

# Numerical Investigation of Behavior of Steel-Reinforced Concrete Columns with Cruciform Steel Core under Eccentric Loading

Mohsen Ahmadi

Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Babol Branch, Islamic Azad University, Babol, Iran

Mahdi Nematzadeh\*

Associate Professor, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering and Technology, University of Mazandaran, Babolsar, Iran

[m.nematzadeh@umz.ac.ir](mailto:m.nematzadeh@umz.ac.ir)

## Abstract

Steel reinforced concrete (SRC) columns have become very popular in recent years due to their many advantages. In this study, to investigate the behavior of SRC columns with a cruciform steel section at their core, the ductility index and factors affecting it were investigated. Also, by calculating the necessary equations based on the plastic stress distribution method, a simple and practical method for designing these columns was provided. Accordingly, a finite element model was created using ABAQUS software for numerical study and was then validated with the results of a previous experimental study. A total of 16 columns with cruciform steel cores were analyzed for the present study. The effect of variables such as steel core percentage, concrete compressive strength, stirrup spacing, slenderness ratio, and load eccentricity ratio on the ductility index of these columns was discussed. The results showed that with increasing the eccentricity ratio, the bearing capacity decreases but the ductility index increases due to the change in behavior from compressive to flexural, such that as the eccentricity ratio increased from 0.1 to 0.4, the bearing capacity decreased by 59.1% while the ductility index increased by 28.2%.

**Keywords:** Composite Column, SRC, Concrete Confinement, Load-Bearing Capacity, Eccentric Loading

---

\* Corresponding Author

Ahmadi, M., Nematzadeh, M. Numerical Investigation of Behavior of Steel-Reinforced Concrete Columns with Cruciform Steel Core under Eccentric Loading. *Journal of Concrete Structures and Materials*, 2021; 6(2): 61-79. <http://doi.org/10.30478/jcsm.2022.314666.1233>

2538-5828/ © 2021 The Authors. Published by [Iranian Concrete Society](#)

This is an open access article under the CC BY license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

# بررسی عددی رفتار ستون های بتنی مسلح شده با فولاد با هسته صلیبی تحت بار با خروج از مرکزیت

دریافت مقاله: ۱۴۰۰-۰۸-۲۵

پذیرش مقاله: ۱۴۰۰-۱۱-۱۶

محسن احمدی

استادیار، گروه مهندسی عمران، واحد بابل، دانشگاه آزاد اسلامی، بابل، ایران

مهدی نعمت زاده

دانشیار، گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی و فناوری، دانشگاه مازندران، بابل، ایران

[m.nematzadeh@umz.ac.ir](mailto:m.nematzadeh@umz.ac.ir)

(نویسنده مسئول)

## چکیده

ستون های بتنی مسلح شده با فولاد SRC به دلیل مزایای فراوانی که دارند، استفاده از آنها در سال های اخیر رواج زیادی پیدا کرده است. در این تحقیق، به جهت بررسی رفتار ستون های SRC با هسته فولادی صلیبی، شاخص شکل پذیری و عوامل موثر بر آن مورد بررسی قرار گرفته و همچنین با محاسبه روابط لازم بر اساس روش توزیع تنش پلاستیک، روشی ساده و کاربردی برای طراحی این ستون ها ارائه گردید. بر همین اساس، یک مدل المان محدود به کمک نرم افزار آباکوس به جهت مطالعه عددی ایجاد شد که با نتایج مدل آزمایشگاهی اعتبارسنجی گردید. در مجموع ۱۶ ستون با هسته فولادی صلیبی برای مطالعه عددی تحلیل گردیدند که متغیرهایی از قبیل درصد هسته فولادی، مقاومت فشاری بتن، نسبت فاصله میلگردهای عرضی، نسبت لاغری و نسبت برون محوری نیرو بر شاخص شکل پذیری این ستون ها مورد بحث و ارزیابی قرار گرفتند. نتایج نشان دهنده این مطلب بوده که با افزایش نسبت برون محوری، ظرفیت باربری کاهش ولی شاخص شکل پذیری به دلیل تغییر رفتار از حالت فشاری به خمشی افزایش می یابد به طوری که با افزایش نسبت برون محوری از ۰/۱ به ۰/۴ ظرفیت باربری به مقدار ۵۹/۱٪ کاهش یافته ولی شاخص شکل پذیری ۲۸/۲٪ افزایش می یابد.

واژه های کلیدی: ستون مرکب، SRC، مدل عددی، شاخص شکل پذیری، ظرفیت باربری، بار خارج از مرکز

امروزه استفاده از ستون‌های بتنی مسلح شده با فولاد (SRC) به دلیل مزایای فراوان معماری، سازه‌ای و اقتصادی که نسبت به حالت ستون بتنی و یا فولادی تنها دارند به سرعت در حال گسترش است. نیاز مداوم به بهینه‌سازی مصالح و کاهش ابعاد و اندازه مورد نیاز و همچنین به دلیل دارا بودن ظرفیت باربری بالا، سختی زیاد، شکل پذیری، عدم وقوع کمانش موضعی اجزای فولادی و مقاومت مناسب در برابر آتش‌سوزی به دلیل وجود بخش‌های فولادی در بتن، سبب شده تا استفاده از این ستون‌ها به‌ویژه در ساختمان‌های بلند رواج زیادی پیدا نماید [1-5].

در سال‌های اخیر، مطالعاتی بر روی ستون‌های مرکب SRC صورت پذیرفته است. به عنوان نمونه می‌توان به تحقیقات Han و همکاران [6,7] اشاره نمود. یک مدل عددی توسط نرم‌افزار آباکوس ایجاد شده و ستون SRC با هسته فولادی لوله‌ای مدلسازی شد که با داده‌های آزمایشگاهی اعتبارسنجی شد. هدف از ایجاد این مدل عددی، بررسی عملکرد فشاری و خمشی آنها بود که برای دقت بیشتر، نواحی مختلف محصورشدگی بتن نیز در مدلسازی لحاظ شده و با بررسی‌های بعمل آمده ملاحظه گردید که هسته فولادی لوله‌ای دچار کمانش موضعی نشده و به مقاومت پلاستیک خود دست یافت. در نهایت با توجه به روش توزیع تنش پلاستیک رابطه‌ای برای محاسبه ظرفیت فشاری و خمشی مقطع SRC ارائه گردید. Shi و همکاران [8] ستون‌های مرکب با هسته‌های فولادی متفاوت مانند: صلیبی، I و لوله‌ای را به‌صورت آزمایشگاهی و عددی مورد بحث و بررسی قرار دادند. در این بررسی، ۶ نمونه آزمایشگاهی تحت پیچش قرار گرفته و پارامترهای مورد بررسی شامل نوع هسته فولادی و مسیر بارگذاری بوده‌اند که با مدلسازی عددی توسط نرم‌افزار آباکوس مورد بررسی قرار گرفته‌اند. نتایج حاکی از این مطلب بود که شکست نمونه‌های مربعی بیشتر در قسمت بالایی نمونه‌ها رخ داده و تغییر در شکل هسته فولادی و مسیر بارگذاری، تاثیری در آن نداشته است. در نهایت روابطی جهت تعیین ظرفیت باربری پیچشی اینگونه مقاطع پیشنهاد گردید. همچنین Yang و همکاران [9] رفتار محوری و مقاومت نهایی ستون‌های مرکب با هسته فولادی صلیبی را به‌صورت آزمایشگاهی مورد بررسی قرار داده و برای این منظور ۱۱ نمونه مورد آزمایش قرار گرفتند و با مدلسازی عددی توسط نرم‌افزار آباکوس مقایسه گردیدند. برای مدلسازی بتن فشاری از روش Mander و همکاران [10] استفاده شد. نتایج بیانگر این مطلب بود که در تمامی نمونه‌ها، شکست با خردشدن بتن توأم بوده و مقاومت محوری نمونه‌ها پس از نقطه اوج بار، افت ناگهانی نداشته و شکل‌پذیری فوق‌العاده‌ای را نشان داده‌اند.

Shi و همکاران [11] عملکرد مقاطع مرکب را تحت بارهای خمشی مورد بررسی قرار داده‌اند. برای این منظور ۶ نمونه آزمایشگاهی مورد آزمایش قرار گرفته که پارامترهای مورد بررسی شامل: هسته فولادی مقطع (مقطع I و صلیبی)، جهت بارگذاری (حول محور قوی و ضعیف) و نسبت دهانه برشی بوده‌اند که نتایج بدست آمده با مدلسازی عددی ایجاد شده در نرم‌افزار آباکوس مورد بررسی قرار گرفته‌اند. نتایج نشان داد که ظرفیت خمشی نمونه‌ها حول محور قوی ۱۰٪ بیشتر از آن حول محور ضعیف بوده و این ظرفیت خمشی با هسته فولادی I شکل کمی بزرگتر از نمونه‌های با هسته صلیبی می‌باشد. در نهایت رابطه‌ای ساده جهت پیش‌بینی ظرفیت خمشی این مقاطع پیشنهاد گردید.

بر اساس تحقیقاتی که تا کنون صورت گرفته، رفتار ستون‌های SRC را می‌توان وابسته به عوامل متعددی دانست. منابع ارزشمندی در این باره وجود دارند که برخی از آنها در بالا ذکر گردید ولی با توجه به گستردگی موضوع، به نظر می‌رسد هنوز می‌توان تحقیقات بیشتری را در این باره انجام داد. لذا به جهت بررسی رفتار ستون‌های SRC با هسته فولادی صلیبی با توجه به اینکه تحقیقات کمی در این مورد صورت پذیرفته، ابتدا از داده‌های مربوط به نتایج آزمایشگاهی انجام شده توسط Naghipour و همکاران [12] که بر روی تعدادی ستون SRC با پروفیل فولادی متفاوت و برون محوری‌های مختلف انجام گردید استفاده نموده و سپس نمونه‌ها توسط نرم‌افزار آباکوس مدل‌سازی و اعتبارسنجی گردیدند تا بتوان بر روی مدل عددی مطالعه صورت پذیرد. یک مطالعه پارامتریک بر روی ۱۶ ستون

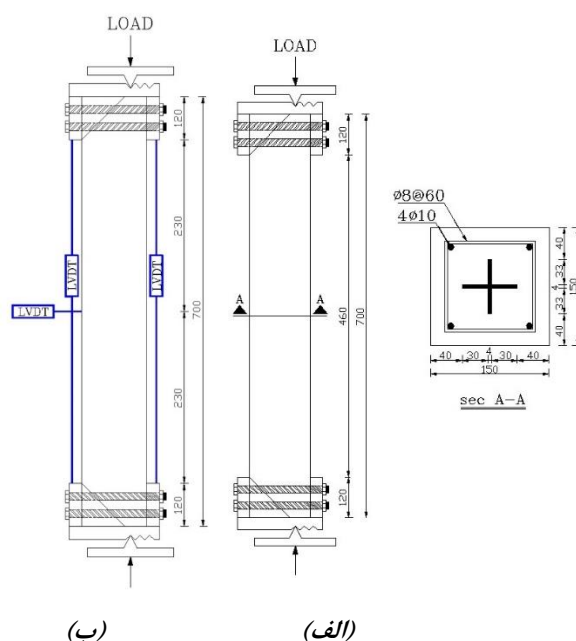
SRC با هسته فولادی صلیبی انجام گرفته و متغیرهای هندسی و مصالح شامل: درصد هسته فولادی، مقاومت فشاری بتن، نسبت فاصله میلگردهای عرضی، نسبت لاغری و نسبت برون محوری نیرو مورد بحث و بررسی قرار گرفت. در ابتدا شکل پذیری آنها محاسبه و مورد ارزیابی قرار گرفته و سپس به جهت ترسیم منحنی‌های اندرکنش نیروی محوری- لنگر خمشی ستون‌های SRC با هسته فولادی صلیبی با استفاده از روش توزیع تنش پلاستیک، روابط مورد نیاز بدست آمده و منحنی‌های بدون بعدی پیشنهاد گردید که با گسترش این منحنی‌ها می‌توان بصورت ساده و کاربردی به طراحی این ستون‌ها پرداخت.

## ۲- خلاصه تحقیقات آزمایشگاهی

نقی پور و همکاران [12] یک مطالعه عددی و آزمایشگاهی بر روی تعدادی از نمونه‌های ستون SRC با هسته فولادی صلیبی و H شکل انجام دادند که جزییات نمونه‌های آزمایشگاهی مربوط به ستون SRC با هسته فولادی صلیبی در شکل ۱ نشان داده شده است. همانگونه که در شکل ملاحظه می‌گردد طول خالص نمونه‌ها ۴۶۰ mm و سطح مقطع آن ۱۵۰×۱۵۰ mm است. از ۴Φ۱۰ بعنوان میلگرد طولی و ۸Φ۸@۶۰ mm بعنوان میلگرد عرضی استفاده گردیده است. پوشش خالص بتن بر روی خاموت‌ها ۱۵ mm می‌باشد و مطابق شکل از صفحات شیاردار فولادی در دو انتهای ستون‌ها جهت اعمال مقادیر مختلف نسبت برون محوری (e/D) شامل ۰٫۴ (e = ۶۰ mm)، ۰٫۵۵ (e = ۸۲٫۵ mm) و ۰٫۷ (e = ۱۰۵ mm) استفاده گردید و فاصله برون محوری e نسبت به مرکز پلاستیک مقطع اندازه گیری می‌شود. در جدول ۱ مشخصات نمونه‌ها به همراه نام آنها ذکر شده است.

جدول ۱: مشخصات ستون‌های SRC با هسته فولادی صلیبی مورد آزمایش [12]

شماره نمونه‌ها	ابعاد ستون (mm)	e (mm)
SRC-X60	۱۵۰×۱۵۰×۷۰۰	۶۰
SRC-X82	۱۵۰×۱۵۰×۷۰۰	۸۲٫۵
SRC-X105	۱۵۰×۱۵۰×۷۰۰	۱۰۵



شکل ۱: جزییات نمونه‌های آزمایشگاهی (الف) ابعاد کلی نمونه‌ها، (ب) محل نصب LVDTs [12]

سه عدد LVDTs جهت اندازه‌گیری تغییرشکل‌های جانبی و محوری نصب گردیدند. طرح اختلاط مورد استفاده برای ساخت بتن نمونه‌ها بر اساس آیین‌نامه [13] ACI211.1-91 بوده که میانگین مقاومت فشاری نمونه استوانه‌ای در سن ۲۸ روزه نمونه‌ها برابر با ۳۰ MPa اندازه‌گیری شده است. مشخصات فولاد مصرفی بر اساس آزمایش کشش مطابق استاندارد [14] ASTM E8/E8M صورت گرفته که نتایج آن در جدول ۲ ارائه گردید، همچنین تصویر نمونه آزمایشگاهی در حال انجام آزمایش به همراه تکیه‌گاه‌های مفصلی در شکل ۲ نشان داده شده است.

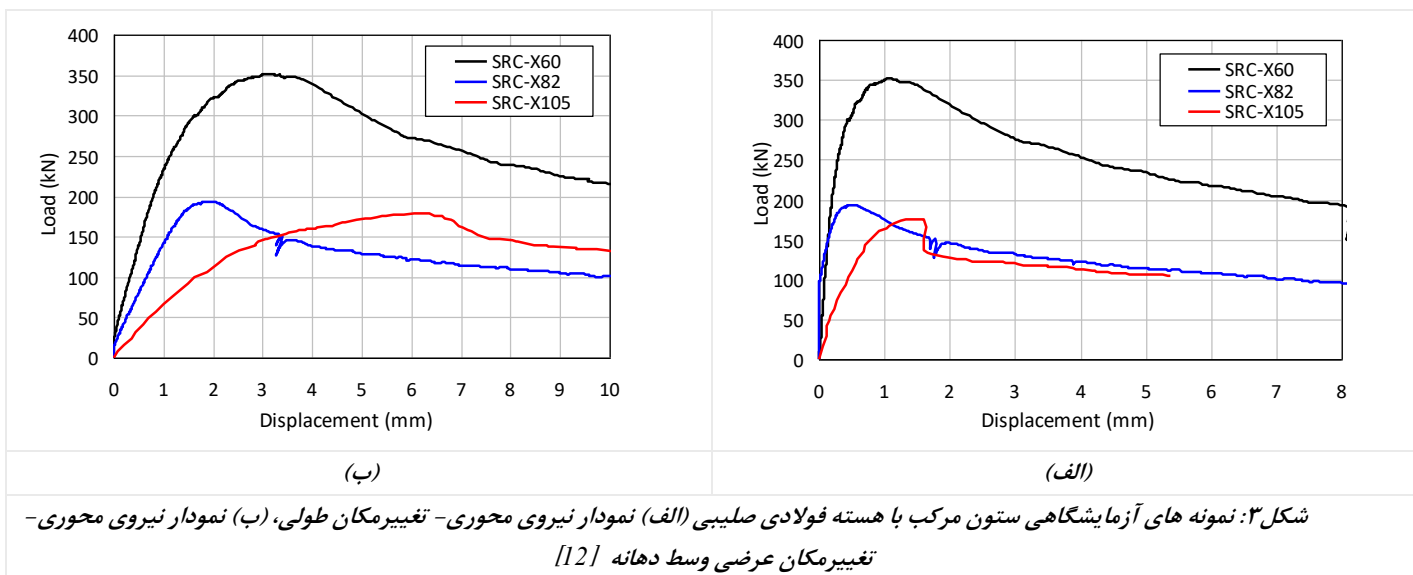
جدول ۲: نتایج آزمایش کشش ورق و میلگردهای فولادی [12]

مصالح	تنش تسلیم (MPa)	تنش نهایی (MPa)
پروفیل فولادی	۲۴۳	۳۶۹
میلگرد طولی	۳۰۲	۴۳۲



شکل ۲: نمونه آزمایشگاهی به همراه تجهیزات اندازه‌گیری [12]

نتایج نمونه‌های ستون SRC با هسته فولادی صلیبی برای سه حالت برون محوری به صورت نمودارهای نیروی محوری- تغییرمکان محوری و نیروی محوری- تغییرمکان جانبی در وسط دهانه در شکل ۳ نشان داده شده و با هم مقایسه گردیدند. در نمونه‌های SRC-X60 و SRC-X82 حالت تسلیم و شکست، بصورت ترک در وجه کششی و خردشدگی بتن در وجه فشاری در وسط دهانه رخ داده و مطابق شکل، تغییرات نیرو با شیب زیاد به سمت بار حداکثر حرکت می‌نماید در صورتی که در نمونه SRC-X105 پس از رسیدن به بار حداکثر، بطور ناگهانی ظرفیت دارای افت شدید شده و همچنین ترک خوردگی و شکست در مجاورت تکیه‌گاه مفصلی مشاهده گردید.



### ۳- مدل المان محدود

عملکرد ستون های SRC با هسته فولادی صلیبی با استفاده از مدل المان محدود توسط نرم افزار آباکوس مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. در مدل عددی ایجاد شده، از ابعاد و مشخصات هندسی و مصالح مطابق نمونه های آزمایشگاهی استفاده شده که جزئیات آن در بخش ۲ توضیح داده شده است. در مدل المان محدود در نرم افزار آباکوس، هسته فولادی با استفاده از المان پوسته ای S4R که در هر گره دارای سه درجه آزادی دورانی و سه درجه آزادی انتقالی است و از یک نقطه انتگرالی روی میان صفحه خود استفاده می کند و بتن با استفاده از المان C3D8R که یک المان محیط پیوسته ی سه بعدی شامل هشت گره انتگرال کاهش یافته با سه درجه آزادی انتقالی در هر گره می باشد مدل سازی شده و میلگردهای طولی و عرضی از المان سه بعدی دو گره ای T3D2 استفاده شده اند. برای اطمینان از تماس کافی بین بتن و آرماتورها، میلگردهای طولی و عرضی بعنوان بخش مدفون شده در بلوک بتنی تعریف شده اند. به منظور معرفی تماس هسته فولادی با بتن، اندرکنش تماس سخت<sup>۱</sup> و مدل اصطکاک موهر-کلمب<sup>۲</sup> در جهت عمودی با استفاده از گزینه تماس سطح به سطح تعریف گردید. چنین تماسی به یک جفت سطح اصلی (مقید کننده) و فرعی (مقید شده) نیاز دارد که در آن، سطح فرعی باید با مواد نرم تر و مش ریزتر در مقایسه با سطح اصلی بوده تا خطاهای عددی کاهش یابد، از این رو سطح بتنی بعنوان سطح فرعی و سطح هسته فولادی صلیبی به عنوان سطح اصلی در نظر گرفته شده اند [15-18].

همچنین در قسمت فوقانی و تحتانی نمونه، دو صفحه صلب فولادی قرار داده شد که توسط المان R3D4 تعریف گردید و بر روی سطح بتن بصورت چسب<sup>۳</sup> متصل گردید. و بر روی آن یک نقطه مرجع<sup>۴</sup> معرفی شده که فاصله این نقطه تا مرکز ستون بیانگر مقدار برون محوری بار اعمالی می باشد که شرایط مرزی مفصلی در قسمت فوقانی و تحتانی بر روی نقطه مرجع با مقید کردن درجات آزادی انتقالی در سه راستا اعمال گردیده و همچنین نیرو به روش کنترل تغییر مکان با توجه به برون محوری مورد نظر به سطح بالای ستون بر روی نقطه مرجع اعمال گردید.

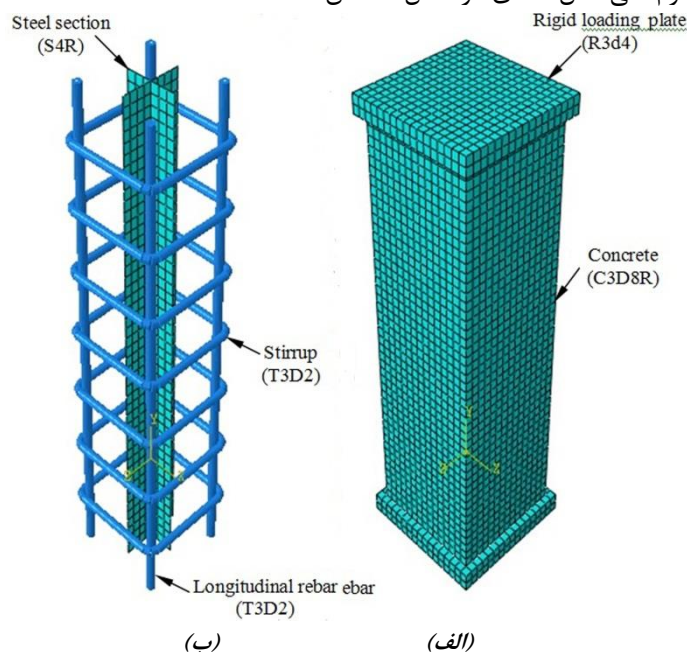
<sup>1</sup>-Hard contact interaction

<sup>2</sup>-Mohr-Coulomb friction model

<sup>3</sup>-Tie

<sup>4</sup>-Reference point

مدل خسارت پلاستیک برای مصالح بتن استفاده شده که در آن دو اصل اساسی ترک خوردگی کششی و خرد شدگی فشاری را در مکانیزم گسیختگی در نظر می‌گیرد. بر طبق ACI318-11 [19] مقدار  $\nu = 0.2$  برای بتن لحاظ شده و برای بخش فولادی از منحنی تنش- کرنش هسته فولادی و آرماتورها که از آزمایش کشش بر روی مصالح بدست آمده است استفاده گردیده و همچنین  $E = 200 \text{ GPa}$  و  $\nu = 0.3$  در نظر گرفته شده است [12]. یک آنالیز حساسیت بر روی مدل المان محدود به منظور بهینه نمودن اندازه مش در راستای کسب رفتار دقیق ستون SRC با کمترین زمان تحلیل صورت گرفت که با بررسی بعمل آمده، نسبت ابعادی المان ۱:۱:۱ که ابعاد هر ضلع المان ۱۰ mm می‌باشد بعنوان اندازه مش بهینه برای مدل عددی بلوک بتنی در نظر گرفته شده است. المان‌های اختصاص یافته برای مصالح و فرم کلی مدل عددی در شکل ۴ نشان داده شده است.



شکل ۴: مدل اجزاء محدود نمونه آزمایشگاهی (الف) سیستم کلی مدل عددی، (ب) بخش فولادی مدل عددی صلبی

رابطه تنش- کرنش مورد استفاده برای رفتار فشاری بتن، مدل پیشنهادی مندر و همکاران [10] می‌باشد. این مدل برخلاف خیلی از مدل‌های موجود، برای همه شکل‌های هندسی مقطع و همه سطوح از محصورشدگی، قابل کاربرد است.

$$f_c = \frac{f'_{cc} \cdot x \cdot r}{r - 1 - x'} \quad (1)$$

در رابطه فوق  $x = \epsilon_c / \epsilon_{cc}$  می‌باشد که  $f'_{cc}$  مقاومت فشاری بتن محصورشده و  $\epsilon_{cc}$  کرنش متناظر با آن می‌باشد که مطابق روابط زیر قابل محاسبه است:

$$f'_{cc} = f'_{co} \left[ 2.254 \sqrt{1 + \frac{7.94 f'_L}{f'_{co}}} - \frac{2 f'_L}{f'_{co}} - 1.254 \right]$$

$$\epsilon_{cc} = \epsilon_{co} \left[ 1 + 5 \left( \frac{f'_{cc}}{f'_{co}} - 1 \right) \right] \quad (2)$$



در روابط فوق  $f'_{co}$  مقاومت فشاری محصورنشده بتن بر حسب MPa و  $\varepsilon_{co}$  کرنش متناظر با آن می‌باشد که می‌توان  $\varepsilon_{co} = 0.002$  را در نظر گرفت.  $f'_L$  تنش موثر محصورشدگی جانبی است که با رابطه  $f'_L = K_e \cdot f_L$  ارائه شده و در آن  $K_e$  ضریب تاثیر محصورشدگی است. همچنین ضریب  $r$  مطابق روابط زیر قابل محاسبه است:

$$r = \frac{E_C}{E_C - E_{SEC}}, \quad E_C = 5000\sqrt{f'_{co}}, \quad E_{SEC} = \frac{f'_{cc}}{\varepsilon_{cc}} \quad (3)$$

رابطه تنش-کرنش مورد استفاده توسط An و همکاران [6] برای شبیه سازی رفتار بتن در کشش مطابق رابطه (4) می‌باشد:

$$\frac{\sigma_t}{\sigma_{t0}} = \frac{\varepsilon_t / \varepsilon_{t0}}{0.31\sigma_{t0}^2 [(\varepsilon_t / \varepsilon_{t0}) - 1]^{1.7} + \varepsilon_t / \varepsilon_{t0}} \quad (4)$$

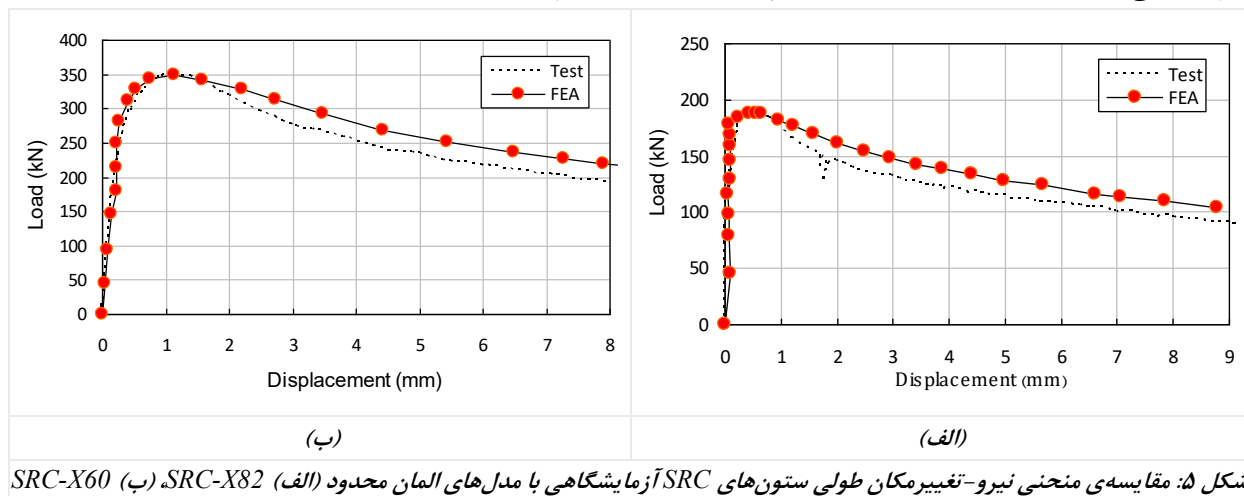
در رابطه فوق  $\varepsilon_{t0} = \sigma_{t0} / E_C$  و مقاومت ترک خوردگی کششی  $\sigma_{t0}$  توسط رابطه  $\sigma_{t0} = 1.4 \times (f'_c / 1.0)^{0.67}$  محاسبه می‌گردد که در آن  $E_C = 4730 \cdot \sqrt{f'_c}$  و  $f'_c$  مقاومت فشاری نمونه استوانه‌ای بر حسب مگاپاسکال می‌باشد.

#### 4- تایید مدل المان محدود

به جهت اعتبارسنجی مدل عددی، مقایسه‌ای بین نتایج عددی با نتایج آزمایشگاهی صورت گرفته است. بر همین اساس نتایج مدلسازی عددی با دو نمونه آزمایشگاهی SRC-X60 و SRC-X82 مطابق جدول 1 مورد مقایسه قرار گرفته است.

##### 4-1- رفتار نیروی محوری-تغییرمکان محوری

نتایج نمونه‌های آزمایشگاهی بصورت نمودارهای نیرو-تغییرمکان با نتایج حاصل از تحلیل المان محدود مقایسه گردیدند که این مقایسه‌ها در شکل 5 نشان داده شده است. نمودارهای نیرو-تغییرمکان محوری برای دو نمونه‌ی آزمایشگاهی نشان داده شده، با اختلاف ناچیزی در بار بیشینه با نمودارهای مدل عددی مشابه است که این اختلاف ناچیز را می‌توان در به وجود آمدن عیب در هنگام ساخت نمونه‌ها و همچنین فرض‌های مدلسازی دانست.



شکل 5: مقایسه‌ی منحنی نیرو-تغییرمکان طولی ستون‌های SRC آزمایشگاهی با مدل‌های المان محدود (الف) SRC-X82، (ب) SRC-X60

##### 4-2- ظرفیت محوری و کرنش محوری

حداکثر نیروی محوری و کرنش محوری متناظر با آن، از نتایج مدلسازی عددی استخراج شده و با نتایج آزمایشگاهی مقایسه گردیدند که بار حداکثر و کرنش محوری متناظر با آن برای نمونه‌ها در جدول 3 با ظرفیت و کرنش‌های محاسبه شده از تحلیل مدل عددی مقایسه گردیدند. نسبت بار حداکثر عددی به آزمایشگاهی  $P_{num}/P_{exp}$



برای نمونه‌ها از ۰/۹۹ تا ۰/۹۷ با مقدار میانگین ۰/۹۸ متغیر بوده که این مطلب در مورد نسبت کرنش محوری میانگین عددی به آزمایشگاهی  $\epsilon_{num}/\epsilon_{exp}$  در بار حداکثر برابر ۰/۸۹ می‌باشد. مقادیر میانگین ذکر شده در این جدول نشان دهنده عملکرد مناسب مدل عددی می‌باشد.

جدول ۳: مقایسه نتایج عددی و آزمایشگاهی

نمونه	بار حداکثر (kN)			کرنش در بار حداکثر		
	$P_{exp}$	$P_{num}$	$P_{num}/P_{exp}$	$\epsilon_{exp}$	$\epsilon_{num}$	$\epsilon_{num}/\epsilon_{exp}$
SRC-X60	۳۵۱٫۱	۳۴۸٫۶	۰٫۹۹	۳۲۱۰	۲۶۹۰	۰٫۸۳
SRC-X82	۱۹۳٫۲	۱۸۸٫۳	۰٫۹۷	۲۶۸۰	۲۵۴۱	۰٫۹۴
	مقدار متوسط		۰٫۹۸	مقدار متوسط		۰٫۸۹

### ۵- تجزیه و تحلیل

پس از اطمینان از عملکرد صحیح مدل عددی از نظر مدل رفتاری مصالح، رفتار صحیح اندرکرنش بین بخش‌های مختلف عضو و اعمال شرایط مرزی و بارگذاری، به جهت درک مناسب‌تر رفتار ستون‌های SRC با هسته صلیبی، مطالعه‌ای صورت پذیرفته و شاخص شکل‌پذیری محاسبه گردید. در این مطالعه، تاثیر عواملی مانند: درصد هسته فولادی، مقاومت فشاری بتن، فاصله میلگردهای عرضی، لاغری ستون و نسبت برون محوری مورد بحث و بررسی قرار گرفته و در مجموع ۱۶ ستون SRC تحلیل گردیدند که نتایج این تحلیل و مشخصات نمونه‌ها در جدول ۴ نشان داده شده است. در این جدول،  $L$  طول نمونه،  $D$  بعد ستون،  $S$  فاصله میلگردهای عرضی،  $A_s$  درصد فولاد،  $e$  برون محوری و  $f_c$  مقاومت فشاری نمونه استوانه‌ای استاندارد می‌باشد. بعنوان یک معیار برای بررسی شکل‌پذیری ستون‌های SRC، شاخص شکل‌پذیری ( $\mu$ ) در واقع نسبت تغییرمکان در نقطه‌ای نظیر ۰/۸۵ بار حداکثر در شاخه نزولی منحنی ( $\Delta_u$ ) به تغییرمکان نقطه تسلیم ( $\Delta_y$ ) تعریف می‌گردد:

$$\mu = \frac{\Delta_u}{\Delta_y} = f(A_s, f_c, \frac{S}{D}, \frac{L}{D}, \frac{e}{D}) \quad (5)$$

همانگونه که در جدول ۴ ملاحظه می‌گردد افزایش درصد هسته فولادی، سبب بهبود شکل‌پذیری و افزایش در ظرفیت باربری ستون مرکب می‌شود. در این جدول درصد هسته فولادی ۰/۱، ۰/۳ و ۰/۵ در نظر گرفته شده است. همانگونه که در جدول نشان داده شده است، با افزایش درصد هسته فولادی از ۰/۱ به ۰/۵ شاخص شکل‌پذیری به میزان ۲۶/۱٪ و ظرفیت باربری به مقدار ۲۸/۷٪ افزایش می‌یابند.

افزایش مقاومت فشاری بتن سبب می‌گردد شاخص شکل‌پذیری کاهش یابد، در این جدول از سه مقدار مقاومت فشاری بتن ۱۵ MPa، ۳۰ MPa و ۶۰ MPa استفاده گردیده است. با افزایش مقاومت فشاری بتن از ۱۵ MPa به ۶۰ MPa شاخص شکل‌پذیری به میزان ۵۴/۶٪ کاهش می‌یابد. به دلیل اینکه ظرفیت باربری و سختی ستون‌های مرکب متأثر از مقاومت بتن می‌باشد به همین دلیل برای بتن با مقاومت بالاتر به دلیل وجود ضریب الاستیسیته بالا، منحنی در بخش صعودی دارای شیب تندتری بوده اما به دلیل تردتر شدن مقطع، در بخش نزولی نیز دارای شیب شدیدتر می‌باشد که این مطلب سبب کاهش شاخص شکل‌پذیری آن نسبت به مقاطع با مقاومت فشاری بتن کمتر می‌گردد همچنین ظرفیت باربری مقطع نیز به میزان ۴۲/۵٪ افزایش می‌یابد. در این جدول، تاثیر فاصله میلگردهای عرضی بر شاخص شکل‌پذیری، با چهار مقدار نسبت فاصله خاموت ( $S/D$ ) ۰/۱، ۰/۲، ۰/۴ و ۰/۶ مورد بررسی قرار گرفته است. استفاده از میلگردهای عرضی در ستون‌های مرکب، سبب ایجاد محصورشدگی برای بتن و تامین‌کننده تکیه‌گاه مناسب برای میلگردهای طولی می‌باشد که از کماتش آنها جلوگیری نموده و همچنین سبب بهبود مقاومت

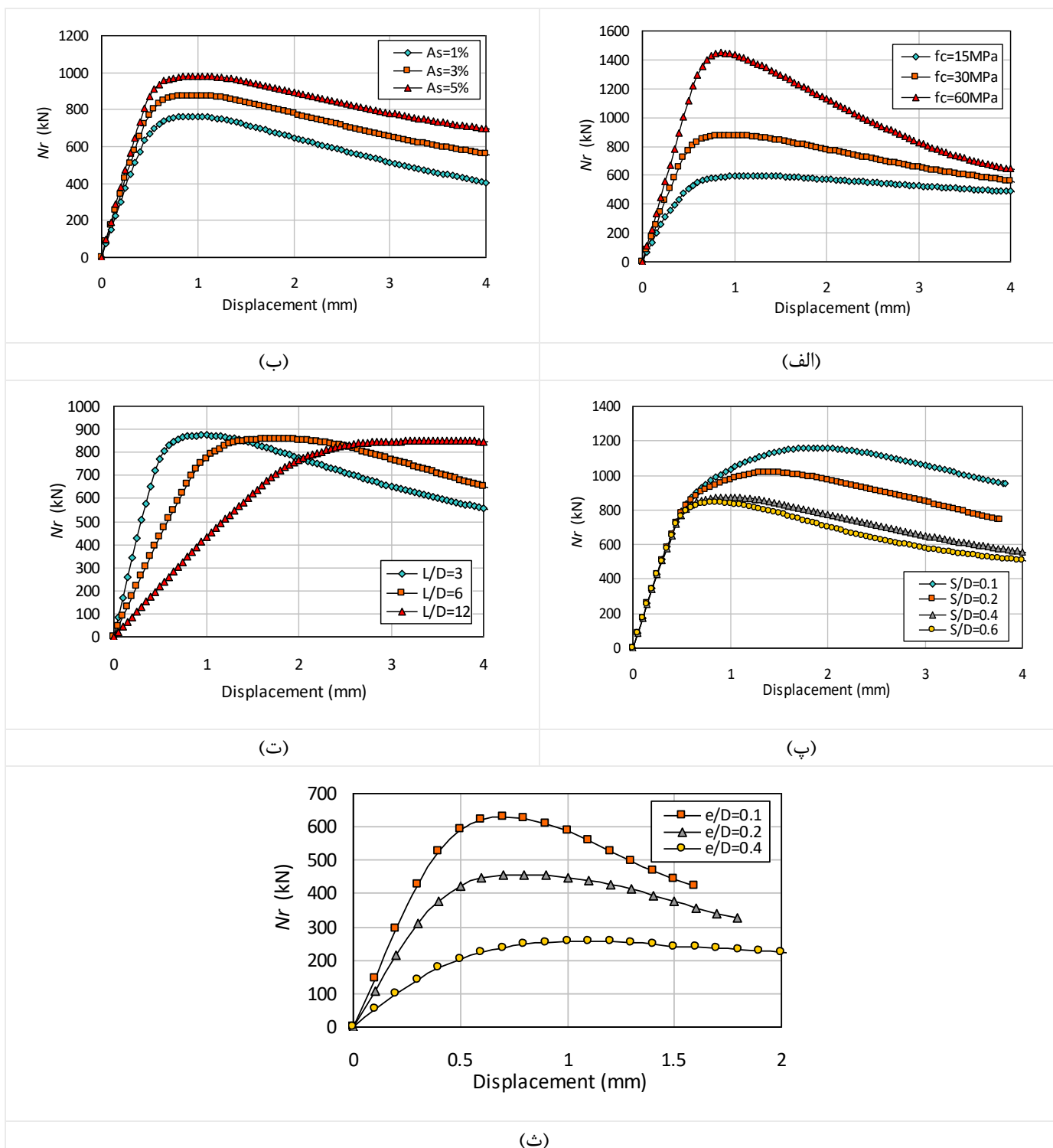
برشی مقطع می‌گردد. بر همین اساس فاصله آرماتورهای عرضی، یک پارامتر مهم در ظرفیت باربری و شکل‌پذیری ستون‌های مرکب است. همانگونه که در جدول ۴ نشان داده شده است، با کاهش فاصله بین میلگردهای عرضی، ظرفیت باربری و شاخص شکل‌پذیری افزایش می‌یابد به طوری که با کاهش نسبت فاصله خاموت ( $S/D$ ) از ۰/۶ به ۰/۱ ظرفیت باربری به مقدار ۳۸٪ و شاخص شکل‌پذیری به میزان ۷۳/۶٪ افزایش می‌یابد که نشان‌دهنده تاثیر چشمگیر نقش فاصله آرماتورهای عرضی در بهبود رفتار و شکل‌پذیری ستون‌های مرکب است. در جدول سه نسبت لاغری ( $L/D$ ) ۳، ۶ و ۱۲ در نظر گرفته شده است. با افزایش نسبت لاغری از ۳ به ۱۲ ظرفیت باربری به مقدار ۲/۶٪ و شاخص شکل‌پذیری به میزان ۴۳/۷٪ کاهش می‌یابد. همچنین از سه نسبت برون محوری ( $e/D$ ) ۰/۱، ۰/۲ و ۰/۴ استفاده گردیده که با افزایش برون محوری، ظرفیت باربری کاهش یافته ولی شاخص شکل‌پذیری به دلیل تغییر وضعیت از حالت فشاری به خمشی افزایش می‌یابد به طوری که با افزایش  $e/D$  از ۰/۱ به ۰/۴ ظرفیت باربری به مقدار ۵۹/۱٪ کاهش یافته ولی شاخص شکل‌پذیری ۲۸/۲٪ افزایش می‌یابد.

جدول ۴: پارامترهای موثر بر شاخص شکل‌پذیری ستون SRC با هسته صلیبی

گروه	نمونه	مقطع (mm)	$L$ (mm)	$\frac{L}{D}$	$\frac{S}{D}$	$\frac{e}{D}$	$f_c$ (MPa)	$A_s$ (%)	ظرفیت محوری (kN)	$\Delta_y$ (mm)	$\Delta_u$ (mm)	$\mu = \frac{\Delta_u}{\Delta_y}$
۱	X1-1	۱۵۰	۴۶۰	۳	۰/۴	۰	۳۰	۱	۷۶۴/۲	۰/۶۵	۱/۹۹	۳/۰۶
	X1-2	۱۵۰	۴۶۰	۳	۰/۴	۰	۳۰	۳	۸۷۳/۷	۰/۶۵	۲/۲۶	۳/۴۸
	X1-3	۱۵۰	۴۶۰	۳	۰/۴	۰	۳۰	۵	۹۸۳/۵	۰/۶۵	۲/۵۱	۳/۸۶
۲	X2-4	۱۵۰	۴۶۰	۳	۰/۴	۰	۱۵	۳	۵۹۷/۷	۰/۶۵	۳/۴۵	۵/۳۱
	X2-5	۱۵۰	۴۶۰	۳	۰/۴	۰	۳۰	۳	۸۷۳/۷	۰/۶۵	۲/۲۶	۳/۴۸
	X2-6	۱۵۰	۴۶۰	۳	۰/۴	۰	۶۰	۳	۱۴۴۹/۴	۰/۷	۱/۶۹	۲/۴۱
۳	X3-7	۱۵۰	۴۶۰	۳	۰/۱	۰	۳۰	۳	۱۱۶۰/۴	۰/۷	۳/۵۵	۵/۰۷
	X3-8	۱۵۰	۴۶۰	۳	۰/۲	۰	۳۰	۳	۱۰۱۵/۲	۰/۷	۲/۸۷	۴/۱
	X3-9	۱۵۰	۴۶۰	۳	۰/۴	۰	۳۰	۳	۸۷۳/۷	۰/۶۵	۲/۲۶	۳/۴۸
۴	X3-10	۱۵۰	۴۶۰	۳	۰/۶	۰	۳۰	۳	۸۴۱/۱	۰/۶۵	۱/۹	۲/۹۲
	X4-11	۱۵۰	۴۶۰	۳	۰/۴	۰	۳۰	۳	۸۷۳/۷	۰/۶۵	۲/۲۶	۳/۴۸
	X4-12	۱۵۰	۹۰۰	۶	۰/۴	۰	۳۰	۳	۸۵۵	۱/۳	۳/۳۴	۲/۵۷
۵	X4-13	۱۵۰	۱۸۰۰	۱۲	۰/۴	۰	۳۰	۳	۸۵۱	۲/۶	۵/۱۱	۱/۹۶
	X5-14	۱۵۰	۴۶۰	۳	۰/۴	۰/۱	۳۰	۳	۶۳۱/۴	۰/۵	۱/۱۷	۲/۳۴
	X5-15	۱۵۰	۴۶۰	۳	۰/۴	۰/۲	۳۰	۳	۴۵۷	۰/۵	۱/۴۳	۲/۸۶
	X5-16	۱۵۰	۴۶۰	۳	۰/۴	۰/۴	۳۰	۳	۲۵۸/۲	۰/۷	۲/۰۹	۳/۰۰

در شکل ۶ نمودار نیرو- تغییرمکان محوری پارامترهای موثر بر شاخص شکل‌پذیری ستون مرکب با هسته صلیبی ارائه شده در رابطه (۵) نشان داده شده است. همانگونه که در شکل ۶ (ت) ملاحظه می‌گردد با افزایش نسبت لاغری، ناحیه‌ی قبل از رسیدن به بار بیشینه رفتار غیر خطی پیدا کرده که منجر به کاهش شیب اولیه می‌شود. رفتار ستون‌های مرکب برای مقادیر مختلف  $S/D$  در شکل ۶ (پ) نشان داده شده است. همانگونه که ملاحظه می‌گردد شاخه صعودی منحنی برای تمام ستون‌ها دارای رفتار مشابهی بوده و تغییر رفتار مقاطع در ناحیه پس از تسلیم متاثر از فاصله بین میلگردهای عرضی است به طوری که در نسبت فاصله خاموت ۰/۱ و ۰/۲ به دلیل محصورشدگی زیاد بوجود آمده توسط خاموت‌ها و ممانعت از کمانش میلگردهای طولی، یک ناحیه سخت شدگی پس از تسلیم مشاهده گردیده به طوری که با افزایش فاصله خاموت‌ها این اثر از بین رفته و پس از نقطه تسلیم

شیب منحنی نزولی گردیده و ظرفیت باربری و شاخص شکل پذیری کاهش می‌یابد. همچنین مطابق شکل ۶ (ث) با افزایش نسبت برون محوری، ظرفیت باربری و سختی اولیه ستون‌های مرکب به طور قابل ملاحظه‌ای کاهش می‌یابد.



شکل ۶: نمودار نیرو-تغییر مکان محوری پارامترهای موثر بر شاخص شکل پذیری ستون SRC با هسته صلیبی (الف) مقاومت فشاری بتن  $f_c$ ، (ب) درصد هسته فولادی  $A_s$ ، (پ) فاصله میلگردهای عرضی  $S/D$ ، (ت) لاغری ستون  $L/D$ ، (ث) برون محوری  $e/D$

به جهت ترسیم منحنی اندرکنش نیروی محوری- لنگر خمشی ستون SRC با هسته فولادی صلیبی بر اساس ضوابط آیین نامه EC4 [20] و مقایسه آن با نتایج عددی، از ستون با ابعاد و درصد فولاد مطابق با نمونه آزمایشگاهی استفاده گردید. منحنی اندرکنش در این آیین نامه بصورت یک نمودار چند ضلعی ساده شده می باشد و برای ترسیم این منحنی از روش توزیع تنش پلاستیک استفاده می گردد. به جهت محاسبه مقاومت فشاری اسمی از رابطه (۶) می توان استفاده نمود:

$$P_{no} = F_y \cdot A_s + c_2 \cdot f_c \cdot (A_c + A_{sr} \frac{E_s}{E_c}) \quad (۶)$$

که در رابطه فوق  $F_y$  و  $A_s$  به ترتیب تنش تسلیم و مساحت هسته فولادی،  $f_c$  مقاومت فشاری نمونه استوانه ای بتن،  $E_c$  و  $E_s$  به ترتیب ضریب الاستیسیته فولاد و بتن می باشند. بر اساس روش توزیع تنش پلاستیک می توان ظرفیت خمشی  $M_{max}$  که در آن، همزمان ستون تحت ترکیب خمش و فشار با نیروی محوری  $c_2 \cdot f_c \cdot A_c$  می باشد را به صورت رابطه (۷) برای ستون SRC با هسته صلیبی حول محور قوی و آرماتور گذاری در دو وجه محاسبه نمود. در این وضعیت، تار خنثی پلاستیک در مرکز مقطع قرار دارد.

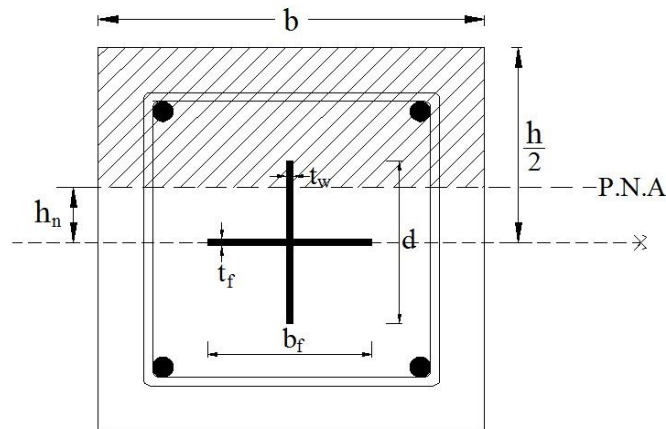
$$M_{max} = \frac{1}{8} c_2 \cdot f_c \cdot A_c \cdot h + \frac{1}{4} F_y \cdot A_s \left[ \frac{A_w \cdot d + A_f \cdot t_f}{A_w + A_f} \right] + \frac{1}{2} A_{sr} \cdot F_{ysr} \cdot (h - 2d') \quad (۷)$$

در رابطه فوق  $A_c = b \cdot h - A_s - A_{sr}$  مساحت خالص بتن،  $A_f = b_f \times t_f$ ،  $A_w = d \times t_w$  و  $d'$  فاصله مرکز آرماتورها تا نزدیک ترین وجه خارجی ستون می باشد. شکل مقطع و پارامترهای  $b_f$ ،  $t_f$ ،  $d$  و  $t_w$  در شکل (۷) نشان داده شده اند که به ترتیب پهنای بال، ضخامت بال، ارتفاع مقطع پروفیل و ضخامت جان می باشند.  $A_{sr}$  و  $F_{ysr}$  به ترتیب مساحت آرماتورها و تنش تسلیم آنها می باشد. برای محاسبه مقاومت خمشی اسمی ستون SRC با هسته صلیبی حول محور قوی و با آرماتور گذاری در دو وجه با استفاده از روش توزیع تنش پلاستیک، می توان از روابط (۸)، (۹) و (۱۰) استفاده نمود. در این حالت تار خنثی پلاستیک در بالای مرکز مقطع قرار دارد.

$$\text{if } h_n = \frac{c_2 f_c [A_c + t_w t_f]}{2b F_y + 2c_2 f_c (b - b_f)} \leq \frac{t_f}{2} \Rightarrow M = \frac{1}{4} c_2 \cdot f_c [A_c + t_w t_f + 2(b_f - b) h_n] \left( \frac{h}{2} - h_n \right) + \frac{1}{2} A_{sr} \cdot F_{ysr} \times \\ (h - 2d') + \frac{1}{4} F_y \cdot t_w (d - t_f) \cdot \left( d - \frac{t_f}{2} \right) + \frac{1}{2} F_y \cdot b \cdot \left( \frac{t_f^2}{2} + h_n^2 - \frac{1}{2} t_f \cdot h_n \right) \quad (۸)$$

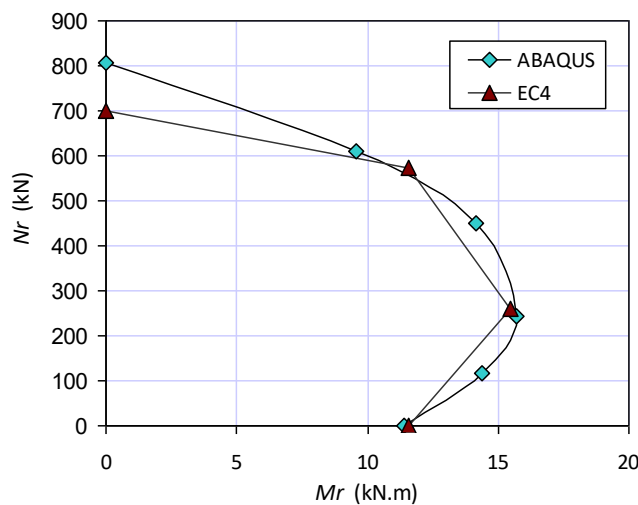
$$\text{if } \frac{t_f}{2} < h_n = \frac{c_2 \cdot f_c \cdot [A_c + t_f \cdot (t_w + b)] + 2F_y \cdot t_f \cdot [t_w - b]}{4F_y \cdot t_w - 2c_2 \cdot f_c \cdot (t_w - b)} \leq \frac{d}{2} \Rightarrow M = \frac{1}{4} c_2 \cdot f_c \cdot [A_c + t_f (t_w + b) + 2h_n (t_w - b)] \times \\ \left( \frac{h}{2} - h_n \right) + \frac{1}{2} A_{sr} \cdot F_{ysr} (h - 2d') + \frac{1}{2} F_y \cdot t_w \cdot \left[ \left( \frac{d}{2} - h_n \right)^2 + \left( h_n - \frac{t_f}{2} \right)^2 + \left( \frac{d}{2} - \frac{t_f}{2} \right)^2 \right] + F_y \cdot A_f \cdot h_n \quad (۹)$$

$$\text{if } h_n = \frac{c_2 \cdot f_c \cdot [A_c + A_s] - 2F_y \cdot A_s}{2c_2 \cdot f_c \cdot b} > \frac{d}{2} \Rightarrow M = \frac{1}{4} c_2 \cdot f_c \cdot [A_c - 2b \cdot h_n + A_s] \cdot \left( \frac{h}{2} - h_n \right) + A_s \cdot F_y \cdot h_n \\ + \frac{1}{2} A_{sr} \cdot F_{ysr} (h - 2d') \quad (۱۰)$$



شکل ۷: مقطع ستون برای محاسبه ظرفیت خمشی

بر اساس مدلسازی عددی نمونه آزمایشگاهی، ملاحظه می‌گردد که روابط استخراج شده از روش توزیع تنش پلاستیک، تطابق مناسبی با مدل عددی داشته و تنها در فشار محوری و بخشی از ناحیه کنترل فشار محافظه کارانه است که نتیجه این مقایسه در شکل ۸ نشان داده شده است.



شکل ۸: مقایسه منحنی اندرکنش ستون مرکب با هسته صلیبی به ازای درصد فولاد  $A_s = 2.3\%$

در شکل‌های ۹ و ۱۰ منحنی‌های اندرکنش بدون بعد شده ستون مرکب با هسته صلیبی با درصدهای مختلف هسته

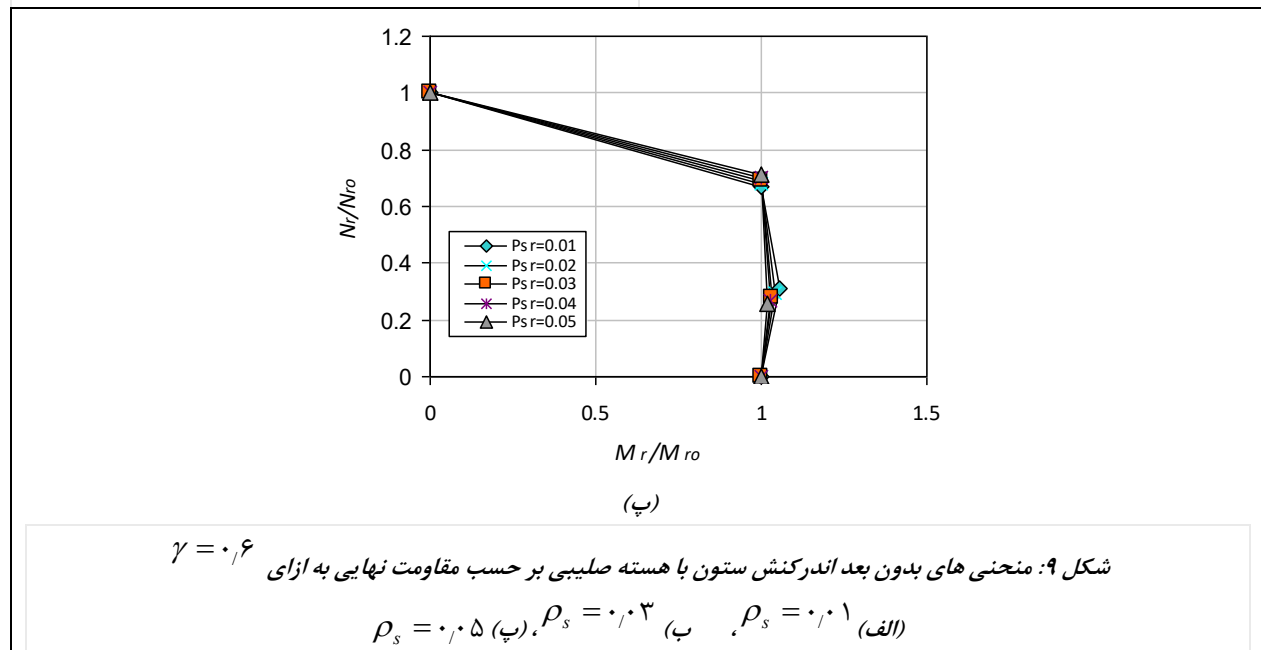
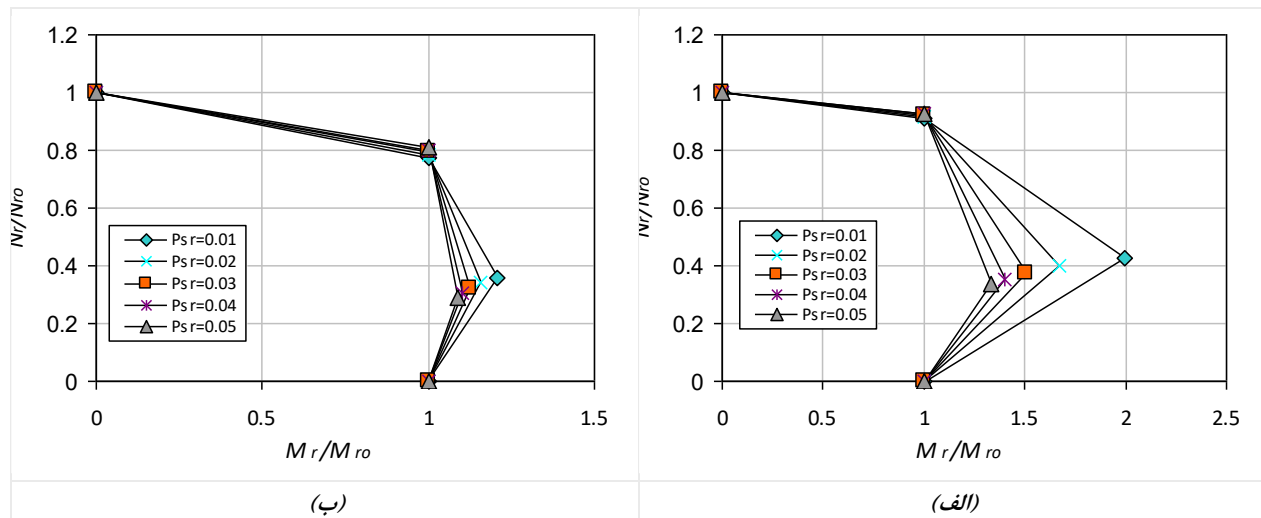
فولادی و آرماتورهای طولی نشان داده شده است. در این نمودارها  $\rho_{sr} = \frac{A_{sr}}{b.h}$  درصد آرماتور طولی،  $\rho_s = \frac{A_s}{b.h}$

درصد هسته فولادی،  $N_{ro}$  ظرفیت محوری خالص،  $M_{ro}$  ظرفیت خمشی خالص و  $\gamma = \frac{h-2d'}{h}$  می‌باشد. در شکل

۹ منحنی‌ها بر حسب ظرفیت نهایی مقطع  $\frac{N_r}{N_{ro}}$  و  $\frac{M_r}{M_{ro}}$  ترسیم گردیدند. همانگونه که در این شکل ملاحظه

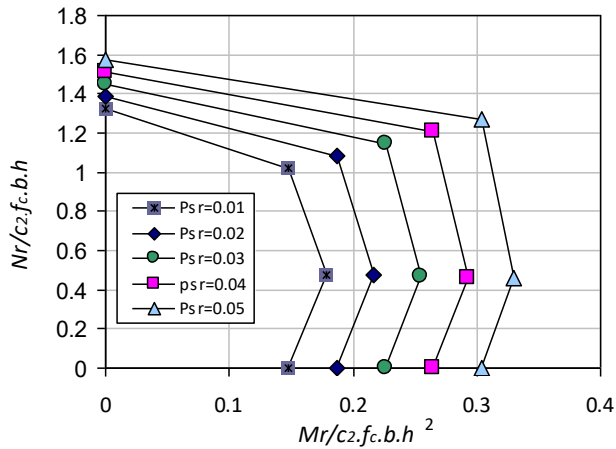
می‌گردد با افزایش درصد هسته فولادی، مقدار لنگر حداکثر مربوط به نقطه بالانس تقریباً به ظرفیت خمشی مقطع نزدیک شده و به ازای درصدهای مختلف آرماتور طولی، منحنی‌ها بر هم منطبق می‌شوند و نشان‌دهنده این مطلب

است که با قوی تر شدن هسته فولادی مقطع، اثر آرماتورهای طولی در ظرفیت خمشی مقطع قابل توجه نخواهد بود که این مطلب در مورد درصدهای کمتر فولاد مقطع صادق نیست.

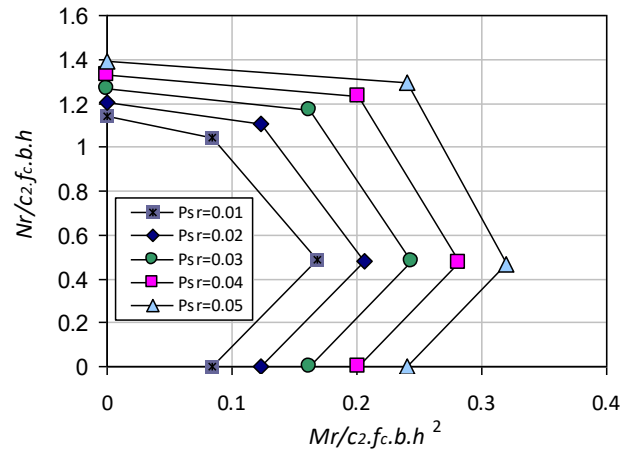


در شکل ۱۰ نیز منحنی ها بر حسب مقاومت بتن  $\frac{N_r}{c_2 \cdot f_c \cdot b \cdot h}$  و  $\frac{M_r}{c_2 \cdot f_c \cdot b \cdot h^2}$  و بصورت بدون بعد ترسیم گردیدند.

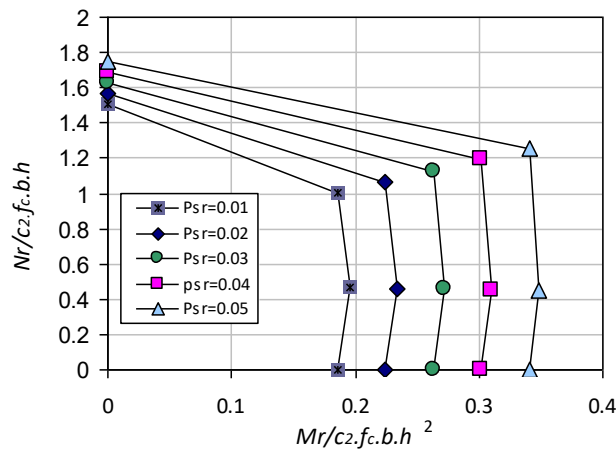
در این شکل نیز همانگونه که ملاحظه می گردد با افزایش درصد هسته فولادی، منحنی ها به شکل دو خطی در آمده و لنگر نقطه بالانس و ظرفیت خمشی خالص تقریباً با هم برابر می گردند. با ترسیم این منحنی ها برای  $\gamma$  های مختلف و آرماتورگذاری در چهار وجه می توان به منحنی های کامل تری برای طراحی این ستون ها دست یافت.



(ب)



(الف)



(پ)

شکل ۱۰: منحنی های بدون بعد اندرکنش ستون با هسته صلیبی بر حسب مقاومت بتن به ازای  $\gamma = 0.6$

$$\rho_s = 0.01 \text{ (الف)}, \rho_s = 0.03 \text{ (ب)}, \rho_s = 0.05 \text{ (پ)}$$

## ۶- نتیجه گیری

هدف از این تحقیق، بررسی رفتار ستون‌های SRC با هسته صلیبی تحت اثر بار با خروج از مرکزیت می‌باشد که برای انجام این مطلب، با توجه به داده‌های آزمایشگاهی که نتایج آن بصورت خلاصه ارائه گردید، مدلسازی عددی توسط نرم افزار آباکوس انجام شده و با داده‌های آزمایشگاهی اعتبارسنجی گردیدند تا بتوان بر روی مدل عددی مطالعه صورت گیرد که نتایج حاصل بصورت زیر می‌باشد:

۱- با افزایش درصد هسته فولادی، ظرفیت باربری و شاخص شکل‌پذیری افزایش می‌یابند به طوری که در حالت  $e/D = 0$ ، با افزایش درصد هسته فولادی از ۱٪ به ۳٪ ظرفیت باربری و شاخص شکل‌پذیری به ترتیب به میزان ۱۴٪ و ۱۳۷٪ و از ۳٪ به ۵٪ به میزان ۱۲٪ و ۱۰۹٪ افزایش می‌یابند.



۲- با افزایش مقاومت فشاری بتن، شاخص شکل‌پذیری کاهش می‌یابد به طوری که در حالت  $e/D = 0$ ، با افزایش مقاومت فشاری بتن از ۱۵ MPa به ۶۰ MPa شاخص شکل‌پذیری به میزان ۵۴٫۶٪ کاهش یافته ولی ظرفیت باربری به مقدار ۴۲٫۵٪ افزایش می‌یابد.

۳- با کاهش فاصله بین میلگردهای عرضی، ظرفیت باربری و شاخص شکل‌پذیری به دلیل محصورشدگی بوجود آمده و جلوگیری از کمانش آرماتورهای طولی، افزایش می‌یابد به طوری که در حالت  $e/D = 0$ ، با کاهش نسبت فاصله خاموت ( $S/D$ ) از ۰٫۶ به ۰٫۲ ظرفیت باربری به مقدار ۲۰٫۷٪ و شاخص شکل‌پذیری به میزان ۴۰٫۴٪ افزایش یافته و از ۰٫۲ به ۰٫۱ ظرفیت باربری به مقدار ۱۴٫۳٪ و شاخص شکل‌پذیری به میزان ۲٫۶٪ افزایش می‌یابد که نشان‌دهنده نقش فاصله آرماتورهای عرضی در بهبود رفتار و شکل‌پذیری ستون‌های مرکب است.

۴- با افزایش نسبت لاغری ( $L/D$ ) رفتار منحنی نیرو- تغییرمکان محوری به دلیل افزایش تغییرمکان مرتبه‌ی دوم، تا قبل از رسیدن به بار حداکثر بصورت غیرخطی شده و شیب منحنی کاهش یابد. افزایش  $L/D$  از مقدار ۳ به ۱۲ باعث کاهش ظرفیت باربری به مقدار ۲٫۶٪ و شاخص شکل‌پذیری به میزان ۴۳٫۷٪ در حالت  $e/D = 0$  می‌گردد.

۵- با افزایش نسبت برون محوری ( $e/D$ ) ظرفیت باربری کاهش یافته ولی شاخص شکل‌پذیری به دلیل تغییر رفتار از حالت رفتار فشاری به خمشی افزایش می‌یابد به طوری که به ازای درصد هسته فولادی ۳٪، مقاومت فشاری بتن ۳۰ MPa و  $L/D = 3$ ، با افزایش  $e/D$  از ۰٫۱ به ۰٫۴ ظرفیت باربری به مقدار ۵۹٫۱٪ کاهش یافته ولی شاخص شکل‌پذیری ۲۸٫۲٪ افزایش می‌یابد.

۶- در نمودارهای اندرکنش بدون بعد نیروی محوری- لنگر خمشی، به ازای درصد هسته فولادی  $\rho_s = 1\%$ ، پارامتر بدون بعد  $M_r / M_{r0}$  مربوط به نقطه بالانس مقطع با درصد آرماتور طولی  $\rho_{sr} = 1\%$  به میزان ۴۹٫۸٪ بیشتر از پارامتر مذکور برای مقطع با  $\rho_{sr} = 5\%$  می‌باشد که مقادیر مذکور به ازای  $\rho_s = 3\%$  و  $\rho_s = 5\%$  به ترتیب ۱۰٫۹٪ و ۳٫۶٪ می‌باشند.

۷- نمودارهای اندرکنش بدون بعد ترسیم شده برای ستون‌های مرکب SRC با هسته فولادی صلیبی بر حسب مقاومت بتن  $N_r / c_2 \cdot f_c \cdot b \cdot h$  و  $M_r / c_2 \cdot f_c \cdot b \cdot h^2$  به ازای  $\gamma = 0.6$ ، روشی ساده برای طراحی ستون‌های مذکور بوده و می‌توان با بسط نمودارهای مذکور برای  $\gamma$ های مختلف به نمودارهای کامل‌تری دست یافت.

## منابع

- [1] M. Nematzadeh, M. Naghipour, J. Jalali, and A. Salari. Experimental study and calculation of confinement relationships for prestressed steel tube-confined compressed concrete stub columns. *Journal of Civil Engineering and Management* 2017;23:699-711.
- [2] M. Nematzadeh, A. Karimi, and A. Gholampour, "Pre-and post-heating behavior of concrete-filled steel tube stub columns containing steel fiber and tire rubber. *Structures* 2020;27:2346-2364.
- [3] A. Memarzadeh, M. Nematzadeh, and M. Ahmadi. Compressive performance of steel fiber-reinforced concrete-encased steel composite stub columns. *Modares Civil Engineering journal* 2021;21:189-203.
- [4] Y.-F. An, L.-H. Han, and C. Roeder. Performance of concrete-encased CFST box stub columns under axial compression. *Structures* 2015;3:211-226.
- [5] M. Ahmadi, M. Naghipour, and M. Nematzadeh. Parametric Study of Factors Affecting the Bearing Capacity of Steel Reinforced Concrete (SRC) Under Eccentric Loading. *Sharif Journal of Civil Engineering* 2020;36.2:3-17.
- [6] Y.-F. An, L.-H. Han, and C. Roeder. Flexural performance of concrete-encased concrete-filled steel tubes. *Magazine of Concrete Research* 2014;66:249-267.