فرمول ارائه داده است. بر این اساس، ظرفیت برشی محاسبه شده بر اساس این آیین نامه بین ۱۷٪ تا ۴۱٪ در نمونه‌های مختلف کمتر از ظرفیت به دست آمده در مدل‌سازی با نرم‌افزار آباکوس می‌باشد.

با بررسی منحنی‌های پوش برای نمونه‌های مختلف، این نتیجه به دست آمد که در تیرهای با بتن دارای مقاومت فشاری ۳۰ مگاپاسکال و بیشتر، عملکرد تیر تحت بار چرخه‌ای، حتی در تیری که برش رفتار غالب تیر است، تحت تأثیر مقاومت فشاری بتن قرار می‌گیرد و تفاوت محصورشدگی و آرماتور عرضی شامل خاموت سنتی و دورپیچ مستطیلی تأثیر چندانی بر عملکرد سازه در بارگذاری چرخه‌ای ندارند و به یک اندازه قابل اتکا می‌باشند و در واقع مقاومت برشی بتن در بارگذاری بیشتر عمل می‌کند. طبق روابط آیین نامه بتن آمریکا با کاهش مقاومت فشاری بتن، نقش آرماتورهای عرضی در تامین مقاومت تیر بتنی افزایش می‌یابد. این مهم در بارگذاری یک سوپه و چرخه ای مشهود است و با کاهش مقاومت بتن تا ۲۰ مگاپاسکال، به علت کم رنگ شدن اثر بتن، تفاوت در عملکرد تیرهای بتنی دارای آرماتورهای عرضی متفاوت به چشم می‌خورد.

با بررسی منحنی‌های پوش مقاومت می‌توان گفت که دورپیچ مستطیلی پیشرفته (SPA) به دلیل اینکه ساق‌های قائم آن‌ها در یک جهت بارگذاری چرخه ای بر ترک‌هایی که به وجود می‌آیند عمود است و در جهت دیگر بارگذاری چرخه ای با ترک‌ها موازی می‌باشند، متعاقباً در یک جهت برای مقاومت در برابر نیروی برشی وارده، دچار نقصان می‌شوند و عملکرد آن‌ها در بارگذاری چرخه‌ای عملکرد قابل قبولی نیست و در دو جهت بارگذاری مقاومت نهایی متفاوتی دارد و استفاده از آن‌ها در تیرهای بتنی به عنوان آرماتور عرضی، علی‌رغم اینکه در بارگذاری یک سوپه بهتر از خاموت سنتی عمل می‌کنند، توصیه نمی‌شود.

در تیرهایی که برش قالب است با افزایش قطر خاموت‌ها و دورپیچ‌های مستطیلی، مقاومت نهایی و آهنگ افت توان باربری بهبود می‌یابد و همچنین در بیشتر موارد خاموت‌ها و دورپیچ‌ها به یک اندازه

قابل اعتماد می‌باشند. لازم به ذکر است که با توجه به منحنی‌های پوش مقاومت باید توجه داشت که با افزایش گام دورپیچ‌ها تا ۲۰۰ میلی‌متر، این آرماتورهای عرضی خاصیت محصورکنندگی هسته‌ی بتن را از دست می‌دهند و نسبت به خاموت سنتی مقاومت نهایی و افت توان باربری بیشتری دارند. بنابراین در انتخاب دورپیچ‌ها باید به گام آن‌ها توجه شود.

فهرست علائم

علائم انگلیسی

A	مساحت، m^2
E	مدول الاستیسیته، N/m^2
f_c	مقاومت فشاری بتن، MPa

علائم یونانی

σ_t	تنش کششی
$\overline{\sigma}_t^{ck}$	معرف کرنش متناظر با ترک کشش
σ_t	کرنش کششی کلی
σ_{ot}^{el}	کرنش الاستیک بتن قبل از خرابی
σ_{t0}	تنش کششی
ϵ_{cr}	کرنش ترک کششی
ϵ_{oc}^{el}	کرنش الاستیک مصالح آسیب ندیده
ϵ_c	کرنش کل فشاری
ϵ_c^{pl}	کرنش پلاستیک

مراجع

- [1] L. Marvel, N. Doty, W. Lindquist, R. Hindi, Axial behavior of high-strength concrete confined with multiple spirals, 2014.
- [2] C.-Y. Liang, C.-C. Chen, C.-C. Weng, S.Y.-L. Yin, J.-C. Wang, Axial compressive behavior of square composite columns confined by multiple spirals, Journal of Constructional Steel Research, 103 (2014) 230-240.

- [9] M. Labib zadeh, M. Dadak, Determining of Load Bearing Capacity of Rectangular Concrete Column Reinforced with Longitudinal Spirals Using FEM and ANN Methods, Journal of Structural Engineering and Construction.10.22065/jsce.2018.101469.1351. (In Persian)
- [10] G. Maranan, A. Manalo, B. Benmokrane, W. Karunasena, P. Mendis, K. Nguyen, Shear behaviour of geopolymer-concrete beams transversely reinforced with continuous rectangular GFRP composite spirals, 2017.
- [11] M.A. Ab-Kadir, J. Zhang, N. Mashros, A. Hassan, N. Mohd, Experimental And Numerical Study On Softening And Pinching Effects Of Reinforced Concrete Frame, IOSR Journal of Engineering, 4(5) (2014) 1.
- [12] M. Li, H. Li, Effects of loading rate on reinforced concrete beams, in: 15th World Conference on Earthquake Engineering, 2012, pp. 24-28.
- [13] A.C.I. Committee, Building code requirements for structural concrete: (ACI 318-14) ; and commentary (ACI 318RM14), Farmington Hills, MI : American Concrete Institute, [2014] ©2014, 2014.
- [3] H.-O. Shin, K.-H. Min, D. Mitchell, Uniaxial behavior of circular ultra-high-performance fiber-reinforced concrete columns confined by spiral reinforcement, Construction and Building Materials, 168 (2018) 379-393.
- [4] M.Z. Afifi, H.M. Mohamed, B. Benmokrane, Theoretical stress-strain model for circular concrete columns confined by GFRP spirals and hoops, Engineering Structures, 102 (2015) 202-213.
- [5] D.-H. Jing, T. Yu, X.D. Liu, New configuration of transverse reinforcement for improved seismic resistance of rectangular RC columns: Concept and axial compressive behavior, 2016.
- [6] Wa.B. De Corte, Veerle, Effectiveness of spirally shaped stirrups in reinforced concrete beams, ENGINEERING STRUCTURES, 52 (2013) 667--675.
- [7] C. Karayannis, C. Chalioris, Shear tests of reinforced concrete beams with continuous rectangular spiral reinforcement, 2013.
- [8] N. Shatarat, H. Katkhuda, M.t. Abdel-Jaber, M. Alqam, Experimental investigation of reinforced concrete beams with spiral reinforcement in shear, Construction and Building Materials, 125 (2016) 585-594.

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

M. Labibzadeh, F. Bostan Shirin, A. Khajehdezfuly, Effect of rectangular spiral stirrup on bearing capacity of RC beams under cyclic loading, Amirkabir J. Civil Eng., 52(1) (2020) 135-154.

DOI: [10.22060/ceej.2018.14615.5698](https://doi.org/10.22060/ceej.2018.14615.5698)



