

مطالعه‌ی پارامتریک عوامل مؤثر در ظرفیت باربری ستون‌های بتنی مسلح شده با فولاد (SRC) تحت بار خارج از مرکز

محسن احمدی (دانشجوی دکتری)

مرتضی نقی پور* (استاد)

دانشکده‌ی مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل

مهدی نعمت زاده (دانشیار)

دانشکده‌ی مهندسی عمران، دانشگاه مازندران، بابلسر

مهندسی عمران شریف، پاییز ۱۳۹۹ (۱۳۹۹)
دوری ۲ - ۳۶، شماره ۲/۳، ص. ۱۷-۳

ستون‌های بتنی مسلح شده با فولاد (SRC) نوعی از ستون‌های مرکب هستند که به دلیل مزایای فراوانی که نسبت به ستون‌های بتن‌آرمه و ستون‌های فقط فولادی دارند، استفاده از آن‌ها رواج زیادی پیدا کرده است. در پژوهش حاضر، جهت بررسی برخی از عوامل مؤثر در ظرفیت باربری ستون‌های بتنی مسلح شده با فولاد (SRC) تحت بار خارج از مرکز، یک مطالعه‌ی عددی با نرم‌افزار آباکوس انجام و مدل المان محدود ایجاد شده و با نتایج آزمایشگاهی اعتبارسنجی شده است. در مجموع ۳۹ ستون برای مطالعه‌ی پارامتریک تحلیل شدند که متغیرهای هندسی و مصالح از قبیل: درصد فولاد، نسبت لاغری ستون، نسبت خروج از مرکزیت نیرو، مقاومت فشاری بتن و فاصله‌ی میله‌گردهای عرضی در ظرفیت باربری ستون‌ها بررسی شدند و براساس مقادیر محاسبه شده، نمودارهای نیرو- تغییرمکان محوری، نیرو- تغییرمکان جانبی، و نیرو- لنگر خمشی ترسیم شدند، به طوری که با افزایش درصد فولاد و کاهش فاصله بین میله‌گردهای عرضی، شاخص شکل‌پذیری افزایش یافته است، اما با کاهش فاصله بین میله‌گردهای عرضی، ظرفیت باربری ستون به صورت جزئی افزایش یافته است.

macivil2009@yahoo.com
m-naghi@nit.ac.ir
m.nematzadeh@umz.ac.ir

واژگان کلیدی: ستون مرکب، SRC، ظرفیت باربری، بار خارج از مرکز.

۱. مقدمه

مطالعات گسترده‌ی بر روی ستون‌های مرکب صورت پذیرفته است. به‌عنوان نمونه، می‌توان به تحقیقات چن و همکاران (۲۰۰۵)، اشاره کرد.^[۱] ایشان یک مدل تحلیلی برای پیش‌بینی ظرفیت محوری ستون‌های مرکب SRC^۱ که هسته‌ی فولادی آن‌ها در شکل‌های متفاوتی است، ارائه دادند. در مدل تحلیلی مذکور، برای آرماتورهای طولی و مقطع فولادی رفتار تنش- کرنش جداگانه‌ی در نظر گرفته شد. در مدل‌سازی عددی انجام شده توسط نرم‌افزار آباکوس^۲، از رابطه‌های ماندنر^۳،^[۲] برای لحاظ کردن اثر محصورشدگی استفاده شد و دریافتند که اعمال اثر محصورشدگی، باعث افزایش ظرفیت باربری ستون مرکب می‌شود، که شکل مقطع فولادی و نحوه‌ی قرارگیری آرماتورها در آن مؤثر است. همچنین نتایج نشان داد که چنانچه مقطع I شکل کوتاه‌تر باشد، اثر محصورشدگی آن بیشتر است. با بررسی ستون‌های کوتاه SRC توسط ژائو و همکاران (۲۰۱۰)،^[۴] آزمایش بر روی ۸ نمونه که در معرض بار فشاری و بار جانبی رفت و برگشتی قرار داشتند، انجام شد که ۳ نمونه‌ی آن پروفیل دایره‌ی SRC و ۳ نمونه‌ی آن، پروفیل فولادی قوطی SRC و ۲ نمونه‌ی ستون SRC مشترک به جهت مقایسه بودند. نتایج آزمایش‌ها نشان داد که مقاومت برشی، ظرفیت

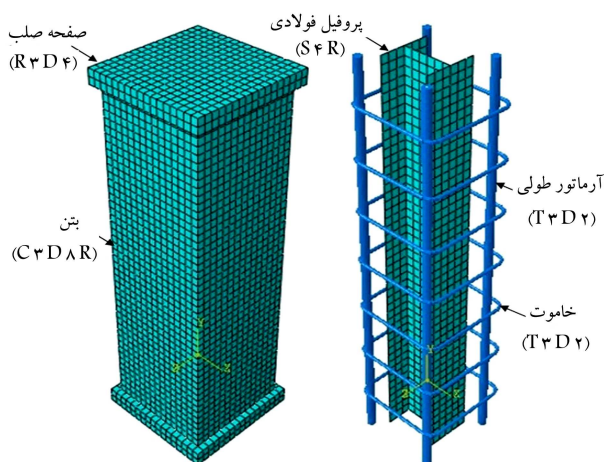
ستون‌های مرکب از لحاظ محل قرارگیری بتن و فولاد به دو گروه کلی تقسیم‌بندی می‌شوند: ۱. جدار فولادی پُر شده با بتن، ستون‌هایی هستند که هر دو مزایای فولاد و بتن را دارند. ستون‌های مرکب، شامل مقطع فولادی توخالی دایره، مستطیل یا چندضلعی هستند که با بتن پُر می‌شوند و ۲. مقاطع فولادی مدفون در بتن که در آن‌ها، مقطع فولادی توسط بتن مسلح محصور شده است. به عبارت دیگر، مقطع ذکر شده شامل مقطع فولادی نورد شده یا مرکب است، که در داخل بتن مدفون شده است.

استفاده از ستون‌های مرکب به دلیل مزایای فراوان سازه‌ی و اقتصادی که نسبت به حالت ستون‌های بتن‌آرمه و یا فقط فولادی دارند و همچنین نیاز مداوم به بهینه‌سازی مصالح و کاهش ابعاد و اندازه‌ی موردنیاز در سیستم‌های سازه‌ی خصوصاً در ساختمان‌های بلند، رواج زیادی پیدا کرده است. در سال‌های اخیر،

* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۳۹۸/۱۲/۲۰، اصلاحیه ۱۳۹۸/۵/۲۲، پذیرش ۱۳۹۸/۶/۳۰

DOI:10.24200/J30.2019.52836.2510



شکل ۱. مدل اجزاء محدود نمونه‌ها.

میان صفحه‌ی خود استفاده می‌کند. بتن با استفاده از المان C3DAR که یک المان محیط پیوسته‌ی سه‌بعدی شامل ۸ گره انتگرالی کاهش یافته با سه درجه آزادی انتقالی در هر گره است، مدل‌سازی صورت گرفته و برای میدگردهای طولی و عرضی از المان سه‌بعدی دو گره‌ی T3D2 استفاده شده است. برای اطمینان از چسبندگی کافی بین بتن و آرماتورها و پروفیل فولادی، بخش‌های فولادی ستون به‌عنوان بخش مدفون شده در بلوک بتنی تعریف شدند. همچنین در قسمت فوقانی و تحتانی نمونه، دو صفحه‌ی صلب فولادی قرار داده شدند که توسط المان R3D4 تعریف و بر روی سطح بتن به روش چسب^۴ متصل شدند و بر روی آن یک نقطه‌ی مرجع معرفی شده است که فاصله‌ی آن تا مرکز ستون بیانگر مقدار برون‌محوری بار اعمالی است که شرایط مرزی مفصلی در قسمت تحتانی بر روی نقطه‌ی مرجع با مقید کردن درجه‌های آزادی انتقالی در ۳ راستا اعمال شده است. یک آنالیز حساسیت بر روی مدل المان محدود به منظور بهینه‌سازی اندازه‌ی مش در راستای کسب رفتار دقیق ستون SRC با کمترین زمان تحلیل صورت گرفت که المان‌های اختصاص یافته برای مصالح و فرم کلی مدل عددی در شکل ۱ مشاهده می‌شود. مدل خسارت خمیری برای مصالح بتن استفاده شد که دو اصل اساسی ترک‌خوردگی کششی و خردشدگی فشاری را در مکانیزم گسیختگی در نظر می‌گیرد. همچنین $E_C = 4730 \sqrt{f'_c}$ بر طبق دستورالعمل ۱۱-ACI318^[۸] و $\nu = 0.15$ برای بتن لحاظ می‌شود که در آن f'_c مقاومت فشاری نمونه‌ی استوانه‌ی بر حسب مگاپاسکال است. از ورق‌های فولادی با تنش تسلیم ۳۵۰ مگاپاسکال استفاده شده و مدول کشسانی و کرنش تسلیم به ترتیب برابر با ۲۰۰ گیگاپاسکال و ۰.۱۷۵ بوده است. تنش نهایی ورق‌های فولادی برابر با ۴۵۰ مگاپاسکال و کرنش متناظر با آن تقریباً ۱۰۰ برابر کرنش تسلیم (۰.۱۷۵) است. از مدل رفتاری سه‌خطی برای شبیه‌سازی رفتار فولاد در برنامه‌ی المان محدود آباکوس استفاده شده است. همچنین نسبت پواسون فولاد برابر با ۰.۳ لحاظ شده است. برای تعریف منحنی تنش - کرنش بتن فشاری برای تحلیل‌های المان محدود ستون‌های موردنظر، از روابط ارائه شده‌ی لی و بار^[۹] استفاده شده است. ایشان از یک مدل رفتار ساده با استفاده از یک تابع پیوسته که از جمع دو تابع نمایی تشکیل می‌شود، مطابق رابطه‌ی ۱ استفاده کرده‌اند:

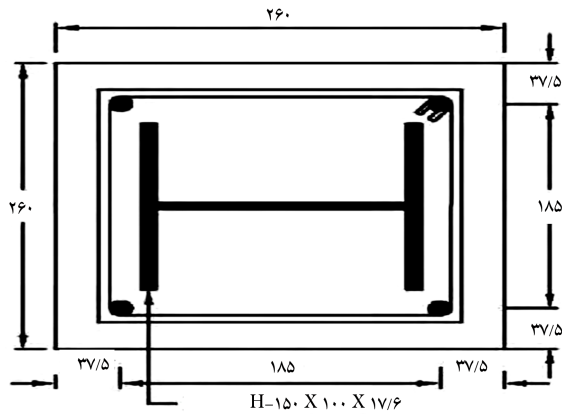
$$f_c(x) = C_1 \left(e^{-C_2 x} - e^{-C_3 x} \right) \quad (1)$$

که در آن، C_1 ، C_2 و C_3 ثابت‌های کنترل شکل منحنی تنش - کرنش هستند و از

تغییر شکل خمیری و شاخص شکل‌پذیری ستون‌های دایره‌ی بسیار بزرگ‌تر از دیگر ستون‌ها در یک نسبت فولاد و بار فشاری است. مطالعه‌ی نیز به صورت آزمایشگاهی توسط سولیمان و همکاران (۲۰۱۳)^[۴]، به جهت بررسی روش‌های موجود در آیین‌نامه‌ها برای ارزیابی رفتار بار نهایی ستون‌های کوتاه SRC انجام و وضعیت موجود مقررات طراحی آیین‌نامه‌های ECP2007، ECP-SC-LRFD-2012، BS-ACI-318-2008 و AISC-LRFD-2010 بررسی شدند. ۱۰ نمونه‌ی آزمایشگاهی به جهت مطالعه‌ی اثر محصورشدگی بتن و انواع مختلف مقاطع فولادی مطالعه و مقادیر اندازه‌گیری شده با مقادیر محاسبه شده توسط آیین‌نامه‌ها مقایسه شدند، که در بین آیین‌نامه‌های مورد استفاده ECP-SC-LRFD-2012 منجر به نتایج محافظه‌کارانه‌تری شده است. هان و همکاران (۲۰۱۴)^[۵] نیز عملکرد خمشی مقطع SRC را بررسی کردند. یک مدل اجزاء محدود برای بررسی رفتار خمشی توسط نرم‌افزار آباکوس ایجاد شد که با داده‌های آزمایشگاهی مطابقت داده شد. با بررسی به عمل آمده ملاحظه شد که لوله‌ی فولادی به‌کار رفته در مقطع SRC بدون اینکه دچار کماتش موضعی شود، می‌تواند به مقاومت خمیری کامل خود برسد و در نهایت یک رابطه برای محاسبه‌ی ظرفیت خمشی مقطع SRC ارائه شده است. پژوهشگران مذکور همچنین (۲۰۱۵)^[۶] مقطع جعبه‌ی SRC را تحت خمش بحث و بررسی کردند. ۸ نمونه‌ی آزمایشگاهی، شامل ۶ نمونه مقطع جعبه‌ی SRC و ۲ نمونه بتن مسلح را آزمایش و با مدل اجزاء محدود به کمک نرم‌افزار آباکوس مقایسه کردند. تأثیر تغییرات در قطر لوله‌های فولادی و همچنین ارتفاع مقطع در رفتار مقطع جعبه‌ی SRC مطالعه شد. مدهای شکست و رفتار مقطع مرکب با مقطع جعبه‌ی بتن مسلح مقایسه شدند و برای مقطع مرکب دو نوع مد شکست خمشی - برشی برای مقطع با ارتفاع ۱۲۶۰ mm و شکست خمشی برای مقطع با ارتفاع ۸۴۰ mm مشاهده شد. ایشان (۲۰۱۵)^[۷] در مطالعه‌ی دیگری نیز به کمک مدل‌سازی به روش اجزاء محدود توسط نرم‌افزار آباکوس مقطع جعبه‌ی SRC را تحت بار فشاری مطالعه کردند. در پژوهش مذکور به دلیل افزایش دقت در محاسبات، بتن مقطع به ۴ ناحیه تقسیم شد: بتن خارجی غیرمحبوس بیرون خاموت، بتن خارجی در جان دیوارها، بتن خارجی محبوس در گوشه‌ها و هسته‌ی بتنی در لوله‌های فولادی. نتایج نشان‌دهنده‌ی تطابق مناسبی بین مقادیر پیش‌بینی شده و مقادیر اندازه‌گیری شده از آزمایش‌های قبلی بوده است. همچنین تأثیر لاغری جان دیوار، مقاومت بتن و فولاد، نسبت فولاد، نسبت میلگرد طولی و فواصل خاموت‌ها در محاسبه‌ی بار نهایی مقطع بررسی شده است. با توجه به مطالعات صورت گرفته تاکنون، می‌توان ظرفیت باربری ستون‌های فولادی مدفون در بتن مسلح SRC را متأثر از عوامل متعددی دانست. به همین منظور در پژوهش حاضر، یک مطالعه‌ی پارامتریک توسط نرم‌افزار آباکوس بر روی ۳۹ ستون مرکب SRC انجام شده و متغیرهای هندسی شامل: درصد فولاد H شکل، لاغری ستون، میزان خروج از مرکزیت نیرو و فاصله‌ی بین خاموت‌ها و متغیرهای مصالح شامل: مقاومت فشاری ستون و رده‌ی فولاد در نظر گرفته شده و تأثیر هر کدام از عوامل اخیر در ستون‌های مرکب بررسی شده است. همچنین شاخص شکل‌پذیری و عوامل مؤثر در شکل‌پذیری ستون‌های مرکب بحث و بررسی شده است.

۲. مدل اجزاء محدود

مدل اجزاء محدود توسط نرم‌افزار آباکوس صورت پذیرفته است. در مدل اجزاء محدود، مقطع پروفیل فولادی با استفاده از المان پیوسته‌ی SFR که هر گره سه درجه آزادی دورانی و سه درجه آزادی انتقالی دارد و از یک نقطه‌ی انتگرالی روی



شکل ۲. مقطع ستون‌ها به همراه میلگردهای طولی، عرضی و پروفیل فولادی در مطالعه‌ی کیم و همکاران (۲۰۱۲).^[۱۱]

هر دو نمونه از بتن با مقاومت ۹۱ مگاپاسکال و فولاد با تنش تسلیم ۹۱۳ مگاپاسکال و تنش نهایی ۹۸۸ مگاپاسکال تشکیل شدند. کرنش گسیختگی فولاد برابر با ۰.۷٪ تعیین شد. مقاومت تسلیم تمام میلگردهای طولی و عرضی برابر با ۵۲۵ مگاپاسکال بوده است. ستون‌های مذکور تحت بار محوری با خروج از محوریت حول محور قوی مقطع فولادی قرار گرفتند. نسبت برون‌محوری نیرو نسبت به مرکز مقطع در ستون C۱ برابر با ۰.۴ و در ستون C۲ برابر با ۰.۲۳ بوده است. جزئیات برپایی سیستم آزمایشگاهی در مطالعه‌ی کیم و همکاران (۲۰۱۲).^[۱۱] در شکل ۳ مشاهده می‌شود. پس از تحلیل نمونه‌های عددی در مدل C۱ و C۲ مشخص شد که شاخه‌ی صعودی منحنی نیرو- تغییرمکان مدل عددی با منحنی نمونه‌ی آزمایشگاهی تطبیق قابل قبولی دارد. ناحیه‌ی پیشینه‌ی منحنی از نتایج آزمایشگاهی، مقداری نوسان‌های ناشی از ترک خوردگی بتن در وجه کششی و فلوکشن شدن پوشش بتنی در وجه فشاری و خردشدگی آن را نشان می‌دهد. رفتار پس از بار بیشینه‌ی منحنی نیرو- تغییرمکان طولی مدل المان محدود با منحنی آزمایشگاهی در نمونه‌ی C۱ تطبیق خوبی دارد. برای ستون C۲، شاخه‌ی نزولی منحنی نیرو- تغییرمکان مدل المان محدود کمی متفاوت با منحنی نیرو- تغییرمکان آزمایشگاهی است. این امر را می‌توان به دلیل وجود ناکاملی و نقص در نمونه‌ی آزمایشگاهی یافت که در نمونه‌ی عددی لحاظ نشده است. مقایسه‌های صورت گرفته در شکل ۴ مشاهده می‌شود. مقادیر بار بیشینه‌ی عددی و آزمایشگاهی دو ستون SRC مطابق با مطالعه‌ی صورت گرفته‌ی کیم و همکاران،^[۱۱] با فولاد پرمقاومت ۹۱۳ مگاپاسکال و بتن ۹۱ مگاپاسکال در جدول ۱ ارائه شده است. این دو ستون تحت بار با دو نسبت خروج از محوریت متفاوت حول محوری قوی پروفیل فولادی قرار داده شدند.

هندسه‌ی مقطع ستون‌های اشاره شده، مشابه یکدیگر و به شکل مربع به بعد ۲۶۰ میلی‌متر است. نسبت فولاد و نسبت‌های میلگرد طولی به ترتیب برابر با ۰.۸۷٪ و ۱.۱٪ هستند. میلگردهای عرضی به قطر ۱۰ میلی‌متر به فاصله‌ی ۵۰ میلی‌متر از یکدیگر قرار گرفتند. نسبت‌های نیروی پیشینه‌ی عددی به آزمایشگاهی بین ۱.۰۸ تا ۱.۱۱ متغیر بوده است. به‌طور میانگین، ظرفیت‌های به‌دست آمده از نتایج المان محدود برای ستون‌های با خروج از محوریت پرمقاومت به میزان ۱٪ بیشتر از ظرفیت‌های به‌دست آمده از نمونه‌های آزمایشگاهی بوده است که احتمالاً به دلیل اختلاف مقاومت بتن ستون و بتن نمونه‌ی استوانه‌ی است. هیچ ضریب کاهش مقاومتی در شبیه‌سازی مصالح بتنی در ستون‌های SRC لحاظ نشده است. علاوه بر این، لغزش احتمالی میان پروفیل فولادی و بتن و همچنین ناکاملی هندسی به

طریق روابط ۲ الی ۴ تعیین می‌شوند:

$$x_{\max} = \frac{1}{C_T - C_T} \ln \left(\frac{C_T}{C_T} \right) \quad (2)$$

$$C_1 = \frac{f_{\max}}{\left(\alpha^{1-\alpha} - \alpha^{1-\alpha} \right)} \quad (3)$$

$$C_T = \frac{\ln \alpha}{x_{\max} (\alpha - 1)} \quad (4)$$

که در آن‌ها، f_{\max} مقاومت فشاری تک‌محوره، x_{\max} کرنش در بار نهایی و $\frac{C_T}{C_T}$ است که از طریق مجموعه روابط ۵ محاسبه می‌شود:

$$\begin{cases} \left(\frac{x_{\max}}{x_{\cdot} f_{\max}} \right) \leq 0.000572 \Rightarrow \alpha = 10^4 \\ 0.000572 < \left(\frac{x_{\max}}{x_{\cdot} f_{\max}} \right) \leq 0.026 \Rightarrow \alpha = 1.67 \left(\frac{x_{\max}}{x_{\cdot} f_{\max}} \right)^{-1/17} \\ 0.026 < \left(\frac{x_{\max}}{x_{\cdot} f_{\max}} \right) \leq 0.262 \Rightarrow \alpha = \sum_{i=1}^6 \chi_i \left(\frac{x_{\max}}{x_{\cdot} f_{\max}} \right)^i \\ \left(\frac{x_{\max}}{x_{\cdot} f_{\max}} \right) \geq 0.262 \Rightarrow \alpha = 100001 \end{cases} \quad (5)$$

که در آن‌ها، $f_{\cdot} f_{\max}$ کرنش متناظر با مقدار ۰.۲٪ تنش فشاری تک‌محوری در ناحیه‌ی پس از بار بیشینه است. رابطه‌ی تنش - کرنش پیشنهادی توسط شن و همکاران (۱۹۹۳).^[۱۱] برای شبیه‌سازی رفتار بتن در کشش مطابق رابطه ۶ است:

$$\frac{\sigma_t}{\sigma_{t_0}} = \frac{\varepsilon_t / \varepsilon_{t_0}}{0.731 \sigma_{t_0}^* \left[(\varepsilon_t / \varepsilon_{t_0}) - 1 \right]^{1.7} + \varepsilon_t / \varepsilon_{t_0}} \quad (6)$$

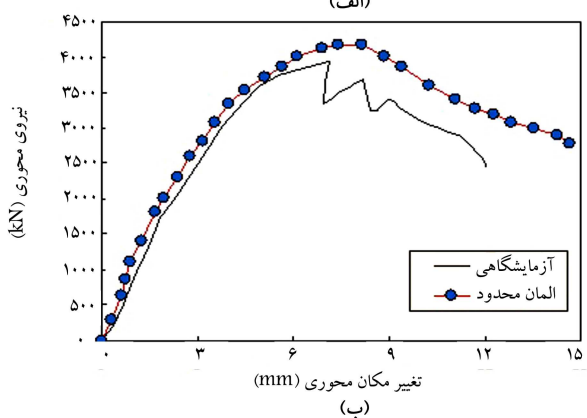
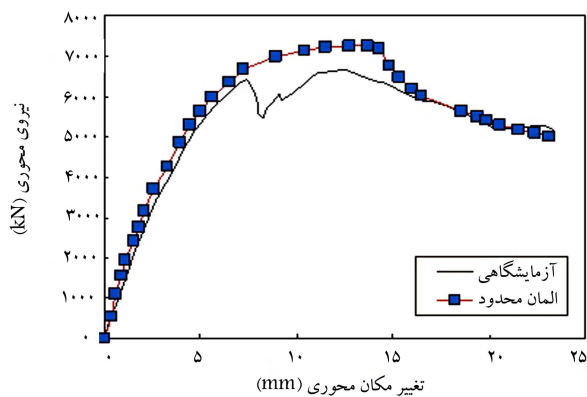
که در آن، $\varepsilon_{t_0} = \sigma_{t_0} / E_C$ مقاومت ترک‌خوردگی کششی σ_{t_0} توسط رابطه‌ی $\sigma_{t_0} = 1.4 (f_c' / 10)^{0.67}$ محاسبه می‌شود که در آن $E_C = 4730 \sqrt{f_c'}$ و f_c' مقاومت فشاری نمونه‌ی استوانه‌ی بر حسب مگاپاسکال است.

۳. تأیید مدل اجزاء محدود

یک مطالعه‌ی مقایسه‌ی به منظور اعتبارسنجی نتایج عددی با نتایج آزمایشگاهی انجام شده است. نتایج عددی از تحلیل المان محدود با استفاده از برنامه‌ی آباکوس انجام شده است که شبیه‌سازی‌های عددی براساس مقایسه‌ی نتایج با مدل‌های آزمایشگاهی انجام گرفته توسط کیم و همکاران (۲۰۱۲).^[۱۱] انجام شده است. ایشان مطالعات آزمایشگاهی و عددی را بر روی ستون‌های فولادی کاملاً مدفون در بتن با استفاده از فولاد پرمقاومت با تنش‌های تسلیم ۹۱۳ و ۸۰۶ مگاپاسکال و بتن پرمقاومت با مقاومت فشاری نمونه‌ی استوانه‌ی ۹۱ و ۱۱۳ مگاپاسکال انجام دادند. از مطالعات مذکور، فقط دو نمونه‌ی C۱ و C۲ در مدل‌های عددی مدنظر قرار گرفته است. ستون‌ها به شکل مربع و به بعد ۲۶۰ میلی‌متر و طول کلی ۲۶۲ میلی‌متر هستند. مقطع فولادی ستون‌ها به شکل H و به طول بال و جان به ترتیب ۱۵۰ و ۱۰۰ میلی‌متر بوده است. همچنین ضخامت بال و جان برابر با ۱۷/۶ میلی‌متر در نظر گرفته شده است. جزئیات میلگردهای طولی و عرضی بدین صورت است که از ۴ عدد میلگرد به قطر ۱۲ میلی‌متر به‌عنوان میلگردهای طولی و از میلگردهای به قطر ۱۰ میلی‌متر و به فواصل ۵۰ میلی‌متر از یکدیگر به‌عنوان میلگردهای عرضی یا خاموت استفاده شده است. مقطع ستون‌ها در شکل ۲ مشاهده می‌شود.

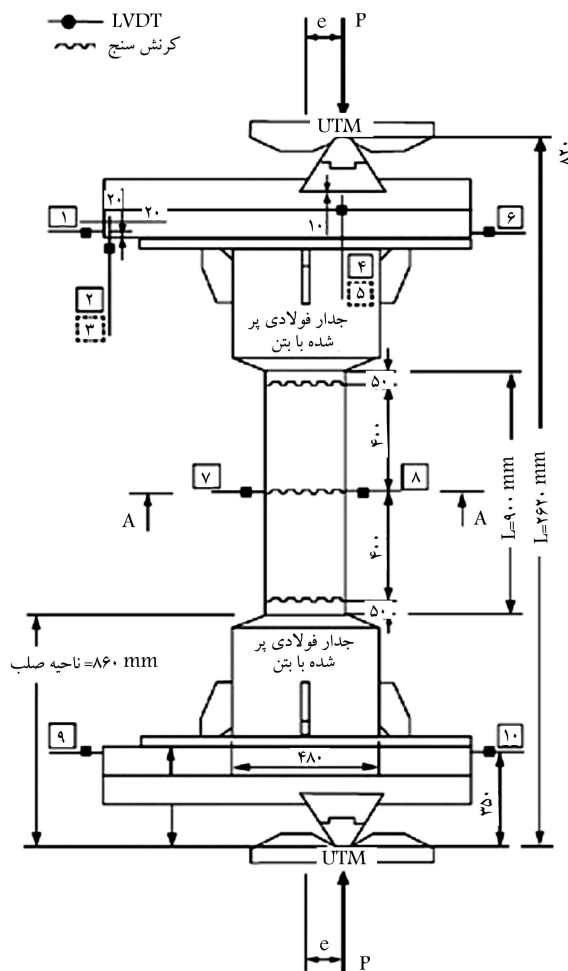
جدول ۱. مقایسه‌ی بین نتایج عددی و آزمایشگاهی ستون‌های مرکب کیم و همکاران (۲۰۱۲). [۱۱]

نام نمونه	موقعیت نیرو ex (mm)	نیرو (kN)		$\frac{P_{num}}{P_{exp}}$	کرنش محوری در بار بیشینه	
		P_{num}	P_{exp}		ϵ_{num}	ϵ_{exp}
C1	۱۲۰	۲۴۴۹	۲۲۰۳	۱٫۱۱۲	۴۵۵۳	۴۵۸۰
C2	۶۰	۴۱۴۷	۳۷۵۲	۱٫۱۰۵	۲۵۰۸	۲۸۷۴
				۱٫۱۰۱	میانگین	
				۱٫۰۱۲	انحراف معیار	



شکل ۴. مقایسه‌ی رفتار نیرو - تغییر مکان.

مطالعات پارامتریک مختلف با تغییر در مشخصات هندسی و مصالح برای درک بهتر رفتار ستون‌های مرکب فولادی مدفون در بتن انجام شده است. برای انجام مطالعه‌ی پارامتریک، یک ستون مربع با بعد خارجی ۵۰۰ میلی‌متر انتخاب شد که سطح مقطع آن در شکل ۵ مشاهده می‌شود که مطابق آن فواصل خاموت‌ها برابر ۲۵۰ میلی‌متر در نظر گرفته شده است و با توجه به اینکه هدف پژوهش حاضر بررسی ضوابط آیین‌نامه نیست، لذا این مطلب به‌عنوان محدودیت پژوهش حاضر تلقی می‌شود. این بعد از ستون، یک اندازه‌ی معمولی برای ستون‌های مرکب و مناسب برای ساختمان‌های میان‌مرتبه است. ستون در نظر گرفته شده در طول مطالعه‌ی پارامتریک به همراه تأثیر پارامترهای هندسی و مصالح مختلف تحلیل و طراحی شد که می‌تواند تأثیر به‌سزایی در رفتار ستون مرکب SRC بگذارد. در مجموع، ۳۹ ستون مرکب SRC برای مطالعه‌ی پارامتریک تحلیل شده‌اند که متغیرهای هندسی آن‌ها، شامل: درصد فولاد H شکل، لاغری ستون، میزان خروج از محوریت نیرو و فاصله‌ی بین خاموت‌ها بوده است. همچنین مقاومت فشاری بتن و رده‌ی فولاد در ستون‌ها از جمله‌ی متغیرهای مصالح بودند.



شکل ۳. جزئیات آزمایش در مطالعه‌ی کیم و همکاران. [۱۱]

وجود آمده در حین اجرای نمونه‌ها نیز در شبیه‌سازی ستون‌های مذکور در نظر گرفته نشده است. با مراجعه به جدول ۱، مقدار میانگین نسبت کرنش محوری عددی به آزمایشگاهی متناظر در بار بیشینه برابر با ۱٫۰۴۶ و انحراف استاندارد آن برابر با ۰٫۱۵۳ بوده است که این اختلاف در کرنش محوری می‌تواند ناشی از فرضیات صورت گرفته در رفتار مصالح در شبیه‌سازی‌های عددی باشد.

۴. مطالعه‌ی پارامتریک

پس از اطمینان از عملکرد صحیح مدل عددی از نظر مدل رفتاری مصالح، رفتار صحیح اندرکنش بین بخش‌های مختلف عضو و اعمال شرایط مرزی و بارگذاری،

جدول ۲. مشخصات ستون‌ها برای بررسی تأثیر نسبت درصد فولاد.

گروه	نمونه	مقطع (mm)	طول (mm)	L/D	S/D	پروفیل فولادی (mm)	مقاومت بتن (MPa)	A_s (%)	A_{sr} (%)
گروه ۱	SN۱	۵۰۰	۳۰۰۰	۶	۰٫۵	۹ × ۷ × ۱۰۰ × ۱۰۰	۳۰	۱	۰٫۶
	SN۲	۵۰۰	۳۰۰۰	۶	۰٫۵	۱۵ × ۱۳ × ۳۰۰ × ۳۰۰	۳۰	۵	۰٫۶
	SN۳	۵۰۰	۳۰۰۰	۶	۰٫۵	۲۸ × ۲۶ × ۳۰۰ × ۳۰۰	۳۰	۱۰	۰٫۶
	SN۴	۵۰۰	۳۰۰۰	۶	۰٫۵	۴۲ × ۴۰ × ۳۰۰ × ۳۰۰	۳۰	۱۵	۰٫۶
	SN۵	۵۰۰	۳۰۰۰	۶	۰٫۵	۵۶ × ۵۴ × ۳۰۰ × ۳۰۰	۳۰	۲۰	۰٫۶
گروه ۲	SM۶	۵۰۰	۳۰۰۰	۶	۰٫۵	۹ × ۷ × ۱۰۰ × ۱۰۰	۶۰	۱	۰٫۶
	SM۷	۵۰۰	۳۰۰۰	۶	۰٫۵	۱۵ × ۱۳ × ۳۰۰ × ۳۰۰	۶۰	۵	۰٫۶
	SMA۸	۵۰۰	۳۰۰۰	۶	۰٫۵	۲۸ × ۲۶ × ۳۰۰ × ۳۰۰	۶۰	۱۰	۰٫۶
	SM۹	۵۰۰	۳۰۰۰	۶	۰٫۵	۴۳ × ۴۰ × ۳۰۰ × ۳۰۰	۶۰	۱۵	۰٫۶
	SM۱۰	۵۰۰	۳۰۰۰	۶	۰٫۵	۵۴ × ۵۲ × ۳۰۰ × ۳۰۰	۶۰	۲۰	۰٫۶
گروه ۳	SH۱۱	۵۰۰	۳۰۰۰	۶	۰٫۵	۹ × ۷ × ۱۰۰ × ۱۰۰	۱۲۰	۱	۰٫۶
	SH۱۲	۵۰۰	۳۰۰۰	۶	۰٫۵	۱۵ × ۱۳ × ۳۰۰ × ۳۰۰	۱۲۰	۵	۰٫۶
	SH۱۳	۵۰۰	۳۰۰۰	۶	۰٫۵	۲۸ × ۲۶ × ۳۰۰ × ۳۰۰	۱۲۰	۱۰	۰٫۶
	SH۱۴	۵۰۰	۳۰۰۰	۶	۰٫۵	۴۲ × ۴۰ × ۳۰۰ × ۳۰۰	۱۲۰	۱۵	۰٫۶
	SH۱۵	۵۰۰	۳۰۰۰	۶	۰٫۵	۵۴ × ۵۲ × ۳۰۰ × ۳۰۰	۱۲۰	۲۰	۰٫۶

درصد فولاد، سختی و ظرفیت نهایی ستون افزایش یافته است. مقاومت باقیمانده پس از تسلیم و شکل‌پذیری هر سه گروه از ستون‌های مذکور نیز با افزایش در نسبت فولاد به صورت چشم‌گیری افزایش یافته است.

۲.۱.۴. ظرفیت محوری ستون‌های مرکب

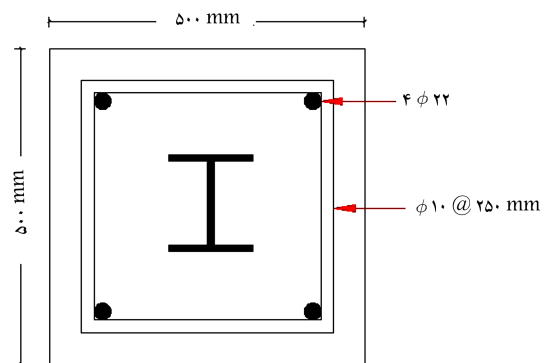
در جدول ۳، ظرفیت محوری ستون‌ها در سه گروه ۱، ۲ و ۳ ارائه و ظرفیت آن‌ها با مقادیر محاسبه شده‌ی تئوریک در آیین‌نامه‌ی AISC^[۱۲] مقایسه شده است. ظرفیت‌های تئوریک ستون‌های مذکور به‌طور میانگین ۱۵٪ کمتر از ظرفیت‌های به‌دست آمده از تحلیل عددی به‌دست آمده‌اند که به دلیل اعمال ضریب کاهش مقاومت ۰٫۸۵ برای مقاومت فشاری نمونه‌ی استوانه‌یی بتن است (رابطه‌ی ۷):

$$P_o = 0.85f'_c A_c + A_s F_y + A_{sr} F_{y_{sr}} \quad (7)$$

که در آن، A_c سطح مقطع بتن، A_s و F_y مساحت و تنش تسلیم در پروفیل فولادی، A_{sr} و $F_{y_{sr}}$ مساحت و تنش تسلیم در آرماتورهای طولی است. در شکل ۷، مقایسه‌ی تغییرات ظرفیت باربری ستون برای سه نوع بتن با مقاومت فشاری مختلف به‌ازاء درصد فولاد یکسان برای هر سه نوع بتن ملاحظه می‌شود که دامنه‌ی تغییرات فولاد تا ۲۰ درصد بوده است. افزایش در ظرفیت محوری برای بتن با مقاومت معمولی، بیشتر از نمونه با بتن با مقاومت بالا و خیلی بالا بوده است؛ یا به عبارت دیگر، با افزایش درصد فولاد، نرخ رشد ظرفیت باربری ستون‌هایی که از بتن با مقاومت بالا ساخته شده‌اند، کاهش یافته و مزیت استفاده از درصد‌های بیشتر نسبت فولاد برای ستون‌های مذکور بی‌اثر شده است.

۳.۱.۴. شاخص شکل‌پذیری برای ستون‌های مرکب

درصد بالای فولاد معمولاً موجب افزایش شکل‌پذیری^۵ ستون‌های مرکب می‌شود. شاخص شکل‌پذیری (μ) در واقع نسبت تغییرمکان در نقطه‌یی نظیر ۰٫۷٪ بار بیشینه در شاخه‌ی نزولی منحنی به بیشینه‌ی تغییرمکان در بار بیشینه است. شاخص



شکل ۵. مقطع ستون مورد مطالعه در مطالعات پارامتریک.

۱.۱.۴. درصد فولاد

وجود مقدار زیادی از هسته‌ی فولادی، سبب بهبود شکل‌پذیری ستون می‌شود. پنج درصد مختلف از فولاد (۱، ۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ درصد) در مطالعه‌ی پارامتریک با بتن معمولی، متوسط، و پرمقاومت استفاده شده‌اند. ستون‌های مذکور به سه گروه متناسب با نوع بتن تقسیم‌بندی شدند و نسبت لاغری ۶ و فاصله‌ی بین میلگردهای عرضی در آن‌ها در تمام موارد، ثابت نگه داشته شد. نیرو در ستون‌های اشاره شده به صورت هم‌محور اعمال شده است. نمونه‌ها مطابق جدول ۲ در نظر گرفته شدند، که در آن، L طول نمونه، D ضلع مقطع ستون، S فاصله‌ی خاموت‌ها، A_s درصد فولاد مقطع و A_{sr} درصد میلگردهای طولی مقطع هستند.

۱.۱.۴. پاسخ نیرو - تغییرمکان محوری

در شکل ۶، تأثیر درصد‌های مختلف فولاد مقطع در رفتار نیرو - تغییرمکان محوری سه گروه از نمونه‌ها مشاهده می‌شود. براساس شکل ۶ مشخص است که با افزایش

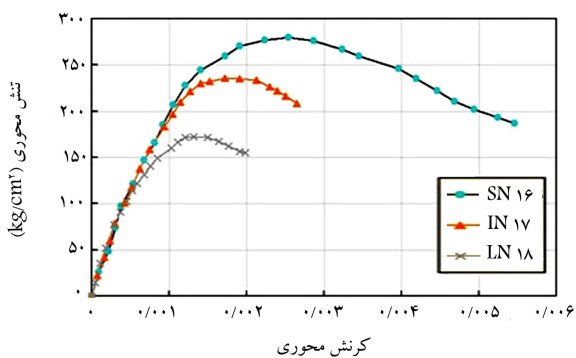
شکل پذیری ستون‌های مذکور تعیین و در جدول ۳ ارائه شده‌اند. از تحلیل عددی مشاهده می‌شود که ستون‌های SN۴ و SN۵ از گروه ۱ نمی‌توانستند به ۷۰٪ ظرفیت نهایی بعد از تسلیم به دلیل ناپایداری عددی برسند. دو ستون SN۴ و SN۵ با درصد زیادی از فولاد (۱۵٪ و ۲۰٪) با بتن با مقاومت کم ۳۰ مگاپاسکال ساخته و شبیه‌سازی شدند. شاخص شکل‌پذیری ستون‌های SN۱، SN۲ و SN۳ از گروه ۱ با افزایش درصد فولاد بیشتر شده است. ستون SN۳ نسبت به باقی ستون‌های گروه ۱ شکل پذیرتر نشان داده است. شاخص شکل‌پذیری برای گروه‌های ۲ و ۳ نیز در جدول ۳ ارائه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، شاخص شکل‌پذیری با افزایش درصد فولاد در ستون مرکب نیز بیشتر شده است. علاوه بر این، ملاحظه شد که ستون‌های گروه ۲، شکل‌پذیری بالاتری نسبت به ستون‌های گروه ۳ دارند، چراکه مقاومت بتن در ستون‌های گروه ۳ بیشتر است، که به نوبه‌ی خود موجب کاهش شکل‌پذیری شده است.

۲.۴. تأثیر نسبت لاغری کلی ستون

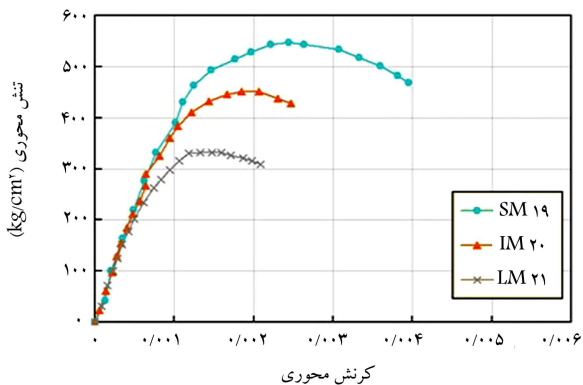
نسبت طول (L) به عمق مقطع ستون (D) در پژوهش حاضر، نسبت لاغری (L/D) نامیده می‌شود و پایداری کلی ستون با استفاده از نسبت لاغری مذکور کنترل می‌شود. سه نسبت لاغری ۶، ۱۲ و ۲۰ در مطالعات حاضر مطابق با جدول ۴، ستون‌های کوتاه، متوسط، و بلند نام‌گذاری و در نظر گرفته شده‌اند. پژوهش حاضر با دو درصد نسبت فولاد مختلف (۵٪ و ۱۰٪) و بتن با مقاومت ۳۰ و ۶۰ مگاپاسکال انجام شده است.

۱.۲.۴. رفتار تنش - کرنش محوری

در شکل ۸، تأثیر نسبت‌های لاغری در پاسخ‌های تنش - کرنش محوری برای دو گروه

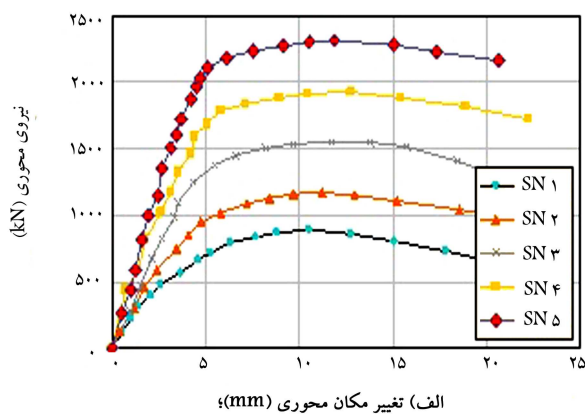


الف) ستون‌های گروه ۴

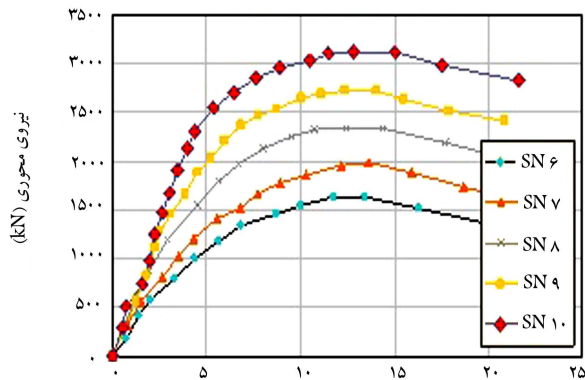


ب) ستون‌های گروه ۵

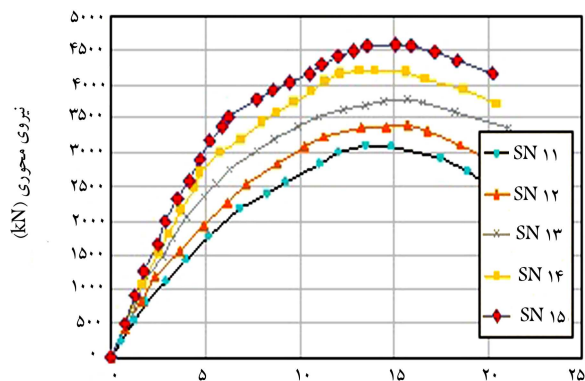
شکل ۸. تأثیر نسبت‌های لاغری در منحنی تنش - کرنش محوری.



الف) تغییر مکان محوری (mm)؛

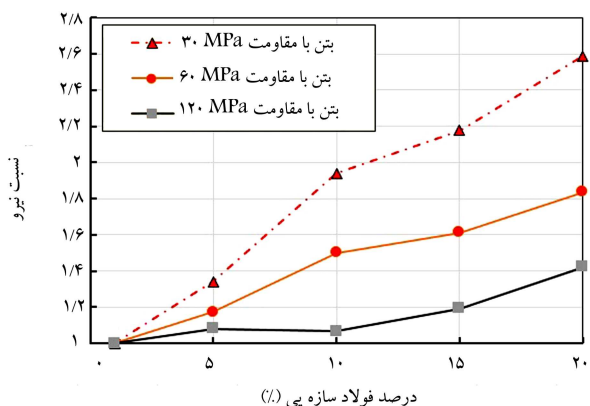


ب) تغییر مکان محوری (mm)؛



پ) تغییر مکان محوری (mm).

شکل ۶. تأثیر درصد فولاد مختلف در رفتار نیرو - تغییر مکان محوری.



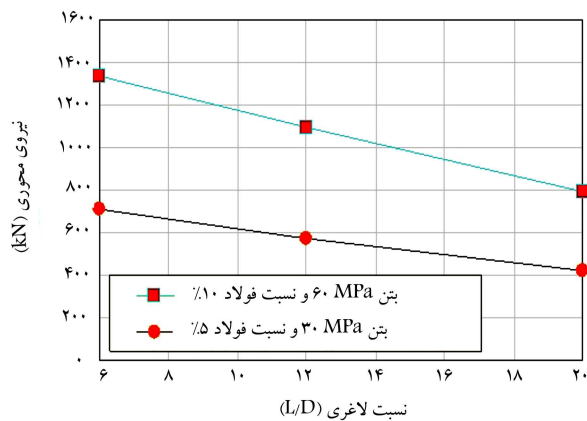
شکل ۷. تأثیر درصد فولاد در افزایش ظرفیت باربری.

جدول ۳. شاخص شکل پذیری در گروه های ۱، ۲ و ۳.

شخص شاخص شکل پذیری	تغییر مکان در بار بیشینه (mm) %۷۰	ظرفیت محوری (kN)	مقاومت بتن (MPa)	A_s (%)	S/D	L/D	نمونه
۲,۰۳	۲۲,۹۳	۱۱,۲۸	۸۶۵۱	۳۰	۰,۵	۶	SN۱
۲,۲۰	۲۴,۷۴	۱۱,۲۷	۱۱۶۷۵	۳۰	۰,۵	۶	SN۲
۲,۵۹	۲۸,۰۱	۱۰,۸۴	۱۶۹۸۹	۳۰	۰,۵	۶	SN۳
۱,۹۵	۲۲,۱۲	۱۱,۳۲	۱۵۹۲۹	۶۰	۰,۵	۶	SM۶
۲,۲۸	۲۵,۵۵	۱۱,۲۳	۱۸۹۷۷	۶۰	۰,۵	۶	SM۷
۲,۴۵	۲۹,۰۱	۱۱,۸۶	۲۴۴۵۳	۶۰	۰,۵	۶	SMA۸
۲,۷۶	۳۳,۰۱	۱۱,۹۸	۲۶۴۷۵	۶۰	۰,۵	۶	SM۹
۲,۸۳	۳۴,۰۲	۱۲,۰۲	۳۰۱۸۳	۶۰	۰,۵	۶	SM۱۰
۱,۶۸	۲۲,۶۸	۱۳,۵۰	۳۰۴۳۵	۱۲۰	۰,۵	۶	SH۱۱
۱,۷۴	۲۴,۶۲	۱۴,۱۸	۳۳۲۶۰	۱۲۰	۰,۵	۶	SH۱۲
۱,۷۵	۲۶,۳۲	۱۵,۰۷	۳۷۱۸۰	۱۲۰	۰,۵	۶	SH۱۳
۲,۰۸	۲۸,۰۵	۱۳,۴۹	۴۰۸۸۶	۱۲۰	۰,۵	۶	SH۱۴
۲,۱۲	۲۹,۲۰	۱۳,۸۰	۴۵۱۵۲	۱۲۰	۰,۵	۶	SH۱۵

جدول ۴. مشخصات ستون ها برای بررسی تأثیر نسبت لاغری.

گروه	نمونه	مقطع (mm)	طول (mm)	L/D	S/D	e/D	پروفیل فولادی (mm)	مقاومت بتن (MPa)	A_s (%)	A_r (%)
گروه ۴	SN۱۶	۵۰۰	۳۰۰۰	۶	۰,۵	۰,۲	۳۰۰ × ۳۰۰ × ۱۳ × ۱۵	۳۰	۵	۰,۶
	IN۱۷	۵۰۰	۶۰۰۰	۱۲	۰,۵	۰,۲	۳۰۰ × ۳۰۰ × ۱۳ × ۱۵	۳۰	۵	۰,۶
	LN۱۸	۵۰۰	۱۰۰۰۰	۲۰	۰,۵	۰,۲	۳۰۰ × ۳۰۰ × ۱۳ × ۱۵	۳۰	۵	۰,۶
گروه ۵	SM۱۹	۵۰۰	۳۰۰۰	۶	۰,۵	۰,۲	۳۰۰ × ۳۰۰ × ۲۶ × ۲۸	۶۰	۱۰	۰,۶
	IM۲۰	۵۰۰	۶۰۰۰	۱۲	۰,۵	۰,۲	۳۰۰ × ۳۰۰ × ۲۶ × ۲۸	۶۰	۱۰	۰,۶
	LM۲۱	۵۰۰	۱۰۰۰۰	۲۰	۰,۵	۰,۲	۳۰۰ × ۳۰۰ × ۲۶ × ۲۸	۶۰	۱۰	۰,۶



شکل ۹. تأثیر نسبت های لاغری بر بار محوری.

به ۲۰، ظرفیت باربری تا ۴۰٪ کاهش یافته است. با وجود این، لنگر در بار نهایی به میزان ۵٪ و ۸٪ برای دو نسبت لاغری ۱۲ و ۲۰ در مقایسه با نسبت لاغری ۶ افزایش یافته است. ظرفیت باربری نهایی با افزایش نسبت لاغری مطابق با شکل ۹ کاهش یافته است. زمانی که ستون ها با بتن با مقاومت بالا ساخته شوند، این مطلب پر رنگ تر می شود، که دلیل آن تسلیم شدن بتن پرمقاومت در حالت تَرَد است.

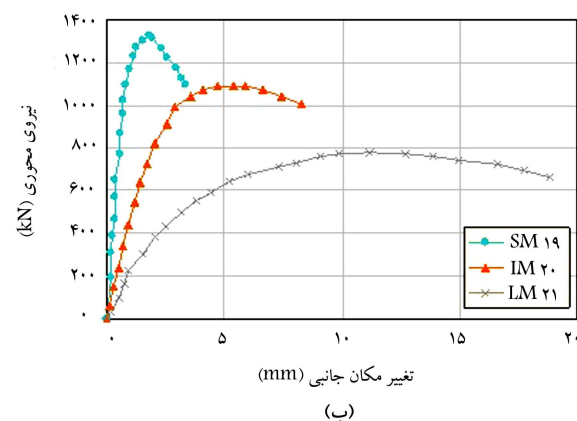
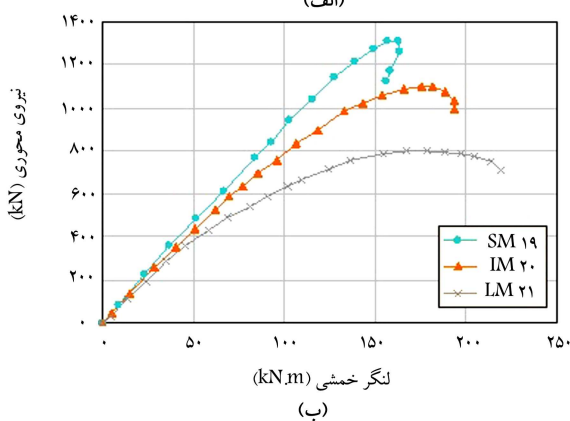
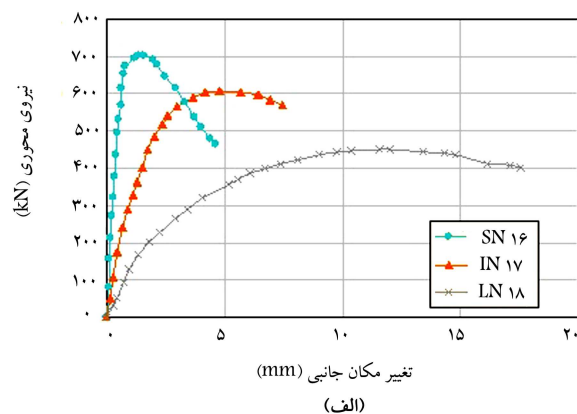
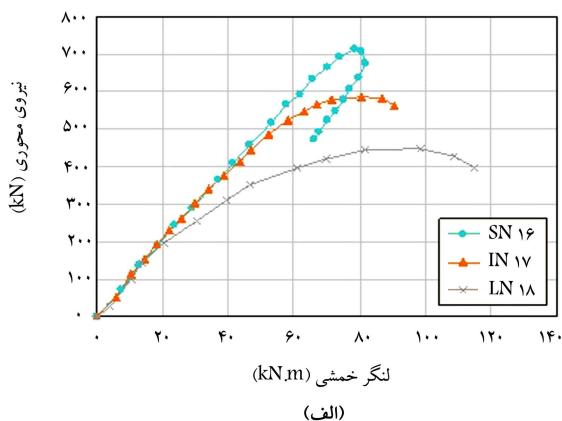
۴ و ۵ مشاهده می شود، که مطابق آن ظرفیت محوری ستون های مرکب با افزایش نسبت لاغری کاهش یافته است. همان گونه که در شکل ۸ الف ملاحظه می شود، ستون SN۱۶ با نسبت لاغری ۶، بیشترین ظرفیت باربری نسبت به سایر ستون های گروه ۴ را دارد. چنین رفتاری نیز برای ستون SM۱۹ نسبت به ستون های گروه ۵ در شکل ۸ ب مشاهده می شود، که رفتاری با شکل پذیری بالاتر نسبت به سایر ستون های گروه خود دارند. در کل هر چه ستون لاغرتر باشد، تغییر مکان محوری با یک کاهش در بار محوری افزایش می یابد.

۲.۲.۴. بار بیشینه و لنگر متناظر با آن

در جدول ۵، تأثیر نسبت لاغری در بار بیشینه و لنگر ارائه شده است. ستون های دو گروه ۴ و ۵ با ۵٪ و ۱۰٪ فولاد ساخته شده اند. در ستون های گروه ۴، نسبت لاغری از ۶ به ۱۲ افزایش داده شده است، که در نتیجه، بار محوری نهایی به میزان ۱۸٪ کاهش یافته است. از طرفی دیگر، افزایش نسبت لاغری از ۶ به ۲۰ منجر به کاهش ۳۷٪ در ظرفیت باربری نهایی شده است. لنگرها در بار نهایی برای گروه ۴ به میزان ۵٪ و ۱۰٪ برای نسبت های لاغری ۱۲ و ۲۰ در مقایسه با نسبت لاغری ۶ افزایش داشته اند. افزایش در مقدار لنگر خمشی ناشی از افزایش در لنگر مرتبه دوم ستون است، که با افزایش لاغری فراهم شده است. به طور مشابه برای ستون های گروه ۵، با افزایش نسبت لاغری از ۶ به ۱۲، ظرفیت باربری به میزان ۱۹٪ کاهش یافته است. از طرفی، با افزایش نسبت لاغری

جدول ۵. تأثیر نسبت لاغری کل در بار بیشینه.

گروه	نمونه	L/D	S/D	e/D	مقاومت بتن (MPa)	بار نهایی (kN)	لنگر نهایی (kN.m)	کرنش نهایی	تغییر مکان نهایی (mm)	درصد اختلاف (%)	لنگر خمشی
گروه ۴	SN ۱۶	۶	۰٫۵	۰٫۲	۳۰	۷۰۳۴	۸۰۵	۲۴۵۲	۱۵	-	-
	IN ۱۷	۱۲	۰٫۵	۰٫۲	۳۰	۵۷۲۰	۸۴۶	۱۷۷۳	۴۸	-۱۸	۵
	LN ۱۸	۲۰	۰٫۵	۰٫۲	۳۰	۴۳۷۰	۸۷۹	۱۲۴۱	۱۰۱	-۳۷	۱۰
گروه ۵	SM ۱۹	۶	۰٫۵	۰٫۲	۶۰	۱۳۰۴۵	۱۵۵۹	۲۵۸۰	۱۷	-	-
	IM ۲۰	۱۲	۰٫۵	۰٫۲	۶۰	۱۰۸۰۷	۱۶۳۳	۱۹۳۷	۵۴	-۱۹	۵
	LM ۲۱	۲۰	۰٫۵	۰٫۲	۶۰	۷۹۶۲	۱۶۷۳	۱۴۰۰	۱۱۰	-۴۰	۸



شکل ۱۱. تأثیر نسبت لاغری بر منحنی نیرو - لنگر خمشی.

شکل ۱۰. تأثیر نسبت لاغری بر منحنی نیروی محوری - تغییر مکان جانبی.

۴.۲.۴. پاسخ نیرو - لنگر خمشی

منحنی‌های نیرو - لنگر خمشی برای ستون‌های کوتاه، متوسط و بلند برای دو گروه ۴ و ۵ در شکل ۱۱ به ترتیب نشان داده شده است. در هر دو مورد، منحنی‌های نیرو - لنگر خمشی ستون‌های کوتاه بیشتر به رفتار خطی نسبت به سایر ستون‌ها نزدیک است. با وجود این، با افزایش نسبت لاغری، رفتار اخیر غیرخطی شده است که به دلیل تأثیر تغییر شکل مرتبه‌ی دوم است. تأثیر نسبت لاغری در منحنی نیرو - لنگر خمشی برای هر دو گروه مشابه بوده است.

۳.۴. تأثیر نسبت خروج از محوریت نیرو

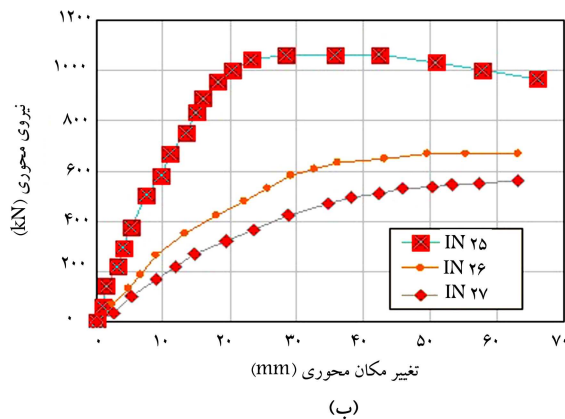
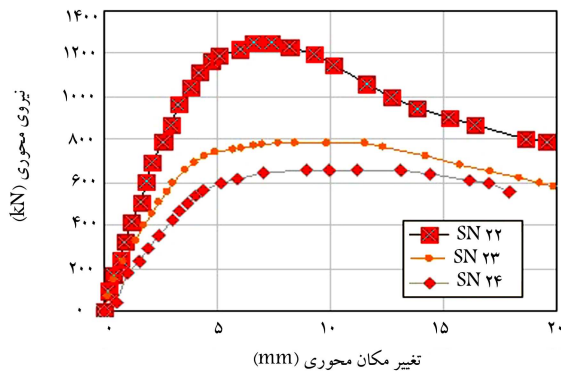
شش ستون در قالب دو گروه ۶ و ۷ مطابق جدول ۶ برای مشاهده‌ی تأثیر نسبت برون‌محوری در نظر گرفته شده‌اند. ستون‌ها در گروه ۶، شامل SN۲۲، SN۲۳ و

۳.۲.۴. پاسخ نیرو - تغییر مکان جانبی

منحنی نیروی محوری - تغییر مکان جانبی برای ستون‌های گروه ۴ و ۵ در شکل ۱۰ مشاهده می‌شود که مطابق آن ناحیه‌ی قبل از رسیدن به بار بیشینه در منحنی برای ستون‌های کوتاه SN۱۶ و SM۱۹، یک شیب زیاد و رفتار خطی دارد. از طرفی دیگر، با افزایش نسبت لاغری، ناحیه‌ی اشاره شده از منحنی، رفتار غیرخطی پیدا کرده است که منجر به کاهش شیب اولیه شده است. رفتار غیرخطی به دلیل افزایش تغییر مکان مرتبه‌ی دوم در ستون‌های لاغر رخ داده است. همان‌گونه که در شکل ۱۰ ملاحظه می‌شود، ستون‌های کوتاه، افت شدیدی را بلافاصله پس از بار بیشینه تجربه کرده‌اند؛ در حالی که ستون‌های بلند توانسته‌اند بار محوری بیشینه را در محدوده‌ی عرض‌تری تحمل کنند.

جدول ۶. مشخصات ستون‌ها برای بررسی تأثیر نسبت برون محوری (e/D).

گروه	نمونه	مقطع (mm)	طول (mm)	L/D	S/D	e/D	پروفیل فولادی (mm)	مقاومت بتن (MPa)	A_s (%)	A_g (%)
گروه ۶	SN۲۲	۵۰۰	۳۰۰۰	۶	۰/۵	۰/۱	۳۰۰ × ۳۰۰ × ۲۶ × ۲۸	۳۰	۱۰	۰/۶
	SN۲۳	۵۰۰	۳۰۰۰	۶	۰/۵	۰/۳	۳۰۰ × ۳۰۰ × ۲۶ × ۲۸	۳۰	۱۰	۰/۶
	SN۲۴	۵۰۰	۳۰۰۰	۶	۰/۵	۰/۴	۳۰۰ × ۳۰۰ × ۲۶ × ۲۸	۳۰	۱۰	۰/۶
گروه ۷	IN۲۵	۵۰۰	۶۰۰۰	۱۲	۰/۵	۰/۱	۳۰۰ × ۳۰۰ × ۲۶ × ۲۸	۳۰	۱۰	۰/۶
	IN۲۶	۵۰۰	۶۰۰۰	۱۲	۰/۵	۰/۳	۳۰۰ × ۳۰۰ × ۲۶ × ۲۸	۳۰	۱۰	۰/۶
	IN۲۷	۵۰۰	۶۰۰۰	۱۲	۰/۵	۰/۴	۳۰۰ × ۳۰۰ × ۲۶ × ۲۸	۳۰	۱۰	۰/۶



شکل ۱۲. تأثیر نسبت برون محوری در منحنی نیرو - تغییر مکان محوری.

باربری به مقدار ۲۷٪، ۵۴٪ و ۶۱٪ برای ستون‌های SN۲۲، SN۲۳ و SN۲۴ در مقایسه با ستون SN۳ کاهش یافته است.

۳.۳.۴. پاسخ نیرو - تغییر مکان جانبی

آثار نسبت برون محوری در منحنی نیرو - تغییر مکان جانبی در شکل ۱۳ برای ستون‌های دو گروه ۶ و ۷ نشان داده شده است. در هر دو گروه، تغییر مکان جانبی در بار مشخص با افزایش نسبت برون محوری افزایش یافته است که مورد انتظار نیز بود. افزایش تغییر مکان جانبی در ستون‌های متوسط بیشتر از ستون‌های کوتاه بوده است. این امر نیز به دلیل داشتن سختی خمشی کمتر ستون‌های متوسط بوده است. در شکل (۱۳ الف و ب) که یک ناحیه‌ی بیشینه‌ی منحنی نسبتاً تخت با یک افت تدریجی در ظرفیت بار محوری در شاخه‌ی نزولی مشاهده می‌شود، افزایش نسبت برون محوری رخ داده است.

SN۲۴ با بتن با مقاومت ۳۰ مگاپاسکال و نسبت لاغری ۶ ساخته شدند. از طرفی دیگر، ستون‌های گروه ۷ شامل IN۲۵، IN۲۶ و IN۲۷ با همان بتن و نسبت لاغری ۱۲ ساخته شدند. نیرو در ستون‌های اشاره شده به صورت خروج از محوریت حول محور قوی اعمال شده است. نسبت‌های برون محوری برابر با ۰/۱، ۰/۳ و ۰/۴ در نظر گرفته شدند. نسبت‌های بالای خروج از محوریت باعث افزایش تنش‌های فشاری - خمشی در مقطع شده است. هر چه نسبت خروج از محوریت بیشتر باشد، ظرفیت باربری محوری ستون در مقایسه با بار هم محوری کمتر شده است. تمام ستون‌ها با نسبت فولاد ۱۰٪ بودند.

۱.۳.۴. پاسخ نیرو - تغییر مکان محوری

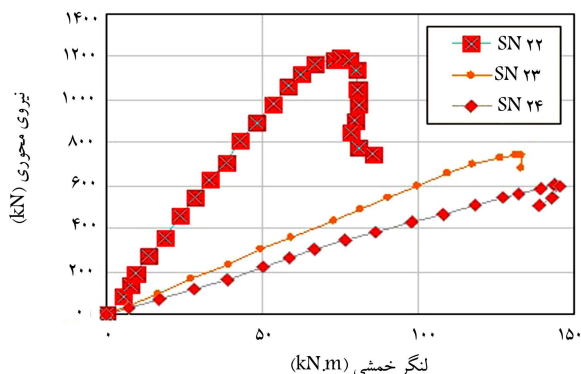
در شکل ۱۲، تأثیر نسبت برون محوری نیرو در منحنی نیرو - تغییر مکان محوری برای دو گروه از ستون‌های ۶ و ۷ مشاهده می‌شود که مطابق آن با افزایش نسبت برون محوری، ظرفیت باربری و سختی اولیه‌ی ستون‌های مرکب به طور قابل ملاحظه‌ای کاهش یافته است. همچنین ملاحظه شد که کاهش در سختی برای ستون‌های با نسبت لاغری بزرگ، بیشتر مشهود است. با افزایش نسبت برون محوری ستون‌های دو گروه ۶ و ۷، مقاومت پس از بار بیشینه به طور تدریجی کاهش یافته است. از طرفی دیگر، ستون‌ها در گروه ۶، شیب شدیدتری در ناحیه‌ی صعودی در مقایسه با ستون‌های گروه ۷ داشته‌اند، چرا که ستون با نسبت لاغری بزرگ‌تر، تغییر شکل محوری بزرگ‌تری در سختی کمتر در مقایسه با ستون کوتاه متحمل شده است.

۲.۳.۴. بار بیشینه و لنگر خمشی متناظر با آن

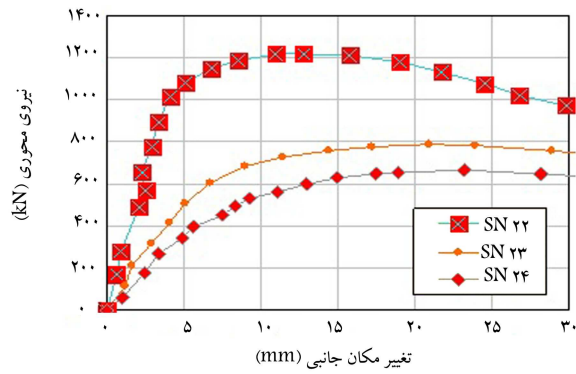
در جدول ۷، تأثیر نسبت برون محوری در ظرفیت باربری محوری و لنگر متناظر با آن برای ستون‌های مرکب در دو گروه ۶ و ۷ ارائه شده است. برای ستون‌های گروه ۶، بارهای محوری بیشینه متناظر با برون محوری ۱۰٪ به میزان ۳۶٪ و ۴۶٪ وقتی نسبت‌ها به ۰/۳ و ۰/۴ افزایش یابند، کاهش یافته‌اند. به طور مشابه، برای ستون‌های گروه ۷، ظرفیت برای نسبت برون محوری ۰/۳ و ۰/۴ به میزان ۳۷٪ و ۴۷٪ کاهش یافته است. برای ستون‌های گروه ۶، لنگر خمشی متناظر با نسبت برون محوری ۰/۱ به میزان ۷۳٪ و ۹۱٪ افزایش یافته است. این افزایش برای زمانی است که نسبت برون محوری به ترتیب به ۰/۳ و ۰/۴ افزایش یافته است. به طور مشابه، برای ستون‌های گروه ۷، لنگر خمشی به مقدار ۵۴٪ و ۵۸٪ برای دو نسبت برون محوری ۰/۳ و ۰/۴ افزایش یافته است. قابل ذکر است که ستون SN۳ با مشخصات مشابه با گروه ۶ ساخته شد که برای شرایط بارگذاری هم محوری با ظرفیت محوری ۱۶۹۹ کیلو نیوتن بود. ظرفیت باربری تمام ستون‌ها در گروه ۶ کمتر از نمونه‌ی SN۳ بوده است. ظرفیت

جدول ۷. تأثیر نسبت برون‌محوری در بار بیشینه و لنگر خمشی.

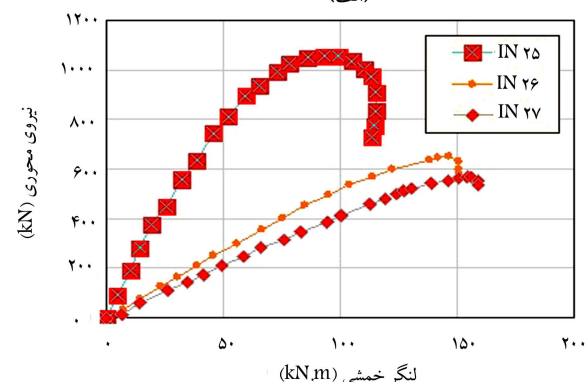
گروه	نمونه	L/D	S/D	e/D	مقاومت بتن (MPa)	نهایی		درصد اختلاف
						لنگر (kN.m)	بار (kN)	
گروه ۶	SN۲۲	۶	۰٫۵	۰٫۱	۳۰	۷۷٫۶	۲۴۸۱	-
	SN۲۳	۶	۰٫۵	۰٫۳	۳۰	۱۳۴	۳۳۳۰	-۳۶
	SN۲۴	۶	۰٫۵	۰٫۴	۳۰	۱۴۸	۳۳۹۴	-۴۶
گروه ۷	IM۲۵	۱۲	۰٫۵	۰٫۱	۳۰	۹۰	۱۹۹۲	-
	IM۲۶	۱۲	۰٫۵	۰٫۳	۳۰	۱۳۹	۲۰۵۴	-۳۷
	IM۲۷	۱۲	۰٫۵	۰٫۴	۳۰	۱۴۲	۲۱۰۹	-۴۷



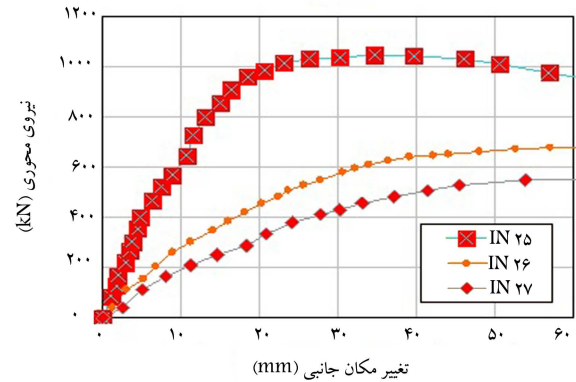
(الف)



(ب)



(ب)



(ب)

شکل ۱۴. تأثیر نسبت برون‌محوری بر منحنی نیرو - لنگر خمشی.

شکل ۱۳. تأثیر نسبت برون‌محوری بر منحنی نیرو - تغییر مکان جانبی.

پرمقاومت انجام شده است. بنابراین، در مطالعه‌ی پارامتریک، مقاومت بتن مطابق با جدول ۸ در سه مقدار 30° ، 60° و 120° مگاپاسکال در نظر گرفته شده است که برای پوشش دادن سه محدوده‌ی بتن با مقاومت پایین، متوسط و پرمقاومت در ترکیب با سایر پارامترها بوده است. نسبت برون‌محوری نیرو در گروه ۸ برابر با $0/1$ و در گروه ۹ برابر با $0/3$ انتخاب شد. نیرو به صورت برون‌محوری و حول محور قوی پروفیل فولادی اعمال شده است. نسبت‌های لاغری برای تمام ستون‌های دو گروه برابر با ۶ و نسبت فولاد نیز برابر با $1/10$ در نظر گرفته شده است.

۱.۴.۴. پاسخ نیرو - تغییر مکان محوری

در شکل ۱۵، منحنی نیرو - تغییر مکان محوری برای ستون‌های دو گروه ۸ و ۹ مشاهده می‌شود که مطابق آن نیروی محوری نهایی و سختی ستون مرکب کوتاه به‌طور چشم‌گیری متأثر از مقاومت بتن بوده است. پاسخ‌های نیرو - تغییر مکان محوری

۴.۳.۴. پاسخ نیرو - لنگر خمشی

در شکل ۱۴، منحنی‌های نیرو - لنگر خمشی برای ستون‌های کوتاه و متوسط در هر گروه مشاهده می‌شود. منحنی نیرو - لنگر خمشی برای ستون‌های کوتاه، بیانگر رفتار کشسان است. با وجود این، با افزایش نسبت برون‌محوری، منحنی رفتار غیرخطی از خود نشان داده است که به دلیل وجود تغییر مکان مرتبه‌ی دوم بوده است.

۴.۴. تأثیر مقاومت فشاری بتن

مقاومت فشاری بتن، نقش مهمی در افزایش ظرفیت باربری ایفا می‌کند که متعاقباً موجب کاهش سطح مقطع عضو نیز می‌شود. با وجود این، بررسی‌های اندکی به صورت عددی و آزمایشگاهی تا به امروز برای ستون‌های SRC با بتن‌های پرمقاومت و بسیار

جدول ۸. مشخصات ستون‌ها برای بررسی تأثیر مقاومت فشاری بتن.

گروه	نمونه	مقطع (mm)	طول (mm)	L/D	S/D	e/D	پروفیل فولادی (mm)	مقاومت بتن (MPa)	A_s (%)	A_n (%)
گروه ۸	SN۲۸	۵۰۰	۳۰۰۰	۶	۰٫۵	۰٫۱	۳۰۰ × ۳۰۰ × ۲۶ × ۲۸	۳۰	۱۰	۰٫۶
	SM۲۹	۵۰۰	۳۰۰۰	۶	۰٫۵	۰٫۱	۳۰۰ × ۳۰۰ × ۲۶ × ۲۸	۶۰	۱۰	۰٫۶
	SH۳۰	۵۰۰	۳۰۰۰	۶	۰٫۵	۰٫۱	۳۰۰ × ۳۰۰ × ۲۶ × ۲۸	۱۲۰	۱۰	۰٫۶
گروه ۹	SN۳۱	۵۰۰	۳۰۰۰	۶	۰٫۵	۰٫۳	۳۰۰ × ۳۰۰ × ۲۶ × ۲۸	۳۰	۱۰	۰٫۶
	SM۳۲	۵۰۰	۳۰۰۰	۶	۰٫۵	۰٫۳	۳۰۰ × ۳۰۰ × ۲۶ × ۲۸	۶۰	۱۰	۰٫۶
	SH۳۳	۵۰۰	۳۰۰۰	۶	۰٫۵	۰٫۳	۳۰۰ × ۳۰۰ × ۲۶ × ۲۸	۱۲۰	۱۰	۰٫۶

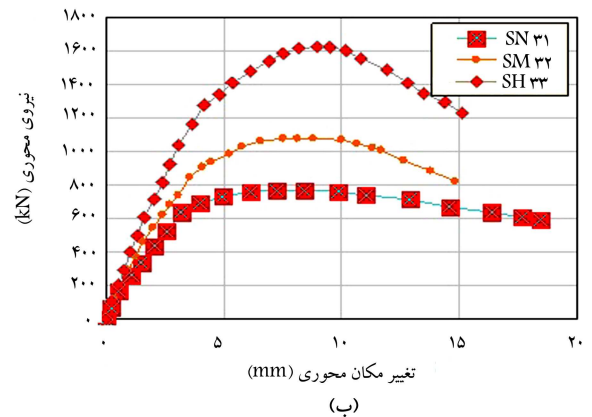
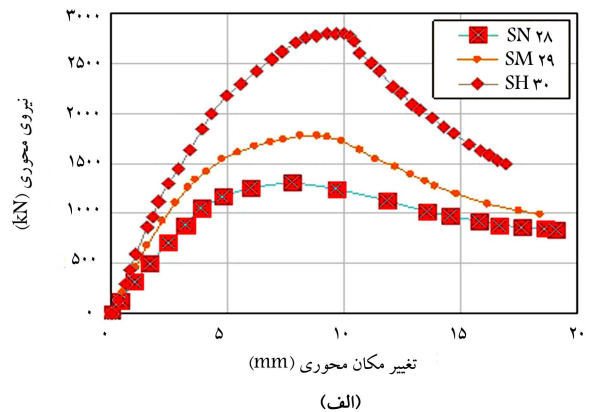
یافته است. از طرف دیگر، ظرفیت باربری نهایی ستون SH۳۰ به مقدار ۵۶٪ وقتی مقاومت بتن از ۶۰ مگاپاسکال به ۱۲۰ مگاپاسکال افزایش داده شد، رشد داشت. به‌طور مشابه، ظرفیت باربری ستون SM۳۲ به مقدار ۳۸٪ در مقایسه با SN۳۱ رشد داشته است. ظرفیت باربری نهایی ستون SH۳۳ به مقدار ۵۱٪ وقتی مقاومت بتن از ۶۰ مگاپاسکال به ۱۲۰ مگاپاسکال افزایش داده شد، رشد یافته است. تأثیر مقاومت فشاری بتن در لنگر خمشی در نقطه‌ی بار بیشینه در جدول ۹ ارائه شده است. لنگر خمشی به ترتیب به میزان ۴۴٪ و ۳۹٪ برای دو گروه ۸ و ۹ با افزایش مقاومت فشاری بتن از ۳۰ مگاپاسکال به ۶۰ مگاپاسکال مشاهده شد. دوباره با افزایش مقاومت فشاری بتن از ۶۰ مگاپاسکال به ۱۲۰ مگاپاسکال، ظرفیت باربری برای گروه ۸ به مقدار ۶۱٪ و برای گروه ۹ به مقدار ۵۳٪ افزایش داشته است. میانگین افزایش نیروی محوری بیشینه و لنگر خمشی متناظر با آن برای دو گروه با نسبت‌های برون محوری مختلف به ترتیب ۴۰٪ و ۴۲٪ بوده است. این در حالی است که مقاومت فشاری بتن از ۶۰ مگاپاسکال به ۱۲۰ مگاپاسکال افزایش داده شده است. با این حال، شکل پذیری ستون‌ها به‌طرز قابل توجهی با افزایش مقاومت فشاری بتن کاهش یافته است.

۵.۴. تأثیر فاصله‌ی میلگردهای عرضی

هدف اصلی استفاده از میلگرد عرضی در ستون‌های مرکب SRC، فراهم آوردن محصورشوندگی بتن به منظور جاوگیری از کنده شدن بتن اطراف پروفیل فولادی و تأمین شرایط مناسب تکیه‌گاهی برای میلگردهای طولی جهت ممانعت از کمانش میلگردها بوده است. میلگرد عرضی همچنین می‌تواند باعث افزایش ظرفیت برشی مقطع شود. بنابراین، فاصله‌ی بین خاموت، پارامتر کلیدی و تأثیرگذار در ظرفیت نهایی و رفتار ستون‌هاست. تأثیر فاصله‌ی بین خاموت‌ها با تغییر در نسبت فاصله‌ی خاموت (S) به عمق مقطع ستون (D) مطالعه شده است. سه مقدار نسبت S/D برابر با ۰٫۱، ۰٫۲ و ۰٫۴ مطابق با جدول ۱۰ در مطالعه‌ی پارامتریک به منظور تعیین تأثیر پارامتر فاصله‌ی میلگردهای عرضی در رفتار کلی سیستم در نظر گرفته شده است.

۱.۵.۴. پاسخ نیرو - تغییر مکان محوری

شکل ۱۶، منحنی نیرو - تغییر مکان محوری ستون‌های گروه ۱۰ را نشان می‌دهد. شاخه‌ی صعودی منحنی برای تمام ستون‌های گروه ۱۰، رفتار مشابهی را نشان داده است. از طرف دیگر، رفتار تسلیم از فاصله‌ی بین میلگردهای عرضی متأثر می‌شود. مطابق شکل مذکور مشاهده می‌شود که تسلیم پس از بار بیشینه با فاصله‌ی بین میلگردهای عرضی متأثر است. ستون SN۳۴ ناحیه‌ی بیشینه‌ی نسبتاً تخت و مسطحی در مقایسه با ستون SN۳۶ از خود نشان می‌دهد. ستون‌های



شکل ۱۵. تأثیر مقاومت فشاری بتن بر منحنی نیرو - تغییر مکان محوری.

ستون‌های مرکب با بتن با مقاومت بالا نشان داد که شیب شدید به‌وجود آمده در بخش صعودی منحنی به دلیل مدول کشسانی بالا بوده است. ستون‌های SH۳۰ و SH۳۳ با بتن با مقاومت ۱۲۰ مگاپاسکال نیز شیب شدید در بخش نزولی در مقایسه با سایر ستون‌ها داشته‌اند. با وجود این، ستون‌های ساخته شده از بتن با مقاومت بالا نشان دادند که نسبت به ستون ساخته شده با بتن معمولی و بتن با مقاومت کم برای یک وضعیت خاموت‌گذاری یکسان، وضعیت تردی داشته‌اند.

۲.۴.۴. بار بیشینه و لنگر خمشی متناظر با آن

اثر مقاومت بتن در ظرفیت نهایی ستون در جدول ۹ ارائه شده است. ظرفیت بار محوری نهایی ستون SM۲۹ به مقدار ۴۲٪ در مقایسه با ستون SN۲۸، وقتی که مقاومت فشاری بتن از ۳۰ مگاپاسکال به ۶۰ مگاپاسکال تغییر کرده است، افزایش

جدول ۹. تأثیر مقاومت بتن در بار بیشینه و لنگر خمشی.

گروه	نمونه	L/D	S/D	e/D	مقاومت بتن		نهایی		درصد اختلاف	
					بار (kN)	لنگر (kN.m)	کرنش	تغییر مکان (mm)	نیرو (%)	لنگر خمشی (%)
گروه ۸	SN۲۸	۶	۰٫۵	۰٫۱	۱۲۲۶	۷۷٫۲	۲۳۳۳	۱۳	-	-
	SM۲۹	۶	۰٫۵	۰٫۱	۱۷۳۹	۱۱۱	۲۶۶۷	۱۴	۴۲	۴۴
	SH۳۰	۶	۰٫۵	۰٫۱	۲۷۲۱	۱۸۰	۳۱۱۷	۱۶	۵۶	۶۱
گروه ۹	IN۳۱	۶	۰٫۵	۰٫۳	۷۸۵	۱۳۳	۲۹۳۳	۲۰	-	-
	IM۳۲	۶	۰٫۵	۰٫۳	۱۰۸۲	۱۸۵	۳۰۲۷	۲۱	۳۸	۳۹
	IH۳۳	۶	۰٫۵	۰٫۳	۱۶۳۶	۲۸۳	۳۰۸۲	۲۳	۵۱	۵۳

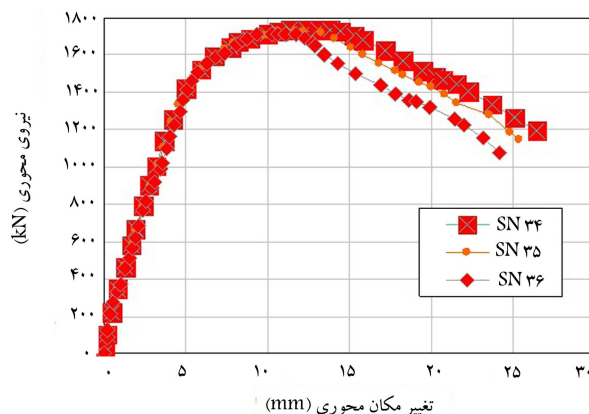
جدول ۱۰. مشخصات ستون‌ها برای بررسی تأثیر فاصله‌ی بین میلگردهای عرضی (S/D).

گروه	نمونه	مقطع (mm)	طول (mm)	L/D	S/D	e/D	پیروفل فولادی		مقاومت بتن		A_n (%)	A_s (%)
							(mm)	(mm)	(MPa)	(%)		
گروه ۱۰	SN۳۴	۵۰۰	۳۰۰۰	۶	۰٫۵	۰٫۱	۳۰۰ × ۳۰۰ × ۲۶ × ۲۸	۳۰	۱۰	۰٫۶	۱۰	
	SN۳۵	۵۰۰	۳۰۰۰	۶	۰٫۵	۰٫۲	۳۰۰ × ۳۰۰ × ۲۶ × ۲۸	۶۰	۱۰	۰٫۶	۱۰	
	SN۳۶	۵۰۰	۳۰۰۰	۶	۰٫۵	۰٫۴	۳۰۰ × ۳۰۰ × ۲۶ × ۲۸	۳۰	۱۰	۰٫۶	۱۰	
گروه ۱۱	SM۳۷	۵۰۰	۳۰۰۰	۶	۰٫۵	۰٫۱	۳۰۰ × ۳۰۰ × ۲۶ × ۲۸	۶۰	۱۰	۰٫۶	۱۰	
	SM۳۸	۵۰۰	۳۰۰۰	۶	۰٫۵	۰٫۲	۳۰۰ × ۳۰۰ × ۲۶ × ۲۸	۶۰	۱۰	۰٫۶	۱۰	
	SM۳۹	۵۰۰	۳۰۰۰	۶	۰٫۵	۰٫۴	۳۰۰ × ۳۰۰ × ۲۶ × ۲۸	۶۰	۱۰	۰٫۶	۱۰	

نسبت‌های انتخاب شده‌ی ۰٫۱، ۰٫۲ و ۰٫۴ محاسبه شده است. ظرفیت باربری محوری نهایی ستون‌های SN۳۵ و SN۳۴ در مقایسه با ستون SN۳۶ به ترتیب ۲٪ و ۴٪ افزایش داشته است. به‌طور مشابه، ظرفیت باربری محوری نهایی ستون‌های SM۳۸ و SM۳۷ نسبت به ستون SM۳۹ به ترتیب ۳٪ و ۴٪ بیشتر بوده است.

۳.۵.۴. تأثیر فاصله‌ی خاموت برای بتن با مقاومت بالا

باید اذعان داشت که مقاومت زیاد، موجب رفتار ترد و شکننده می‌شود. در مورد ستون‌های مرکب مورد بحث، لازم است که به عضو اجازه‌ی تسلیم در حالت شکل‌پذیر داده شود و از شکست ترد جلوگیری شود. در مطالعه‌ی حاضر، یک مقایسه به منظور شبیه‌سازی ستون با مصالح پرمقاومت و فواصل مختلف خاموت انجام شده است. ابتدا، ستون SH۱۳ با بتن با مقاومت ۱۲۰ مگاپاسکال و فولاد با تنش تسلیم ۳۵۰ مگاپاسکال و فاصله‌ی خاموت ۲۵۰ میلی‌متر شبیه‌سازی شده است. دوباره، ستون مذکور با بتن با مقاومت ۱۲۰ مگاپاسکال و فولاد با تنش تسلیم ۹۱۳ مگاپاسکال با نام SHH۱۳ شبیه‌سازی و تحلیل شد. ستون SHH۱۳ برای دو فاصله‌ی خاموت برابر با ۲۵۰ میلی‌متر و ۱۲۵ میلی‌متر تحلیل شده است. در شکل ۱۷، منحنی‌های نیرو - تغییر مکان محوری برای ستون‌های SH۱۳ و SHH۱۳ مشاهده می‌شود که مطابق آن ستون SHH۱۳ در وضعیت ترد و شکننده تسلیم شده است. این مطلب مربوط به زمانی است که فاصله‌ی بین خاموت برابر با ۲۵۰ میلی‌متر در نظر گرفته شود. از طرفی دیگر، با کاهش فاصله‌ی خاموت از ۲۵۰ میلی‌متر به ۱۲۵ میلی‌متر، مود تسلیم از حالت ترد به حالت شکل‌پذیر تغییر یافته و دلیل آن نیز محصورشدگی بتن است. این امر موجب افزایش و بهبود شکل‌پذیری ستون‌های با مصالح پرمقاومت می‌شود. وقتی فاصله‌ی خاموت از ۲۵۰ میلی‌متر به ۱۲۵ میلی‌متر تقلیل یافته است، افزایش



شکل ۱۶. تأثیر فاصله‌ی میلگردهای عرضی بر پاسخ نیرو - تغییر مکان ستون‌های گروه ۱۰.

SN۳۴، SN۳۵ و SN۳۶ با سه نسبت فاصله‌ی خاموت شبیه‌سازی شدند. شاخص شکل‌پذیری ستون‌های اخیر در گروه ۱۰ با کاهش فاصله‌ی بین میلگردها مطابق با جدول ۱۱ افزایش یافته است. درصد افزایش شکل‌پذیری ستون SN۳۴ نسبت به دو ستون SN۳۵ و SN۳۶ به ترتیب ۱۱٪ و ۲۲٪ بوده است. شاخص شکل‌پذیری مطابق با آنچه پیشتر تعریف شد، نسبت بین تغییر مکان در نقطه‌ی ۷۰٪ بار بیشینه در بخش نزولی منحنی به تغییر مکان در بار بیشینه است.

۳.۵.۴. بار بیشینه برای فواصل مختلف خاموت

تأثیر فاصله‌ی بین میلگردهای عرضی در ظرفیت ستون‌های مرکب در جدول ۱۲ بررسی شده است. افزایش در ظرفیت باربری در درصدهای مختلف برای

جدول ۱۱. شاخص شکل پذیری ستون در گروه ۱۰.

نمونه	L/D	S/D	A _s (%)	مقاومت بتن (MPa)	ظرفیت محوری (kN)	تغییر مکان در بار بیشینه (mm)	تغییر مکان در ۷۰٪ بار بیشینه (mm)	شاخص شکل پذیری
SN۳۴	۶	۰٫۱	۱	۳۰	۱۷۶۶	۱۲٫۸۷	۲۷٫۸۳	۲٫۲
SN۳۵	۶	۰٫۲	۵	۳۰	۱۷۳۳	۱۲٫۳۷	۲۴٫۲۱	۲٫۰
SN۳۶	۶	۰٫۴	۱۰	۳۰	۱۶۹۹	۱۲٫۲۵	۲۲٫۱۰	۱٫۸

جدول ۱۲. تأثیر فاصله‌ی بین میله‌گردهای عرضی در بار بیشینه.

نمونه	L/D	S/D	A _s (%)	مقاومت بتن (MPa)	ظرفیت محوری (kN)	درصد افزایش بار (%)
SN۳۴	۶	۰٫۱	۱۰	۳۰	۱۷۶۶	۴
SN۳۵	۶	۰٫۲	۱۰	۳۰	۱۷۳۳	۲
SN۳۶	۶	۰٫۴	۱۰	۳۰	۱۶۹۹	۰
SM۳۷	۶	۰٫۱	۱۰	۶۰	۲۵۱۷	۴
SM۳۸	۶	۰٫۲	۱۰	۶۰	۲۴۹۴	۳
SM۳۹	۶	۰٫۴	۱۰	۶۰	۲۴۱۷	۰

جدول ۱۳. شاخص شکل پذیری ستون با مصالح با مقاومت معمولی و بالا.

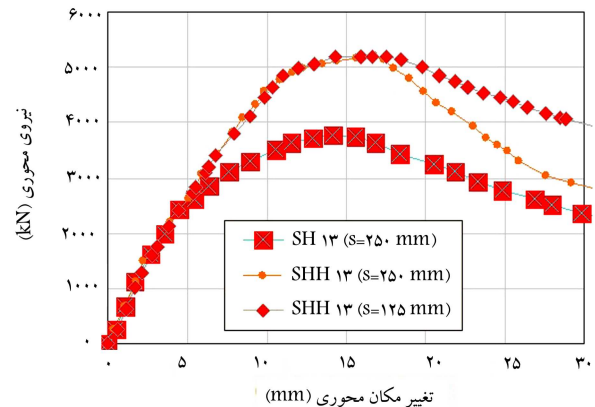
نمونه	L/D	S/D	A _s (%)	تنش تسلیم فولاد (MPa)	مقاومت بتن (MPa)	ظرفیت محوری (kN)	تغییر مکان در بار بیشینه (mm)	تغییر مکان در ۷۰٪ بار بیشینه (mm)	شاخص شکل پذیری
SH۱۳	۶	۰٫۵	۱۰	۳۵۰	۱۲۰	۲۷۱۸	۱۵٫۰۷	۲۶٫۳۲	۱٫۷۵
SHH۱۳	۶	۰٫۵	۱۰	۹۱۳	۱۲۰	۵۲۳۸	۱۶٫۹۴	۲۴٫۶۴	۱٫۴۵
SHH۱۳	۶	۰٫۲۵	۱۰	۹۱۳	۱۲۰	۵۳۱۹	۱۷٫۱۲	۳۴٫۹۹	۲٫۰۵

۵. نتیجه گیری

۱. افزایش در ظرفیت محوری ستون‌های کوتاه با تغییر در درصد فولاد به طور چشم‌گیری متأثر از مقاومت بتن است. نرخ افزایش در ظرفیت محوری برای بتن با مقاومت معمولی بیشتر از نمونه با بتن با مقاومت بالاست. نرخ رشد ظرفیت باربری ستون‌هایی که از بتن با مقاومت بالا ساخته شده‌اند، با افزایش درصد فولاد کاهش یافته و مزیت استفاده از درصد‌های بیشتر نسبت فولاد برای این‌گونه ستون‌ها از بین رفته است.

۲. شاخص شکل‌پذیری با افزایش درصد فولاد و همچنین کاهش فاصله بین میله‌گردهای عرضی در ستون مرکب افزایش می‌یابد. به طوری که برای یک فاصله‌ی خاموت یکسان، افزایش درصد فولاد مقطع از ۱٪ به ۲۰٪، سبب افزایش شاخص شکل‌پذیری به مقدار ۴۵٪ برای ستون‌های با مقاومت بتن ۶۰ MPa شده است. افزایش شاخص شکل‌پذیری صورت‌گرفته برای ستون‌های با مقاومت ۳۰ MPa به مقدار ۲۸٪ و برای ستون‌های با مقاومت ۱۲۰ MPa به میزان ۲۶٪ بوده است که نشان می‌دهد نرخ افزایش شکل‌پذیری ستون‌های با مقاومت بتن متوسط با افزایش درصد فولاد مقطع بیشتر شده است.

۳. ظرفیت محوری و سختی ستون‌های مرکب با افزایش نسبت لاغری کاهش می‌یابد؛ یا به عبارت دیگر، هر چه ستون لاغرتر باشد، تغییر مکان محوری با یک کاهش در بار محوری افزایش می‌یابد، به طوری که وقتی نسبت لاغری از ۶



شکل ۱۷. تأثیر فاصله‌ی بین خاموت‌ها بر منحنی نیرو - تغییر مکان محوری.

شکل‌پذیری ستون SHH۱۳ در حد ۴۱٪ بوده است. مطابق با جدول ۱۳ پرواضح است که استفاده از فولاد با مقاومت بسیار بالا موجب افزایش ۴۰٪ در مقاومت ستون SHH۱۳ با فاصله‌ی خاموت ۲۵۰ میلی‌متر در مقایسه با ستون SH۱۳ با فاصله‌ی خاموت ۲۵۰ میلی‌متر شده است. با وجود این، وقتی فاصله‌ی خاموت‌ها به میزان ۵۰٪ در ستون SHH۱۳ کاهش داده شود، شکل‌پذیری دوباره به دست می‌آید.

۷. ظرفیت باربری ستون با کاهش نسبت فاصله‌ی آرماتورهای عرضی به صورت جزئی افزایش می‌یابد، به طوری که با کاهش فاصله‌ی آرماتورهای عرضی از 0.4° به 0.2° ، ظرفیت باربری به میزان 2% و با کاهش این نسبت به اندازه‌ی 0.1° ، ظرفیت باربری به میزان 4% افزایش یافته است، که این افزایش درصد ظرفیت باربری ستون با افزایش مقاومت فشاری بتن تغییر چندانی نکرده است.
۸. در صورت استفاده از فولاد پر مقاومت با تنش تسلیم 913MPa ، تغییر فاصله‌ی خاموت از 250mm به 125mm ، باعث افزایش شکل‌پذیری ستون به میزان 41% شده است.
۹. افزایش تنش تسلیم فولاد از 350MPa به 913MPa سبب افزایش مقاومت ستون به میزان 40% شده است، ولی سبب خرابی ستون در وضعیت ترد و شکننده شده است که با کاهش فاصله‌ی خاموت به میزان 50% ، شکل‌پذیری دوباره به دست آمده است.
۴. ظرفیت باربری ستون مرکب با افزایش نسبت برون‌محوری به شدت کاهش می‌یابد، به طوری که با افزایش نسبت برون‌محوری به مقدار 0.1° به میزان 27% ، به مقدار 0.3° به میزان 54% و به مقدار 0.4° به میزان 61% ظرفیت باربری کاهش یافته است.
۵. نیروی محوری و سختی ستون مرکب به طور چشم‌گیری متأثر از مقاومت بتن است، به طوری که ظرفیت بار محوری نهایی ستون با افزایش مقاومت فشاری بتن از 30MPa به 60MPa ، به مقدار 42% و با افزایش مقاومت فشاری بتن به 120MPa ، به میزان 56% افزایش یافته است، که این مقادیر با افزایش نسبت برون‌محوری به صورت جزئی کاهش یافته‌اند. به همین ترتیب، مقادیر لنگرخمشی متناظر با بار بیشینه به ترتیب با افزایش مقاومت فشاری به میزان 44% و 61% افزایش یافته‌اند.
۶. شاخص شکل‌پذیری با کاهش فاصله بین میلگردهای عرضی افزایش می‌یابد، به طوری که وقتی نسبت فاصله‌ی آرماتورهای عرضی از 0.1° به 0.2° افزایش یافته است، شاخص شکل‌پذیری 11% و با افزایش فاصله‌ی آرماتورهای عرضی به 0.4° ، شاخص شکل‌پذیری 22% کاهش یافته است.

تقدیر و تشکر

پژوهش حاضر در نوشتار حاضر، با شماره‌ی گرنت BNUT925940001 در دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل انجام شده است، که بدین وسیله از حمایت انجام‌شده تقدیر و تشکر به عمل می‌آید.

پانویسها

1. steel reinforced concrete (SRC)
2. Abaqus
3. Mander
4. tie
5. ductility

منابع (References)

1. Chen, C.C. and Lin, N.J. "Analytical model for predicting axial capacity and behavior of concrete encased steel composite stub columns", *Journal of Constructional Steel Research*, **62**(5), pp. 424-433 (2005).
2. Mander, J.B., Priestley, M.J.N., Park, R. and et al. "Theoretical stress-strain model for confined concrete", *J. Struct. Eng ASCE*, **114**(8), pp. 1804-1826 (1988).
3. Xuhong, Zh. and Jiepeng, L. "Seismic behavior and strength of tubed steel reinforced concrete (SRC) short columns", *Journal of Constructional Steel Research*, **66**(7), pp. 885-896 (2010).
4. Soliman, K.Z., Arafa, A.I. and Elrakib, T.M. "Review of design codes of concrete encased steel short columns under axial compression", *HBRC Journal*, **9**(2), pp. 134-143 (2013).
5. An, Y.-F., Han, L.-H. and Roeder, Ch.W. "Flexural performance of concrete-encased concrete-filled steel tubes", *Magazine of Concrete Research*, **66**(5), pp. 249-267 (2014).
6. Han, L.-H., An, Y.-F., Roeder, Ch. and et al. "Performance of concrete-encased CFST box members under bending", *Journal of Constructional Steel Research*, **106**, pp. 138-153 (2015).
7. An, Y.-F., Han, L.-H. and Roeder, Ch. "Performance of concrete encased CFST box stub columns under axial compression", *Structures*, **3**, pp. 211-226 (2015).
8. ACI 318-11, "Building code requirements for structural concrete and commentary", Detroit (USA): American Concrete Institute (2011).

9. Barr, B. and Lee, M.K. "Modelling the strain-softening behaviour of plain concrete using a double-exponential model", *Magazine of Concrete Research*, **55**(4), pp. 343-353 (2003).
10. Shen, J.M., Wang, C.Z. and Jiang, J.J. "Finite element method of reinforced concrete and limited analysis of plates and shells", Tsinghua University Press, Beijing, China, (in Chinese) (1993).
11. Jung, I.-K., Park, S.-E. and Kim, D.-H. "Seismic Performance Evaluation of SRC Composite Column using Direct Displacement Based Design Method", *Journal of the Korean Association for Spatial Structures*, **12**(3), pp. 63-70 (2012).
12. AISC, "Specification for Structural Steel Buildings", American Institute of Steel Construction, ANSI/AISC 360-16, Chicago, USA (2016).