

نوع مقاله: یادداشت پژوهشی

چکیده

هدف این پژوهش بررسی عددی اثر خاموت‌های پیوسته (دورپیچ) در محصور شدگی ستون‌های مربعی بر میزان ظرفیت باربری و شکل‌پذیری ستون‌های بتن آرمه و مقایسه این نوع خاموت‌ها با خاموت‌های معمولی می‌باشد. جهت دستیابی به این هدف، تحلیل غیرخطی هندسی، غیرخطی مصالح و تحلیل از نوع RIKS به وسیله نرم‌افزار اجزای محدود ABAQUS صورت گرفته است. در مطالعه حاضر با ثابت نگه داشتن طول ستون‌ها اثر تغییر در پارامترهای مختلف نظیر فاصله‌ی خاموت‌ها، تنش تسلیم میلگردها (فولاد پر مقاومت و با مقاومت معمولی) و تغییر در ابعاد مقطع مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که ستون‌های محصور شده با دورپیچ عملکرد بسیار بهتری را نسبت به ستون‌های محصور شده با خاموت خواهند داشت. در شرایط مختلف در ستون‌های با دورپیچ نسبت به ستون‌های با خاموت، حدود ۱۰ تا ۲۰ درصد افزایش در ظرفیت باربری روی داده است. همچنین استفاده از دورپیچ سبب بهبود شکل‌پذیری ستون‌ها شده است. با افزایش فاصله خاموت‌ها و دورپیچ‌ها از ظرفیت باربری ستون کاسته می‌شود و با افزایش ابعاد مقطع ظرفیت باربری ستون افزایش و از میزان تنش وارده به میلگردها نیز کاسته می‌شود از سوی دیگر با افزایش تنش تسلیم میلگردها، از تنش وارد در بتن کاسته شده و ظرفیت ستون افزایش می‌یابد.

واژگان کلیدی: ستون، دورپیچ، خاموت، محصورشدگی، تحلیل غیرخطی، شکل‌پذیری، ظرفیت باربری.

بررسی عملکرد ستون‌های بتن آرمه مربعی محصورشده با خاموت‌های مارپیچ

امیر کساری

دانشجوی کارشناسی ارشد سازه، گروه مهندسی عمران، واحد ارومیه، دانشگاه آزاد اسلامی، ارومیه، ایران

اشکان خدابنده‌لو (نویسنده مسئول)

استادیار، گروه مهندسی عمران، واحد ارومیه، دانشگاه آزاد اسلامی، ارومیه، ایران، a.khodabandehlou@iaurmia.ac.ir

۱- مقدمه

همچنین در این روش با یک نسبت ثابت از آرماتور عرضی، وضعیت شکل‌پذیری در مقایسه با خاموت‌های مرسوم در کارگاه‌ها بهبود یافته است و در نهایت استفاده از آرماتورهای مارپیچ در اعضای سازه‌ای سبب افزایش مقاومت برشی، خمشی و محوری می‌شود. برای خاموت‌های رایج مورد استفاده، نیاز به دو قلاب انتهایی برای تحمل لنگر است که برای طول این دو قلاب برای هر خاموت بسته شده مقدار زیادی مصالح فولادی مورد نیاز است که باعث افزایش وزن فولاد و قیمت آن می‌شود در حالی که در آرماتورگذاری مارپیچ برای نصب، این روند مورد نیاز نیست و این نوع آرماتورگذاری باعث کاهش وزن فولاد و همچنین صرفه‌جویی در هزینه به دلیل کاهش فولاد مصرفی در مقایسه با خاموت‌های رایج می‌باشد. همچنین تأثیر

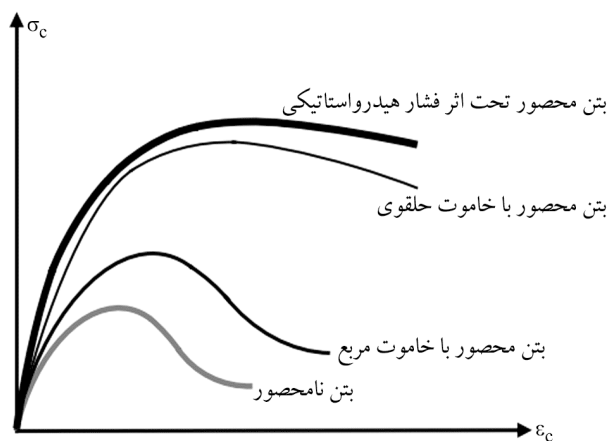
در سال‌های اخیر استفاده از خاموت‌های مارپیچ در اجزای بتن آرمه توسعه یافته است. نتایج عملی از این آزمایش‌ها نشان داده است که کاربرد آرماتورگذاری مارپیچ یا فئری (SR) نسبت به سایر روش‌های متداول سبب بهبود عملکرد لرزه‌ای شده است. تجربه نشان داده است که با اعمال پیچش در اعضای بتنی، با توجه به تنش‌های کششی اصلی در قطر تک‌تک المان‌های عضو سازه‌ای ترک‌های پیچشی با الگوهای مارپیچی شکل، گسترش خواهند یافت. با توجه به الگوی گسترش ترک‌های پیچشی در مقطع، این ترک‌ها به شکل نسبتاً ایده‌آلی عمود بر مقطع آرماتورهای دورپیچ قرار می‌گیرند. نتایج تحقیقات صورت گرفته تاکنون به وضوح نشان می‌دهند که استفاده از خاموت‌های مارپیچ مستطیلی، ظرفیت باربری را افزایش می‌دهد.

می‌کنند. ماس و همکاران [۱۵] در سال ۲۰۱۶ در یک مطالعه آزمایشگاهی که شامل هفت تیر بتن مسلح کوچک بود به بررسی خاموت‌های پیوسته از جنس آلیاژهای شکلی حافظه‌دار و اثر آن بر برش تیر پرداختند. نتایج نشان داد که خاموت‌های اسپیرال از نوع آلیاژهای حافظه‌دار قابلیت تغییر شکل المان‌های بتنی، بالاخص تیرهایی که مود شکست برشی دارند را به طور قابل توجهی افزایش می‌دهد. در سال ۲۰۱۹، ساها و میساراگاندا [۱۶] اتصالات بتن مسلح را که با بتن خودمترکم ساخته شده بود و با خاموت‌های اسپیرال مربعی مسلح شده بود را تحت بارگذاری چرخه‌ای قرار دادند. زاویه خاموت‌های اسپیرال به ترتیب برابر با ۷۵، ۸۰ و ۸۵ درجه در نظر گرفته شد. نتیجه‌ها نشان دادند که استفاده از خاموت‌های اسپیرال باعث بهبود مقاومت نهایی، سختی، ضریب شکل‌پذیری و جذب انرژی نسبت به خاموت‌های معمولی می‌گردد. آنها همچنین استفاده از خاموت‌های اسپیرال را به عنوان یک روش مناسب، عملی و کارآمد برای بهبود عملکرد اتصالات سازه‌ای در مناطق لرزه‌ای پیشنهاد کردند. در سال ۲۰۲۰، عظیمی و همکاران [۱۷] به مطالعه عددی و آزمایشگاهی اتصالات خارجی بتنی مسلح شده با اسپیرال‌های مربعی پرداخته و عملکرد این اتصالات را تحت بارگذاری چرخه‌ای بررسی کردند. آنها شش اتصال تیر به ستون را در مقیاس واقعی آزمایش کردند و نتیجه گرفتند که استفاده از این نوع خاموت‌ها باعث بهبود ظرفیت باربری، جذب انرژی، مقاومت جانبی و شکل‌پذیری می‌گردد. همچنین مشاهده کردند که این نوع از خاموت‌ها به طور قابل توجهی سرخوردگی خاموت‌های معمولی که باعث کاهش مقاومت برشی می‌گردد را از بین می‌برد. در سال ۱۳۹۳ خیرالدین و همکاران [۱۸] به معرفی و بیان ویژگی‌های خاموت‌های پیوسته، مطالعات آزمایشگاهی انجام شده در خصوص تأثیر شکل، قطر و فاصله خاموت در ظرفیت تحمل بار، میزان تغییر شکل و مود گسیختگی ستون‌های بتن آرمه در دو حالت خاموت پیوسته و موازی پرداختند. در حالت کلی المان‌های بتن آرمه تمایل زیادی به ترد شکنی دارند و این پدیده در هنگام زلزله (در صورت عدم رعایت ضوابط

SR در ایجاد ترک‌ها و نحوه رفتار عضو پس از ایجاد ترک‌ها آزمایش شده است.

تحقیقات و آزمایش‌های زیادی در مورد رفتار فشاری محوری ستون‌های مرکب با خاموت‌های مارپیچ مرکب انجام شده است. در این مطالعات متغیرات شامل نوع آرماتور عرضی، فاصله آرماتور عرضی و شکل مقطع فولادی سازه می‌باشد. نتایج آزمایش‌ها نشان داد که ستون‌های مرکب با خاموت‌های مارپیچ به ظرفیت باربری محوری بیشتر و شکل‌پذیری بهتری دست یافته‌اند [۱-۲]. عملکرد ایده‌آل مارپیچ‌های فولادی پیوسته (فتری)، در ظرفیت باربری و محصور شدگی بتن و شکل‌پذیری عناصر بتن مسلح، با مقطع دایره‌ای سال‌های زیادی است که به رسمیت شناخته شده است [۳-۵]. آرماتورگذاری مارپیچ در بهبود عملکرد لرزه‌ای نیز بسیار مؤثر است. محصور شدگی قابل توجه مارپیچ‌های در هم قفل شده، برای مراقبت از بتن و تأثیر آن در مقاومت پیچشی زیر بارهای ترکیبی از نکات قابل توجه است [۶-۷]. کاربرد خاموت‌های مارپیچ در المان‌های بتن آرمه دایره‌ای زیر تغییر شکل گردشی با اثر پیچشی به وضوح مورد تحقیق قرار گرفته است [۸-۱۱]. در سال ۲۰۱۳، کارایانیس و کالیوریس [۱۲] رفتار تیرهای بتن مسلح با خاموت‌های مستطیلی پیوسته تحت بارگذاری یکنواخت را به صورت آزمایشگاهی مورد بررسی قرار دادند. نتایج آزمایش‌ها به وضوح نشان داد که استفاده از تقویت مارپیچ مستطیلی باعث افزایش ظرفیت باربری و بهبود عملکرد برشی در تیرهای مورد بررسی شدند. ایوم و همکاران [۱۳] در سال ۲۰۱۴ در تحقیقات آزمایشگاهی به بررسی عملکرد آرماتورهای عرضی ممتد در ستون‌های بتن آرمه پرداخته‌اند. نتایج این تحقیقات نشان داده است که استفاده از آرماتورهای عرضی ممتد می‌تواند تا ۲۵ درصد مصرف فولاد مصرفی را کاهش دهد. سرگا [۱۴] در سال ۲۰۱۵ اثر فاصله‌ی آرماتورهای عرضی در میزان مقاومت در برابر آتش را مورد مطالعه قرار داده است. نتایج این تحقیقات نشان می‌دهد که ستون‌هایی که با ضوابط آیین‌نامه‌های موجود طراحی شده‌اند، انهدام زودرسی در نتیجه کماتش آرماتور طولی بین آرماتورهای عرضی را تجربه

یافت. اگر در رفتار لرزه‌ای، بتن پوششی که در قسمت بیرونی فولادها قرار دارد، خرد و پراکنده شود، لازم است بتن باقیمانده که قسمت عمده‌ای از سازه را تشکیل می‌دهد اولاً جبران بخش‌هایی از بتن از دست رفته را بنماید و ثانیاً نیاز شکل‌پذیری سازه را در همراهی با فولاد تأمین کند. چنانچه به‌قدر کافی فولاد محصور کننده (خاموت‌ها یا تنگ‌ها) برای محصور کردن بتن و به‌ویژه برای ناحیه فشاری تعبیه نگردد، فولادهای اصلی و طولی فشاری دچار کماتش شدید شده و مقاومت بتن سریعاً به مرحله تخریب نزدیک گشته که در چنین وضعی سازه فرو خواهد ریخت. چنانچه بتن غیر محصور تحت اثر تنش‌های فشاری به مرحله مقاومت نهایی برسد، تنش‌های کششی جانبی و در نتیجه در آن کرنش کششی جانبی زیاد و پس از آن ترک‌های مویی طولی ایجاد خواهد شد. این دو پدیده ناپایداری ناحیه فشاری را موجب می‌شود. تعبیه فولادهای فرعی به‌عنوان خاموت یا تنگ‌ها، بتن را محصور کرده که در نتیجه مقاومت بتن افزایش یافته و کرنش فشاری تا حد قابل توجهی بالاتر رفته و پایداری ناحیه فشاری را بیشتر خواهد کرد و تخریب مقطع به تأخیر خواهد افتاد. یک مقایسه ساده بین نوع خاموت‌های به کار رفته در شکل (۱) نشان داده شده است.



شکل (۱): منحنی تنش-کرنش بتن تحت شرایط مختلف محصور شدن.

بر طبق این شکل هر قدر خاموت‌ها شکل بسته تری داشته باشند و به سمت نوع حلقوی پیش روند منحنی تنش-کرنش بیشتر اصلاح می‌شود تا جایی که منحنی مربوط به خاموت حلقوی یا

به‌وضوح نمایان می‌گردد [۱۹]. یکی از مزایای محصور کردن بتن، افزایش مقاومت و شکل‌پذیری آن است که اگر به نحوی مناسب محصور شده باشد و اثر نیروهای لرزه‌ای باعث پوسته شدن پوشش آن شود، بتن محصور شده به‌خوبی مقاومت می‌کند زیرا قسمت دوم منحنی تنش کرنش آن از شیب کمی برخوردار می‌شود و در نتیجه کرنش مرحله نهایی افزایش می‌یابد. بهترین شیوه به‌منظور محصور کردن بتن خاموت‌گذاری به‌صورت ماریپیج است. در این روش از خاموت‌های ماریپیج با مقطع مستطیلی یا دایروی استفاده می‌شود که استفاده از خاموت‌های ماریپیج مانند آرماتورهای عرضی در عناصر بتن آرمه با مقطع مستطیلی خیلی محدود است و این بحث همچنان نیاز به مطالعه دارد [۲۰].

با توجه به تحقیقات انجام گرفته مشاهده می‌شود که تاکنون اثر خاموت‌های پیوسته و همچنین اثر تغییر پارامترهای مختلف در محصورکنندگی در ستون‌های دارای مقطع مربعی دارای میلگردهای پیوسته صورت نگرفته است. در مورد محصورشدگی اعضای بتنی با خاموت با توجه به موارد ذکر شده در مورد اهمیت و نقش آرماتورهای عرضی در عملکرد اجزای سازه‌ای، هدف از تحقیق حاضر، بررسی عملکرد خاموت‌های ماریپیج در مقایسه با آرماتورهای عرضی مرسوم در ستون‌های بتن آرمه با مقطع مربع می‌باشد. همچنین اثر تغییر پارامترهای مختلف از جمله تنش تسلیم آرماتورها (فولاد پر مقاومت و با مقاومت معمولی)، فاصله آرماتورهای عرضی و ابعاد مقطع ستون در عملکرد رفتاری، از جمله ظرفیت باربری و شکل‌پذیری، در ستون‌های دارای این نوع از خاموت‌ها مورد بررسی و تحلیل قرار گرفته است.

۲- محصور کردن بتن

بتن غیر محصور به دلیل مقاومت و کرنش کمتر، برای رفتار لرزه‌ای سازه‌های بتن مسلح مناسب نیست. علیرغم دقت در تعبیه فولادهای لازم برای تأمین شکل‌پذیری سازه، به‌ندرت بتوان بدون بتن محصور به شکل‌پذیری مطلوب و مورد نظر دست

مقاومت برشی یک عضو با میلگردهای قائم از رابطه (۲) به دست می‌آید:

$$V_r = V_{cr} + \frac{A_v f_y d}{s} \quad (2)$$

که در آن V_{cr} برابر است با:

$$V_{cr} = V_c + V_d \quad (3)$$

که در آن V_c برابر با مقاومت برشی بتن و V_d برابر با برش تحمل شده توسط میلگردهای طولی می‌باشد که می‌توان از آن صرف نظر کرد. $\frac{A_v f_y d}{s}$ نیز سهم خاموت‌های قائم از نیروی برشی می‌باشد که A_v برابر با سطح مقطع آرماتور برشی، f_y برابر با تنش تسلیم فولاد برشی، d برابر با فاصله دورترین تار فشاری تا مرکز سطح آرماتور کششی طولی و s برابر با فاصله بین آرماتورهای برشی می‌باشند.

همچنین مقاومت برشی یک عضو با میلگردهای مایل از رابطه (۴) به دست می‌آید:

$$V_r = V_{cr} + \frac{A_v f_y (\sin \alpha + \cos \alpha)}{s} \quad (4)$$

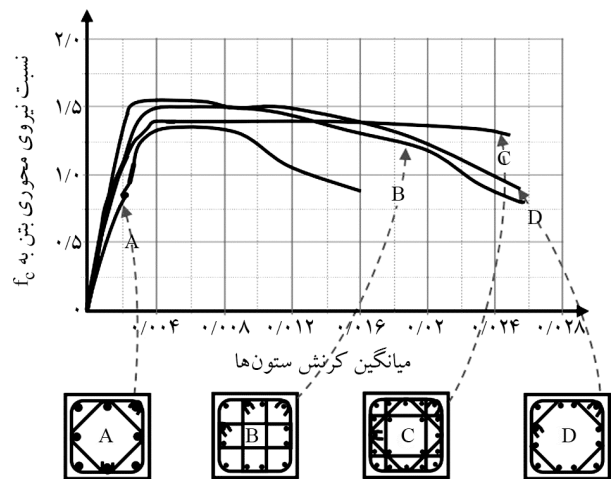
که در آن α برابر با زاویه بین میلگردهای طولی خم شده یا خاموت‌های مایل و محور طولی عضو می‌باشد.

روابط (۲) و (۴) وقتی قابل استفاده هستند که هر ترک قطری دلخواه حداقل توسط یک خاموت یا میلگرد مایل قطع شده باشد. در غیر این صورت آرماتورهای عرضی در مقاومت برشی مشارکت نخواهند داشت و ترک قطری می‌تواند در حد فاصل دو خاموت تشکیل شده و تیر را همانند حالتی که در جان فولادهای برشی تعبیه نشده است، از بین ببرد. این مسئله ایجاب می‌کند که یک حد فوقانی برای فاصله s در نظر گرفته شود تا اطمینان حاصل گردد که ترک قطری حتماً توسط آرماتورهای عرضی قطع می‌شود [۲۲].

۳- محصور کردن

لازم است رفتار بتن مسلح و غیرمسلح را در برابر نیروهای ناشی از زلزله به خوبی شناخت؛ زیرا بتن مسلح توسط میلگردهای طولی و عرضی (خاموت‌ها) به طور قابل توجهی محصور می‌شود

ماریچ نزدیک به اثر فشارهای هیدرواستاتیکی (یکنواخت) خواهد بود. باید توجه داشت که اثر محصور کردن علاوه بر افزایش مقاومت موجب افزایش مدول ارتجاعی نیز شده است که این پدیده نیز در طراحی لرزه‌ای اثر بسیار چشمگیری دارد [۱۸، ۲۱]. از مهم‌ترین عواملی که بر محصور کردن بتن اثر دارد و باید در مدل‌های منحنی تنش-کرنش دخالت داده شود عبارتند از: نسبت حجمی فولادهای عرضی ρ_h ، مقاومت تسلیم خاموت‌ها f_{sy} ، مقاومت فشاری بتن f_{co} ، فاصله خاموت‌ها s ، آرایش خاموت‌ها و فولادهای طولی. در شکل (۲) اثر آرایش خاموت‌ها بر روی رفتار ستون‌های مربعی مشاهده می‌گردد.



شکل (۲): اثر آرایش خاموت‌ها بر منحنی رفتاری بتن.

پس از ترک خوردن، انتقال برش در عضو بتنی توسط ترکیبی از مکانیسم‌های زیر مطابق شکل (۱) صورت می‌گیرد:

۱. مقاومت برشی بتن ترک خورده V_{cr} ،
۲. نیروی ناشی از درگیر بودن دانه‌های سنگی در محل ترک V_a (که مشابه نیروی اصطکاک ناشی از تماس سطوح ناصاف بتن در دو طرف ترک است)،
۳. عمل برشی آرماتور طولی V_d (مقاومت آرماتور طولی در مقابل نیروی عرضی).

برای محاسبه مقاومت برشی بتن می‌توان از رابطه (۱) استفاده کرد:

$$V_c = \left[0.5 \sqrt{f'_c} + 175 \frac{P_w V_u d}{M_u} \right] b_w d \leq 0.93 \sqrt{f'_c} b_w d \quad (1)$$

که رفتارشان با حالتی که محصور نیست تفاوت قابل توجهی دارد.

۳-۱- محصورشدگی فعال و غیرفعال

در برگرفتن هسته مرکزی یک عضو سازه بتن مسلح، به وسیله یک عامل درونی یا بیرونی مانند آرماتورهای عرضی در داخل بتن، الیاف کربن دور پیچ خارجی (FRP) و ورق پوسته‌های فولادی موجب محصورشدگی بتن می‌شود. در بسیاری از حالات کرنش فشاری نهایی بتن محصور نشده برای رسیدن به سطح مطلوب شکل‌پذیری کافی نیست. مگر اینکه هسته مرکزی بتن فشاری با مقدار کافی از آرماتورهای عرضی مسلح شود تا از کماتورهای طولی جلوگیری گردد. هنگامی که بتن غیرمسلح تحت تأثیر تنش‌های فشاری در جهت رسیدن به مقاومت شکست قرار می‌گیرد. کرنش‌های عرضی بزرگی در اثر شکل‌گیری و انتشار ترک‌های طولی ایجاد می‌شود. این امر منجر به ناپایداری ناحیه فشاری و در نتیجه شکست می‌گردد. آرماتورهای بسته عرضی که با آرماتورهای طولی پیوستگی دارند، در جهت محدود کردن انبساط جانبی بتن عمل کرده و باعث می‌شوند که عضو بتن مسلح، توانایی تحمل تنش‌های فشاری بیشتر و بزرگ‌تری را داشته باشد و با وجود کرنش‌های فشاری بسیار بزرگ‌تر، قبل از اینکه شکست ناحیه فشاری اتفاق افتد پایدار بماند. محصور نمودن بتن باعث می‌شود که شیب قسمت دوم منحنی تنش کرنش بتن (قسمت نزولی آن) کم شده و در نتیجه کرنش مرحله نهایی افزایش یابد. به این ترتیب سطح زیر منحنی تنش-کرنش بتن که معادل جذب انرژی است، افزایش یافته و در نتیجه شکل‌پذیری مقطع مورد نظر بیشتر می‌شود؛ بنابراین به‌طور کلی می‌توان افزایش مقاومت بتن و افزایش ظرفیت جذب انرژی و در نتیجه افزایش شکل‌پذیری بتن را برای محصور کردن بتن در نظر گرفت. ثابت شده است که مقاومت و شکل‌پذیری بتن در فشارهای سه‌محوری افزایش می‌یابد. در عمل حالت بارگذاری معادل با فشار هیدرواستاتیکی موجب می‌شود که آرماتورهای عرضی (به شکل خاموت بسته و یا دور پیچ) از افزایش کرنش جانبی عضوی که تحت بار

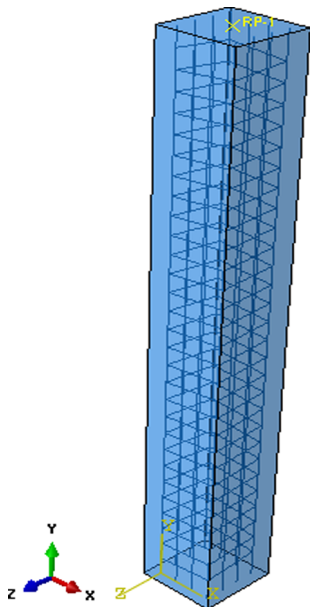
محوری قرار گرفته است، جلوگیری نماید.

رفتار و مقاومت بتن در حالت عادی و محصور شده تفاوت‌های زیادی با یکدیگر دارند. شیوه محصور کردن بتن تأثیر مستقیم در این تفاوت دارد رفتار غیر ارتجاعی بتن با شروع ترک‌های بین دانه‌بندی و خمیر سیمان یا ملات آن آغاز می‌شود و این پدیده تأثیر بسیار زیادی بر قسمت دوم منحنی تنش-کرنش بتن می‌گذارد. همچنین رفتار بتن بر اثر محصور شدن از لحظه‌ای که ترک‌های داخلی شکل می‌گیرند و موجب ازدیاد حجم می‌شوند تغییرات چشم‌گیری دارد. از این‌رو بررسی بتن محصور در طرح لرزه‌ای سازه‌ها از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. گزارش‌های منتشر شده توسط دیگران نشان می‌دهد که در سال ۱۹۰۳ میلادی برای نخستین بار اثر محصورکنندگی میلگردهای عرضی از نوع مارپیچ در ستون‌های بتن مسلح به صورت آزمایشگاهی و عملی مورد استفاده قرار گرفته است [۷]. از آن تاریخ تاکنون موضوع محصورشدگی بتن در سازه‌های بتن مسلح و بتن پیش‌تنیده مورد توجه محققین و مهندسين بسیاری بوده است. این مطالعات را می‌توان در دو گروه محصورشدگی فعالی و غیر فعالی تقسیم‌بندی کرد. در محصورشدگی فعال رفتار بتن تحت اثر فشارهای سه‌محوری (هیدرواستاتیکی) مورد نظر است ولی در محصورشدگی غیر فعالی توسط میلگردهای عرضی تأمین می‌شود. چنانچه قبلاً توضیح داده شد، در محصورشدگی غیر فعال اگر مقاومت بتن کم باشد، میلگردها تحت تنش‌های زیادی قرار می‌گیرند و در نتیجه بتن محصور نخواهد شد. درحالی‌که اگر تنش‌های فشاری در بتن در شرایطی به مقاومت مشخصه (تک‌محوری) خود برسند که کرنش‌های جانبی بسیار زیاد شود و ترک‌های داخلی توسعه یابند و میلگردهای عرضی از حرکت بتن جلوگیری کنند، می‌گوییم بتن محصور شده است.

در هر حال دامنه تحقیقات در خصوص محصورشدگی بتن همچنان ادامه یافت. برای مثال در سال ۱۹۲۹ ریچارد و همکارانش [۲۳] در دانشگاه ایلینوی آمریکا طی تحقیقاتی نشان دادند که اگر نمونه‌ی استوانه‌ای بتن تحت فشار ثابت و

۵- مشخصات و روند تحلیل نمونه‌های حاضر

در این مقاله، با استفاده از نرم‌افزار المان محدود ABAQUS و نیز منابع نظری موجود ظرفیت باربری و رفتار ستون‌های بتن آرمه بررسی شده است [۲۴]. به‌علاوه، از تحلیل RIKS برای در نظر گرفتن رفتار غیرخطی مصالح و غیرخطی هندسی استفاده شده است. طول ستون‌های شبیه‌سازی شده ثابت و برابر با سه متر می‌باشد. مشخصات مصالح، ابعاد سطح مقطع، فاصله‌ی خاموت‌ها از یکدیگر به‌عنوان متغیر در نظر گرفته شده‌اند. به‌طور کلی هفت ستون در دو حالت محصور شده با خاموت و دورپیچ مدل‌سازی شده‌اند و در مجموع ۱۴ ستون، مطابق آنچه در شکل (۳) نشان داده شده، مورد مطالعه قرار گرفته است. مطابق جدول (۱) مشخصات سازه‌ای ستون‌های مورد مطالعه ارائه شده است. نحوه مدل‌سازی و انتخاب مصالح، نوع المان‌ها و مش‌بندی دقیقاً از مطالعه انجام‌شده توسط حبیب‌پور و فرحید [۲۵] انتخاب گردید که در آن یک ستون مربعی را بدون مقاوم‌سازی در نرم‌افزار ABAQUS تحت بار جانبی مدل‌سازی کردند و نتایج آن را با نتایج آزمایشگاهی تطابق داده و صحت‌سنجی را انجام دادند، لذا به همین دلیل با فرض درست بودن همان صحت‌سنجی، در این مطالعه صحت‌سنجی انجام نگرفت.



شکل (۳): نمای کلی نمونه ستون‌های مدل‌سازی شده در محیط نرم‌افزار ABAQUS.

یکنواخت هیدرولیکی جانبی قرار گیرد، در مقابل بار محوری فشاری افزایش مقاومت نشان می‌دهد و اگر همین نمونه استوانه‌ای را با خاموت‌هایی مسلح کنیم همین نوع افزایش مقاومت را در برابر بار محوری و فشاری نشان می‌دهد.

۴- مدل ریاضی تنش- کرنش بتن محصور

یکی از بهترین عواملی که به‌وسیله آن می‌توان خصوصیات رفتاری بتن را تشریح و تحلیل کرد، منحنی تنش- کرنش آن می‌باشد. این منحنی دارای دو شاخه صعودی و نزولی است. در آزمایش‌های مختلفی که برای به دست آوردن منحنی تنش- کرنش بتن انجام شده است، اطلاعات مربوط به قسمت صعودی منحنی تا نقطه اوج در مقایسه با قسمت نزولی، به‌راحتی به دست می‌آید، اما به علت شکست ناگهانی بتن و کاهش سختی دفعی آن در نقطه اوج، داده‌های مربوط به شاخه نزولی منحنی به‌آسانی قابل دستیابی نیست. در بیشتر دستگاه‌های مورد استفاده در آزمایش فشار استاندارد، سرعت افزایش فشار به‌گونه‌ای است که با افزایش کرنش، فشار بیشتری به نمونه وارد می‌شود؛ اما در نقطه اوج که سختی کم شده و به صفر رسیده و در قسمت نزولی تبدیل به نرمی می‌شود اغلب دستگاه‌ها نمی‌توانند این کاهش سختی را تشخیص دهند زیرا که کرنش را کنترل می‌کنند، لذا بعد از نقطه اوج نیز با همان سرعت قبلی فشار افزایش یافته که منجر به شکست ناگهانی نمونه می‌شود. این امر موجب شده است که برای قسمت نزولی منحنی تنش- کرنش اطلاعات اندکی در اختیار باشد. برای دستیابی به اطلاعات بیشتر در مورد شاخه نزولی منحنی تنش- کرنش بتن لازم است دستگاه‌هایی که نسبت به کاهش سختی بتن حساس بوده و بتوانند فشار وارده را با این سختی تنظیم نمایند، در اختیار باشد. این دستگاه‌ها بسیار گران و کاربرد آنها پر هزینه است و به همین دلیل در اکثر تحقیق‌ها، آزمایش‌ها با دستگاه‌های معمولی انجام شده است. تاکنون مدل‌های تحلیلی متعددی برای رابطه‌ی تنش-کرنش بتن محصور و غیر محصور از طرف محققین ارائه گردیده است. اغلب این مدل‌ها بر پایه نتایج آزمایشگاهی استوار است.

جدول (۱): مشخصات سازه‌ای ستون‌های مورد مطالعه.

ردیف	ابعاد مقطع (سانتی‌متر)	میلگردها	فاصله میلگردها (سانتی‌متر)	تنش تسلیم (مگاپاسکال)
۱	۴۰×۴۰	۱۲ D۱۸	۱۰	۲۸۰
۲	۴۰×۴۰	۱۲ D۱۸	۱۵	۲۸۰
۳	۴۰×۴۰	۱۲ D۱۸	۲۰	۲۸۰
۴	۴۰×۴۰	۱۲ D۱۸	۱۰	۴۰۰
۵	۴۰×۴۰	۱۲ D۱۸	۱۰	۶۳۶
۶	۴۵×۴۵	۱۲ D۱۸	۱۰	۲۸۰
۷	۵۰×۵۰	۱۲ D۱۸	۱۰	۲۸۰

المان محدود نمونه‌ها پرداخته شده است. در گام اول با ثابت بودن تنش تسلیم آرماتورها و مقطع ستون، اثر فاصله و گام خاموت‌ها و دورپیچ مورد بررسی قرار می‌گیرد. در گام دوم با ثابت بودن تنش تسلیم و فاصله‌ی آرماتورهای عرضی از یکدیگر به بررسی اثر تغییر در مشخصات ابعادی مقطع ستون پرداخته شده است و در گام سوم تنها متغیر در روند تحلیل ستون‌ها تنش تسلیم آرماتورها می‌باشد.

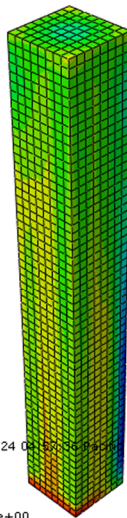
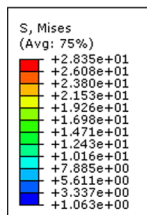
۶-۱- تغییر در فاصله‌ی آرماتورهای عرضی

در این بخش مقاومت تسلیم میلگردها ۲۸۰ مگاپاسکال و ابعاد سطح مقطع ستون ۴۰ سانتی‌متر در ۴۰ سانتی‌متر فرض شده است و فاصله خاموت‌ها متغیر و برای سه حالت با ۱۰، ۱۵ و ۲۰ سانتی‌متر می‌باشد. ستون‌ها تحت شرایط یکسان برای هر دو حالت آرماتور عرضی به صورت دورپیچ و خاموت مدل‌سازی می‌شوند و نتایج نهایی حاصل از هر دو روش با یکدیگر مقایسه می‌شوند. با قرارگیری آرماتورهای عرضی در فواصل ۱۰ سانتی‌متر تنش در بتن به ترتیب برای خاموت و دورپیچ برابر با ۲۸/۸ و ۲۸/۳ مگاپاسکال می‌باشد. همچنین تنش در آرماتورهای عرضی به ترتیب برای خاموت و دورپیچ برابر با ۲۸۸ و ۲۸۶ مگاپاسکال می‌باشد. همان‌طور که انتظار می‌رفت وضعیت تنش ستون محصور شده با دورپیچ بهبود یافته است؛ به طوری که به ترتیب در آرماتورهای عرضی و بتن یک و دو درصد کاهش در تنش مشاهده شده است. در شکل‌های (۴) و (۵) کانتورهای تنش حاصل از تحلیل صورت گرفته برای بتن و آرماتورها نمایش داده شده است. در این راستا می‌توان گفت ستون با خاموت آسیب‌های بیشتری را متحمل خواهد شد.

جهت مدل‌سازی ستون بتنی در نرم‌افزار از المان Solid extrude و برای آرماتورها از المان Wire-planar استفاده شد. نوع آنالیز تعریف شده، آنالیز استاتیکی می‌باشد. برای رفتار پس‌کمانشی، نرم‌افزار ABAQUS گزینه Static Riks را معرفی و پیشنهاد می‌کند. تغییر شکل‌های ناشی از آنالیز کمانش خطی برای آنالیز غیرخطی Riks معرفی می‌شوند و یا یک تغییر شکل اولیه به این آنالیز معرفی می‌شود. در این مطالعه از آنالیز Riks برای در نظر گرفتن رفتار غیرخطی مصالح و غیرخطی هندسی استفاده شده است. برای اینکه حرکت نقاط مختلف را به هم محدود نماییم در قسمت Interaction از گزینه Coupling استفاده شده است. همچنین برای جایگذاری میلگردها در قطعه بتنی از گزینه Embadd region استفاده شده است. در این مطالعه در آنالیز Riks از بارهای متمرکز که به انتهای ستون وارد شده‌اند، استفاده کرده‌ایم. ستون‌های مدل‌سازی شده یک سر گیردار و یک سر مفصل می‌باشند. نوع بارگذاری از نوع جابه‌جایی کنترل بوده که با افزایش زمان جابه‌جایی وارد بر بالای تیر افزایش می‌یابد. المان در نظر گرفته شده برای مش‌بندی بتن، از نوع 3D Stress (C3D8R) و برای میلگردها از نوع Truss (T3D2) می‌باشند. در نهایت مدل ساخته شده در نرم‌افزار تحت بارگذاری تعریف شده قرار گرفته و برش وارد بر انتهای ستون و همچنین جابه‌جایی بالای ستون به عنوان خروجی توسط نمودار در برابر هم و برای هر نمونه رسم می‌گردند.

۶- تحلیل نمونه‌ها و تفسیر نتایج

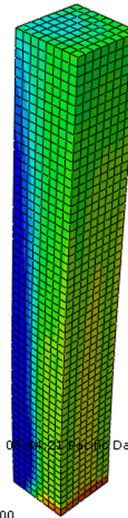
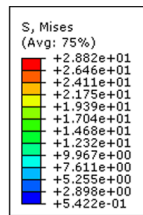
در این بخش به ارائه پاسخ‌های دریافتی و بحث و بررسی نتایج



ODB: Job-1.odb Abaqus/Standard 6.10-1 Sat Jun 24 04:57:38 Pacific Daylight Time 2017

Step: Step-1
Increment 100: Arc Length = 3.8455E+04
Primary Var: S, Mises
Deformed Var: U Deformation Scale Factor: +1.000e+00

ستون با دورپیچ (ب)

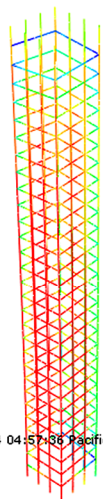
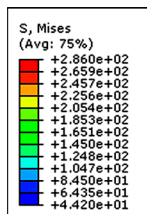


ODB: Job-2.odb Abaqus/Standard 6.10-1 Sat Jun 24 05:44:21 Pacific Daylight Time 2017

Step: Step-1
Increment 100: Arc Length = 2944.
Primary Var: S, Mises
Deformed Var: U Deformation Scale Factor: +1.000e+00

ستون با خاموت (الف)

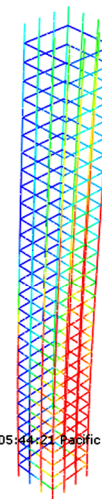
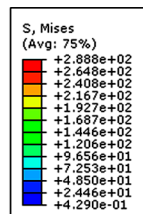
شکل (۴): کانتورهای توزیع تنش در بتن.



ODB: Job-1.odb Abaqus/Standard 6.10-1 Sat Jun 24 04:57:38 Pacific Daylight Time 2017

Step: Step-1
Increment 100: Arc Length = 3.8455E+04
Primary Var: S, Mises
Deformed Var: U Deformation Scale Factor: +1.000e+00

ستون با دورپیچ (ب)



ODB: Job-2.odb Abaqus/Standard 6.10-1 Sat Jun 24 05:44:21 Pacific Daylight Time 2017

Step: Step-1
Increment 100: Arc Length = 2944.
Primary Var: S, Mises
Deformed Var: U Deformation Scale Factor: +1.000e+00

ستون با خاموت (الف)

شکل (۵): کانتورهای توزیع تنش در آرماتورها.

است. حداکثر بار ستون با دورپیچ و خاموت به ترتیب برابر با ۴۲۶۵/۸۵ و ۳۳۸۴/۰۸ کیلو نیوتن می‌باشد، همان‌طور که مشاهده می‌شود، ظرفیت ستون با دورپیچ ۲۰ درصد بیشتر از ستون با خاموت است.

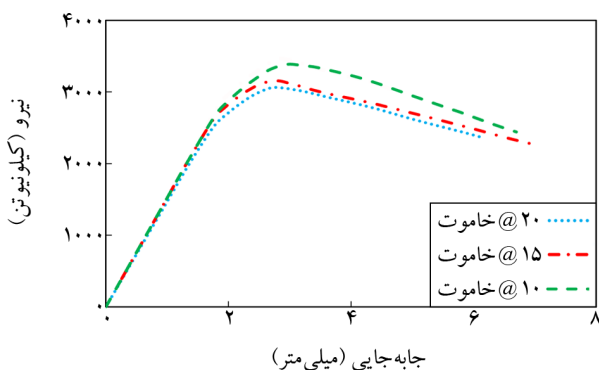
مطابق شکل (۷)، می‌توان دریافت که در شاخه صعودی منحنی بار-جاب‌جایی سختی ستون‌ها در ابتدای شاخه صعودی تا بار ۲۶۰۰ کیلو نیوتن تقریباً یکسان است و از آن نقطه به بعد تا رسیدن به نقطه حداکثر مقاومت سختی ستون با خاموت کاهش

در شکل‌های (۶) تا (۸) محدوده‌ی تغییرات برای دو حالت مورد بررسی به‌وضوح قابل مشاهده است. در سایر نمونه‌ها نیز اختلاف تنش تقریباً به همین میزان می‌باشد. مطابق شکل (۶) در شاخه صعودی منحنی بار-جاب‌جایی سختی ستون‌ها در ابتدای شاخه صعودی تا بار ۲۸۰۰ کیلو نیوتن تقریباً یکسان است و از آن نقطه به بعد تا رسیدن به نقطه اوج نیرو، مقاومت سختی ستون با خاموت کاهش پیدا کرده و در نهایت ستون با دورپیچ در شرایط یکسان ظرفیت باربری بیشتری را به خود اختصاص داده

در شکل (۸)، مشابه سایر حالت‌ها، در شاخه صعودی منحنی بار-جاب‌جایی، سختی ستون‌ها در ابتدای شاخه صعودی تا بار ۲۳۰۰ کیلو نیوتن تقریباً یکسان است و از آن نقطه به بعد تا رسیدن به نقطه پیک مقاومت سختی ستون با خاموت کاهش پیدا کرده و در نهایت ستون با دورپیچ در شرایط یکسان بار بیشتری را تحمل می‌کند. حداکثر بار ستون با دورپیچ و خاموت به ترتیب برابر با ۳۴۶۰ کیلو نیوتن و ۳۰۵۶ کیلو نیوتن می‌باشد، در نتیجه در حالتی که فواصل خاموت‌ها ۲۰ سانتی‌متر باشد ظرفیت ستون با دورپیچ ۱۱ درصد بیشتر از ستون با خاموت است.

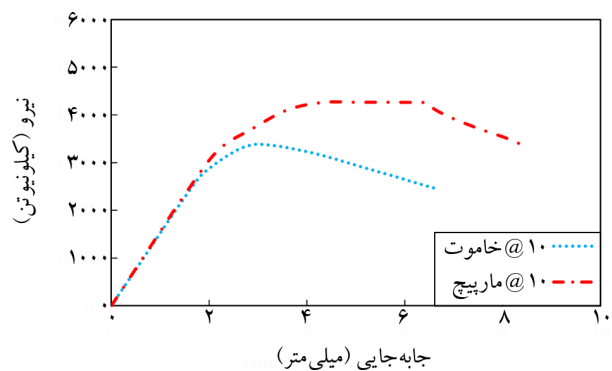
با مقایسه سه حالت فوق مشاهده می‌شود زمانی که فواصل خاموت‌ها زیاد می‌شود از ظرفیت ستون کاسته می‌شود. همچنین ملاحظه گردید در هر سه حالت ستون محصور با دورپیچ عملکرد بهتری داشته و ظرفیت بیشتری نسبت به ستون با خاموت دارد. همچنین با توجه به نتایج می‌توان دریافت با افزایش فاصله خاموت‌ها اختلاف ظرفیت ستون در دو حالت خاموت‌گذاری شده و دورپیچ کم می‌شود. در شکل‌های (۹) و (۱۰) ظرفیت ستون‌ها به ترتیب در دو حالت محصور شده با خاموت و محصور شده با دورپیچ با یکدیگر مقایسه شده است.

همچنین شکل (۹) بیانگر آن است که با افزایش فاصله خاموت‌ها، در شاخه‌ی عمودی نمودار منحنی بار-جاب‌جایی، سختی ستون‌ها در ابتدای شاخه صعودی تا بار ۲۵۰۰ کیلو نیوتن تقریباً یکسان است و از این نقطه به بعد تا رسیدن به نقطه حداکثر مقاومت، با افزایش فاصله خاموت‌ها سختی کاهش می‌یابد. در ناحیه پس از نقطه ماکزیم نمودار، رفتار نرم‌شوندگی ستون با

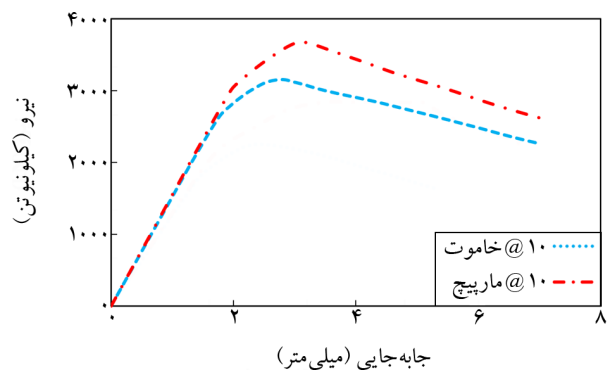


شکل (۹): مقایسه‌ی منحنی نیرو-جاب‌جایی برای ستون‌های دارای خاموت.

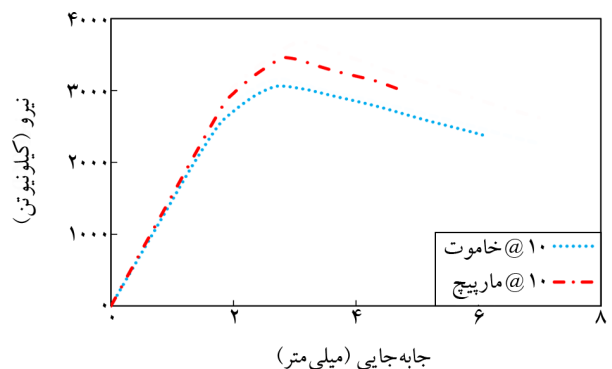
پیدا کرده و در نهایت ستون با دورپیچ در شرایط یکسان بار بیشتری را تحمل می‌کند. حداکثر بار ستون با دورپیچ و خاموت به ترتیب برابر با ۳۶۸۰ کیلو نیوتن و ۳۱۶۰ کیلو نیوتن می‌باشد که بیانگر این می‌باشد که در حالتی که فواصل خاموت‌ها ۱۵ سانتی‌متر باشد ظرفیت ستون با دورپیچ ۱۴ درصد بیشتر از ستون با خاموت است.



شکل (۶): نمودار نیرو بر حسب جاب‌جایی برای ستون با فاصله خاموت ۱۰ سانتی‌متر و تنش تسلیم میلگرد‌ها ۲۸۰ مگاپاسکال.



شکل (۷): نمودار نیرو بر حسب جاب‌جایی برای ستون با فاصله خاموت ۱۵ سانتی‌متر و تنش تسلیم میلگرد‌ها ۲۸۰ مگاپاسکال.



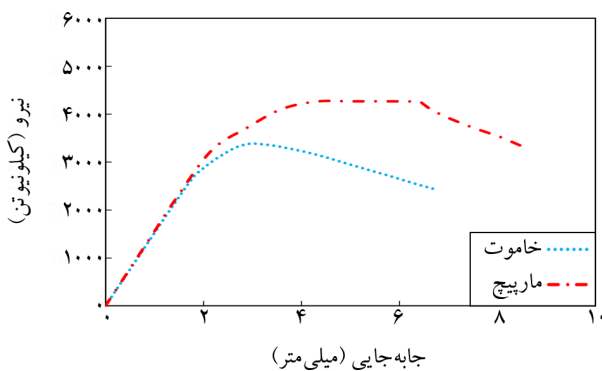
شکل (۸): نمودار نیرو بر حسب جاب‌جایی برای ستون با فاصله خاموت ۲۰ سانتی‌متر و تنش تسلیم میلگرد‌ها ۲۸۰ مگاپاسکال.

می‌دهند با بزرگ‌تر شدن ابعاد ستون ظرفیت ستون افزایش می‌یابد، ستون تنش بیشتری را تحمل کرده و خرابی کمتری در آن رخ می‌دهد. در همه نمونه‌ها مشاهده می‌شود که با افزایش مقطع ستون، تنش در بتن و آرماتورها کاهش خواهند یافت.

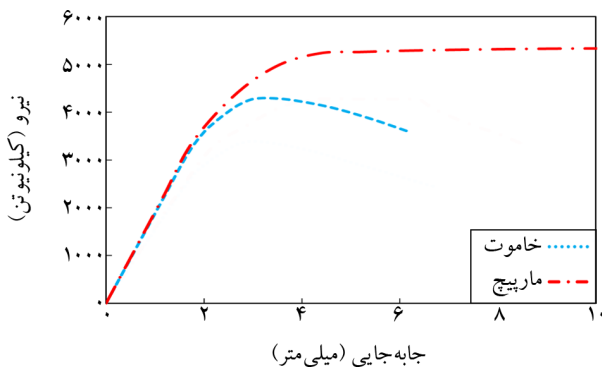
به‌وضوح در جدول (۳) ملاحظه می‌شود با افزایش ابعاد ستون بیشترین اختلاف تنش در بتن ستون‌ها به وجود آمده است، همچنین با توجه به جدول مشاهده می‌شود با افزایش ابعاد ستون تنش وارده کاهش یافته است و در نتیجه می‌توان گفت خرابی در ستون نیز کاهش خواهد یافت. در شکل‌های (۱۱) تا (۱۳) جزئیات روند بارگذاری و جابه‌جایی ستون‌ها شرح داده شده است.

جدول (۳): تنش در بتن و میلگردها.

ابعاد نمونه	تنش در بتن (مگاپاسکال)	اختلاف تنش در بتن (درصد)	تنش در آرماتورها (مگاپاسکال)	اختلاف تنش در آرماتورها (درصد)
۴۰×۴۰	۲۸/۳	-	۲۸۶	-
۴۵×۴۵	۱۲/۳	۵۶/۵۴	۲۶۳	۸/۰۴
۵۰×۵۰	۱۱	۶۱/۱۳	۲۵۷/۱	۱۰/۱

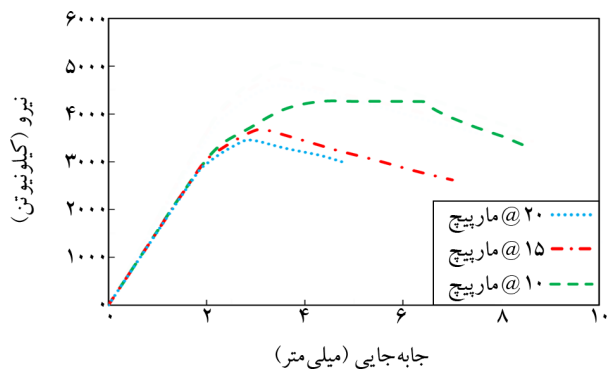


شکل (۱۱): منحنی بار-جابه‌جایی برای ستون با ابعاد ۴۰ در ۴۰ سانتی‌متر.



شکل (۱۲): منحنی بار-جابه‌جایی ستون با ابعاد ۴۵ در ۴۵ سانتی‌متر.

افزایش فاصله خاموت‌ها افزایش می‌یابد. همچنین شکل (۱۰) نیز نتایج مشابهی را نشان می‌دهد، با این تفاوت که در قسمت شاخه عمودی نمودار سختی ستون‌ها تا بار ۳۰۰۰ کیلو نیوتن یکسان است. جدول (۲) تغییرات در ظرفیت ستون‌های محصور شده با خاموت و دورپیچ در فواصل مختلف را نشان می‌دهد.



شکل (۱۰): مقایسه منحنی نیرو-جابه‌جایی برای ستون‌های دارای دورپیچ.

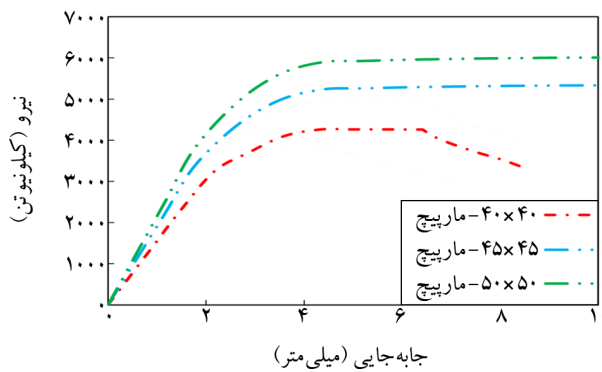
جدول (۲): تفاوت در ظرفیت ستون‌های محصور شده با خاموت و دورپیچ.

فواصل آرماتورهای عرضی (سانتی‌متر)	ستون با خاموت (کیلو نیوتن)	اختلاف در ظرفیت ستون با خاموت (درصد)	دورپیچ (کیلو نیوتن)	اختلاف در ظرفیت ستون با دورپیچ (درصد)
۱۰	۳۳۸۴	-	۴۲۶۵	-
۱۵	۳۱۶۰	۶/۶۲	۳۶۸۰	۱۳/۷۲
۲۰	۳۰۵۶	۹/۶۹	۳۴۶۰	۱۸/۸۷

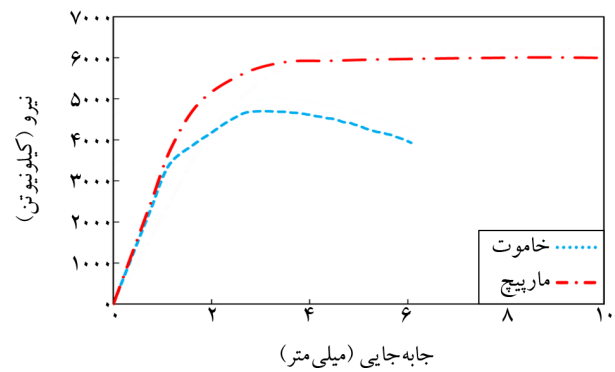
همان‌طور که در جدول (۲) مشاهده می‌شود، اختلاف ظرفیت بین ستون با گام ۱۰ تا ۲۰ سانتی‌متر نزدیک به ۱۹ درصد می‌باشد درحالی‌که برای ستون محصور شده با خاموت، اختلاف ظرفیت برای ستون با خاموت به فواصل ۱۰ و ۲۰ نزدیک به ۱۰ درصد می‌باشد؛ این موضوع بیانگر آن است که با افزایش گام دورپیچ‌ها ظرفیت ستون کاهش بیشتری دارد.

۶-۲- تغییر در ابعاد سطح مقطع ستون

در این بخش تنش تسلیم آرماتورها برابر با ۲۸۰ مگاپاسکال و فواصل آرماتورهای عرضی ۱۰ سانتی‌متر فرض شده است. پارامتر متغیر ابعاد مقطع ستون می‌باشد که در سه حالت ۴۰×۴۰، ۴۵×۴۵ و ۵۰×۵۰ مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج نشان



شکل (۱۵): منحنی بار - جابه‌جایی برای ستون محصور شده با دورپیچ و ابعاد سطح مقطع مختلف.



شکل (۱۳): منحنی بار - جابه‌جایی ستون با ابعاد ۵۰ در ۵۰ سانتی‌متر.

۴۵ سانتی‌متر به ۵۰ سانتی‌متر چندان ظرفیت ستون را افزایش نداده و نسبت به افزایش ابعاد مقطع از ۴۰ به ۴۵ سانتی‌متر این افزایش، کم‌تر می‌باشد. این موضوع نشان می‌دهد که با افزایش ابعاد قطعه بتنی و ثابت نگه داشتن میزان میلگردها ظرفیت ستون تا محدوده خاصی افزایش می‌یابد ولی بعد از آن تغییر چندانی در ظرفیت ستون حاصل نمی‌شود.

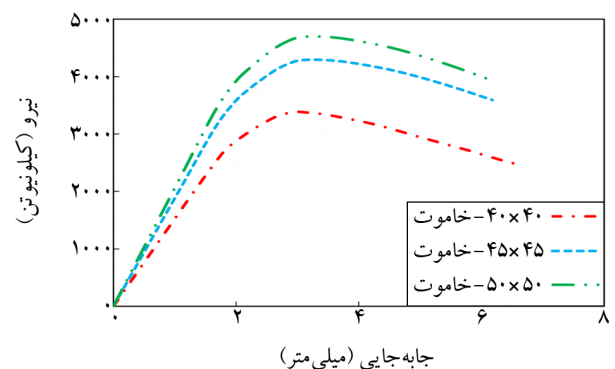
۶-۳- تغییر در تنش تسلیم آرماتورهای عرضی

در این بخش فاصله آرماتورهای عرضی برابر با ۱۰ سانتی‌متر و ابعاد مقطع ۴۰ سانتی‌متر فرض شده است و تنش تسلیم میلگردها به‌عنوان متغیر مورد مطالعه قرار گرفته است. با افزایش تنش تسلیم فولاد، تنش در مقطع بتنی کاهش می‌یابد و سهم فولاد در تحمل تنش در بتن افزایش یافته است. در ستونی که تنش تسلیم آن ۲۸۰ مگاپاسکال در نظر گرفته شده است میلگردها تحت اثر بار وارده به تنش تسلیم خود دست یافته‌اند؛ درحالی‌که در ستون با تنش تسلیم ۴۰۰ مگاپاسکال میلگردها در آستانه تسلیم قرار گرفته است و تنش در بتن نیز کاهش یافته است. در جدول (۵) به‌وضوح می‌توان تأثیر افزایش تنش تسلیم فولاد بر روی قطعه بتنی ستون را مشاهده نمود. همان‌طور که در جدول (۵) مشاهده می‌شود، هنگامی که تنش تسلیم میلگردها از ۲۸۰ به ۴۰۰ مگاپاسکال افزایش می‌یابد تنش در قطعه بتنی ۲/۵ درصد کاهش می‌یابد، همچنین وقتی تنش تسلیم فولاد از ۲۸۰ به ۶۳۶ مگاپاسکال افزایش می‌یابد ۴۷ درصد تنش در قطعه بتنی ستون مسلح کاهش

جدول (۴)، ظرفیت باربری و میزان تغییرات در ظرفیت باربری ستون‌های محصور شده با دورپیچ و خاموت نشان داده شده است. اختلاف ظرفیت ستون‌ها با وجود متفاوت بودن ابعاد مقطع تقریباً یکسان است. با توجه به این مطلب می‌توان دریافت که با افزایش ابعاد مقطع ظرفیت ستون افزایش می‌یابد و همچنان در این حالت نیز ستون با خاموت دورپیچ عملکرد بهتری نسبت به ستون با خاموت معمولی دارد. شکل‌های (۱۴) و (۱۵) جدای از بیان این مسئله که با افزایش ابعاد مقطع، ظرفیت ستون افزایش می‌یابد این موضوع را نیز نشان می‌دهد که افزایش ابعاد مقطع از

جدول (۴): ظرفیت باربری ستون‌ها.

ابعاد نمونه‌ها	خاموت (نیوتن)	دورپیچ (نیوتن)	اختلاف (درصد)
۴۰×۴۰	۳۳۸۴۰۳۰	۴۲۶۵۸۵۰	۲۰/۶۷
۴۵×۴۵	۴۲۹۳۰۲۰	۵۳۳۳۴۰۰	۱۹/۵۱
۵۰×۵۰	۴۶۹۵۴۱۹	۶۰۰۷۲۳۲	۲۱/۸۴



شکل (۱۴): منحنی بار - جابه‌جایی برای ستون محصور شده با خاموت و ابعاد مختلف سطح مقطع.

دو حالت به یکدیگر نزدیک تر شده است و رفتار نسبتاً مشابهی را از خود نشان می‌دهند، همچنین اختلاف ظرفیت آنها نیز بسیار کمتر می‌شود. همچنین شکل پذیری نیز کاهش می‌یابد.

۴. افزایش گام دورپیچ‌ها نسبت به افزایش فاصله خاموت‌ها تأثیر بیشتری بر روی ظرفیت ستون دارد. با افزایش فاصله دورپیچ‌ها، ظرفیت ستون محصور شده با دورپیچ به شدت کاهش می‌یابد با این حال در این شرایط نیز ستون محصور شده با دورپیچ عملکرد بهتری نسبت به ستون محصور شده با خاموت دارد.

۵. نتایج نشان می‌دهد با افزایش ابعاد مقطع ستون، میلگردها تنش کمتری را تحمل کرده و ظرفیت ستون نیز افزایش می‌یابد. همچنین با ثابت نگه داشتن مقدار میلگردها و افزایش ابعاد مقطع تا اندازه مشخصی باعث افزایش ظرفیت شده و بعد از آن افزایش ابعاد بدون افزایش مقدار میلگرد تأثیر چندانی بر روی ظرفیت ستون ندارد.

۶. نتایج بیانگر آن است که با افزایش تنش تسلیم میلگردها، ظرفیت ستون افزایش یافته است. افزایش مقاومت میلگردها باعث می‌شود تنش در بتن کاهش یابد، در نتیجه آسیب‌های کمتری در آن حاصل خواهد شد.

مراجع

- Liang, C.-Y., Chen, C.-C., Weng, C.-C., Yin, SY.-L., and Wang, J.-C. (2014) Axial compressive behavior of square composite columns confined by multiple spirals. *J. Constr. Steel Res.*, **103**, 230-40, doi:10.1016/j.jcsr.2014.09.006.
- Azimi, M., Adnan, A., Bin Tahir M.M., Sam, ARBM., and Razak, SMBSA. (2015) Seismic performance of ductility classes medium RC beam-column connections with continuous rectangular spiral transverse reinforcements. *Lat. Am. J. Solids Struct.*, **12**, 787-807.
- Shih, T.-H., Chen, C.-C., Weng, C.-C., Yin, SY.-L., and Wang, J.-C. (2013) Axial strength and ductility of square composite columns with two interlocking spirals. *J. Constr. Steel Res.*, **90**, 184-92,

می‌یابد و این بیانگر اهمیت مقاومت تسلیم میلگردها و تأثیر آن بر روی بتن است.

جدول (۵): تنش وارد بر قطعه بتنی ستون در نمونه ستون مسلح با تنش تسلیم‌های متفاوت میلگرد.

تنش تسلیم (مگاپاسکال)	تنش وارد (مگاپاسکال)	کاهش تنش وارد در بتن (درصد)
۲۸۰	۲۸/۶	-
۴۰۰	۲۷/۹	۲/۵
۶۳۶	۱۴/۷	۴۸

۷- نتیجه‌گیری

آرماتورهای عرضی و محصورشدگی یکی از پارامترهای مهم در عملکرد ایده آل ستون‌ها می‌باشد. از این رو در مقاله‌ی حاضر به بررسی و مقایسه‌ی عملکرد آرماتورهای عرضی در دو حالت با دورپیچ (فتری شکل) و خاموت (آرماتورهای عرضی متداول) در ستون‌های بتن آرمه پرداخته شده است. در همین راستا با تحقیق صورت گرفته اثر تغییر در پارامترهای مختلف ستون نظیر تنش تسلیم آرماتورها، فواصل آرماتورهای عرضی و تغییر در ابعاد مقطع مورد مطالعه قرار گرفته است. در این مطالعه از روش تحلیل اجزای محدود استفاده شده است.

۱. نتایج نشان داده است که ظرفیت و شکل‌پذیری ستون محصور شده با خاموت دورپیچ نسبت به ستون محصور شده با خاموت معمولی بیشتر است، همچنین در ستون محصور شده با دورپیچ، ستون بعد از بارگذاری، تنش کمتری تحمل کرده در نتیجه می‌توان گفت خرابی کمتری در این ستون حاصل خواهد شد.

۲. در منحنی‌های بار-جابجایی رسم شده برای ستون، در ابتدای شاخه عمودی تا بار مشخصی رفتار ستون‌ها یکسان است. بعد از آن تا رسیدن به نقطه اوج با افزایش فاصله خاموت‌ها سختی کاهش می‌یابد و در ناحیه پس از نقطه اوج، رفتار نرم‌شوندگی با افزایش فاصله خاموت‌ها، افزایش می‌یابد.

۳. با افزایش فاصله خاموت‌ها و گام دورپیچ‌ها، رفتار ستون‌ها در

14. Seręga, S. (2015) Effect of transverse reinforcement spacing on fire resistance of high strength concrete columns. *Fire Safety Journal*, **71**, 150-61, doi:10.1016/j.firesaf.2014.11.017.
15. Mas, B., Cladera, A., and Ribas, C. (2016) Experimental study on concrete beams reinforced with pseudoelastic Ni-Ti continuous rectangular spiral reinforcement failing in shear. *Eng. Struct.*, **127**, 759-68, doi:10.1016/j.engstruct.2016.09.022.
16. Saha, P. and Meesaraganda, L.V. (2019) Experimental investigation of reinforced SCC beam-column joint with rectangular spiral reinforcement under cyclic loading. *Constr. Build Mater.*, **201**, 171-85, doi:10.1016/j.conbuildmat.2018.12.192.
17. Azimi, M., Campos, U.A., Matthews, J.C., Lu, H., Tehrani, F.M., Sun, S., et al. (2020) Experimental and numerical study of cyclic performance of reinforced concrete exterior connections with rectangular-spiral reinforcement. *J. Struct. Eng.*, **146**, 04019219, doi:10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0002506.
18. Kheyroddin, A., Khatami, M., and Sharifi, M. (2014) Investigation of the performance of rectangular and polygonal continuous stirrups in reinforced concrete columns. *Third Natl. Conf. New Mater. Struct. Civ. Eng.*, Semnan, Semnan Univ.
19. Haji, M., Naderpour, H., and Kheyroddin, A. (2018) Strengthening of Reinforced Concrete Bridge Columns with FRP, Using Wrapping, Near-surface Mounted and Combined Methods. *J. Transp. Infrastruct. Eng.*, **3**, 33-48.
20. Naderpour, H., Nagai, K., Fakharian, P., and Haji, M. (2019) Innovative models for prediction of compressive strength of FRP-confined circular reinforced concrete columns using soft computing methods. *Compos. Struct.*, **215**, 69-84, doi:10.1016/j.compstruct.2019.02.048.
21. Otsuka, H., Takeshita, E., Yabuki, W., Wang, Y., Yoshimura, T., and Tsunomoto, M. (2004) Study on the seismic performance of reinforced concrete columns subjected to torsional moment, bending moment and axial force. *13th World Conf. Earthq. Eng.*
22. ACI committee 318 (2011) *Building Code Requirements for Structural Concrete and* doi:10.1016/j.jcsr.2013.07.021.
4. Vanagas, E., Kliukas, R., and Lukoševičienė, O. (2017) Strength of Circular Concrete Columns Reinforced with FRP Bars and Spirals. *Procedia Eng.*, **172**, 1220-1226, doi:10.1016/j.proeng.2017.02.143.
5. Saatcioglu, M. and Razvi, S.R. (1992) Strength and Ductility of Confined Concrete. *J. Struct. Eng.*, **118**, 1590-607, doi:10.1061/(ASCE)0733-9445(1992)118:6(1590).
6. Sheikh, S.A. and Toklucu, M.T. (1993) Reinforced concrete columns confined by circular spirals and hoops. *ACI Struct. J.*, **90**, 542.
7. Tsitotas, M.A. and Tegos, L.A. (1970) Seismic behaviour of R/C columns and beams with interlocking spirals. *WIT Trans. Built. Environ.*, **23**.
8. Li, Q. and Belarbi, A. (2011) Seismic Behavior of RC Columns with Interlocking Spirals under Combined Loadings Including Torsion. *Procedia Eng.*, **14**, 1281-1291, doi:10.1016/j.proeng.2011.07.161.
9. Belarbi, A., Prakash, S., and You, Y.-M. (2009) Effect of spiral reinforcement on flexural-shear-torsional seismic behavior of reinforced concrete circular bridge columns. *Struct. Eng. Mech.*, **33**, 137-58.
10. Prakash, S., Belarbi, A., and You, Y.-M. (2010) Seismic performance of circular RC columns subjected to axial force, bending, and torsion with low and moderate shear. *Eng. Struct.*, **32**, 46-59, doi:10.1016/j.engstruct.2009.08.014.
11. Mizugami, Y. (2000) Efficiency of lateral reinforcement in interlocking spirals rebar. *16th US-Japan Bridg Eng. Workshop*, 265-76.
12. Karayannis, C.G. and Chalioris, C.E. (2013) Shear tests of reinforced concrete beams with continuous rectangular spiral reinforcement. *Constr. Build Mater.*, **46**, 86-97, doi:10.1016/j.conbuildmat.2013.04.023.
13. Eom, T.-S., Kang, S.-M., Park, H.-G., Choi, T.-W., and Jin, J.-M. (2014) Cyclic loading test for reinforced concrete columns with continuous rectangular and polygonal hoops. *Eng. Struct.*, **67**, 39-49, doi:10.1016/j.engstruct.2014.02.023.

Commentary. ACI 318-11.

23. Richart, F.E., Brandtæg, A., and Brown, R.L. (1929) *Failure of Plain and Spirally Reinforced Concrete in Compression*. University of Illinois at Urbana Champaign, College of Engineering. Engineering Experiment Station.
24. *Dassault Systemes Simulia Corp.* (2012) *Abaqus Theory Manual, Version 6.12*. Providence, RI, USA. n.d.
25. Habibpour, M. and Farahbod, F. (2016) Strengthening of RC columns using multi directional FRP composites. *Semi-Annually Journal of Concrete Research*, **8**(2), 101-115 (in Persian).

A Numerical Investigation on the Behavior of RC Columns with Spiral Stirrups

Amir Kasary¹ and Ashkan KhodaBandehLou^{2*}

1. M.Sc. Student of Structure, Department of Civil Engineering, Urmia Branch, Islamic Azad University, Urmia, Iran
2. Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Urmia Branch, Islamic Azad University, Urmia, Iran,
*Corresponding Author, email: a.khodabandehlou@iaurmia.ac.ir

In recent years, the use of helical screws in reinforced concrete components has been developed. Practical results of these experiments have shown that spiral reinforcement (SR) has improved seismic performance compared to other conventional methods. Experience has shown that by applying torsion in concrete members, due to the principal tensile stresses in the diameter of each element, the member elements of torsional structures with spiral patterns will expand. Due to the design of the expansion of torsional cracks in the cross-section, these cracks are relatively ideally perpendicular to the cross-section of the torsion reinforcement. The research results so far clearly show that the use of rectangular helical bolts increases the bearing capacity. Also, in this method, with a constant ratio of transverse reinforcement, the ductility condition is improved compared to conventional bends in workshops. Finally, the use of helical reinforcement in structural members increases the shear, flexural and axial strength. Commonly used braces require two end hooks to support the anchor. For the length of these two hooks, a large amount of steel material is needed for each closing brace, which increases the weight and price of the steel. This process is not required, and this type of reinforcement reduces the weight of the steel and saves money due to the reduction of steel consumption compared to conventional braces. The effect of SR on the formation of cracks and the member's behaviour after cracks has also been tested.

According to the researches, it is observed that so far, the effect of continuous closures as well as the effect of changing different parameters in the enclosure in columns with a square cross-section with continuous rebars has not been done. Regarding the confinement of concrete members with reinforcement, considering the cases mentioned about the importance and role of transverse struts in the performance of structural components, the purpose of this study is to investigate the performance of helical reinforcement in comparison with conventional transverse reinforcements in square reinforced concrete columns. Also, the effect of changing various parameters such as yield stress of reinforcements (high-strength steel with normal strength), cross-section reinforcement and cross-sectional column dimensions on behavioral performance, including load-bearing capacity and ductility, in columns with this type of arch and analysis. In this study, the finite element analysis method has been used. The results show that the capacity and ductility of the column enclosed by the winding is higher than that of the column retained by the conventional tension. Also, in the column held by the twist, the column withstands less stress after loading, so it can be said less damage in this column will be obtained. In the load-displacement curves drawn for the column, at the beginning of the vertical branch up to a certain load, the behaviour of the columns is the same. Until the peak is reached, the stiffness decreases with increasing stiffness, and in the area after the apex, the softening behaviour increase. As the spacing of the bolts and the pitch of the windings increases, the behaviour of the columns in the two modes becomes closer to each other. It shows a relatively similar behaviour, and the difference in their capacity also becomes much smaller. Ductility is also reduced. Increasing the pitch of the windings has a greater effect on the capacity of the column than increasing the distance of the windings. By increasing the distance of the turns, the capacity of the column enclosed by the tortoise decreases sharply. However, in these conditions, the column enclosed by the tortoise performs better than the column enclosed by the arch. The results show that by increasing the cross-sectional dimensions of the column, the rebars withstand less stress, and the column capacity also increases. Also, keeping the number of rebars constant and increasing the cross-sectional dimensions to a certain extent increases the capacity, and then increasing the dimensions without increasing the number of rebars does not

have much effect on the column capacity. The results show that with the increasing yield stress of the rebars, the capacity of the column has increased. Increasing the strength of the rebars reduces the stress in the concrete, resulting in less damage.

Keywords: Column, Spiral Stirrups, Confinement, Nonlinear Analysis, Ductility, Loading Capacity.