

## تحلیل عددی رفتار ستون بتن مسلح تقویت شده با قفس فولادی

غلامرضا زمانی‌اهری<sup>۱</sup>، رامین رسولی<sup>۲\*</sup>، سامان یغمایی سابق<sup>۳</sup>

۱- استادیار، گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه ارومیه

۲- کارشناس ارشد عمران- سازه

۳- دانشیار، دانشکده عمران، دانشگاه تبریز

\*Rasouli.Ra@yahoo.com

تاریخ پذیرش ۹۷/۱۲/۲۲

تاریخ دریافت ۹۷/۰۴/۲۰

### چکیده

امروزه سازه‌های بتنی بصورت گسترده در سراسر جهان احداث گردیده و شمار قابل توجهی از این سازه‌ها بنا به دلایل مختلفی از جمله ضعف در طراحی، خرابی در اثر زلزله، ارتقا یک سازه جهت تغییر کاربری و ... نیازمند مقاوم‌سازی هستند؛ پس احیاسازی و تقویت سازه‌های آسیب پذیر در برابر عوامل مختلف امری مهم محسوب می‌شود. در این پژوهش رفتار ستون بتن مسلح تقویت شده با قفس فولادی، که نوعی روکش فولادی محسوب شده و روشی موثر، ساده و اقتصادی می‌باشد که برای محصورسازی مقاطع بتنی مربعی و مستطیلی شکل استفاده می‌شود، مورد بررسی قرار گرفته است. در این راستا، ابتدا مدل المان محدود ستون بتن مسلح تقویت شده با قفس فولادی در نرم‌افزار ABAQUS، تحت نیروی محوری و لنگر خمشی مدل‌سازی شد و پس از کالیبراسیون مدل عددی و اطمینان از صحت نتایج و دقت مدل، مطالعه‌ی پارامتریک هفتگانه‌ای روی عوامل موثر در رفتار ستون تقویت شده مانند تعداد، اندازه و ضخامت نوارهای فولادی و سازوکار انتقال بار و ... در مقایسه با ستون مینا انجام شد. نتایج به دست آمده از این بررسی میزان تاثیر پارامترهای مختلف در رفتار ستون تقویت شده را مشخص نموده و علاوه بر آن بیانگر افزایش قابل توجه در ظرفیت بار نهایی و لنگر خمشی ستون تقویت شده با قفس فولادی است.

**کلمات کلیدی:** مقاوم‌سازی، قفس فولادی، روش المان محدود

### ۱- مقدمه

ستون‌ها از اصلی‌ترین المان‌های سازه‌ها هستند که تحت اثر نیروی محوری، برشی و لنگر خمشی قرار دارند که مقاومت و شکل‌پذیری آنها تاثیر مهمی در ظرفیت لرزه‌ای آنها دارد. در حال حاضر روش‌های مختلفی برای مقاوم‌سازی ستون بتن مسلح وجود دارد که شامل: روکش بتنی،

امروزه نگرش مهندسين از تخریب و نوسازی سازه‌ها به دلیل هزینه بالای این امر، به مقاوم‌سازی و بهسازی تغییر یافته است. با انجام مقاوم‌سازی ضریب اطمینان سازه بالاتر رفته و در وقت و هزینه صرفه جویی می‌شود.

همکاران [6]، کارایی سازوکار انتقال مستقیم بار با استفاده از لوله‌های فولادی در محل اتصال تیر-ستون، را به اثبات رساندند. مونتوری و پیلوزو<sup>8</sup> [7]، به ارزیابی یک مدل نظری پرداختند که قادر به پیش بینی رفتار ستون بتن مسلح تقویت شده با نبشی و ورق فولادی بود که در قیاس با نتایج آزمایشگاهی از دقت بالایی برخوردار بود. آدام و همکاران [8]، با استفاده از روش المان محدود و بر پایه مطالعات تجربی به بررسی پارامترهای موثر بر رفتار ستون بتن مسلح مقاوم شده با قفس فولادی، پرداختند. کالدرون<sup>9</sup> و همکاران [9]، یک طرح جدیدی که فرمولاسیون آن بر پایه‌ی تحلیل سازوکار خرابی بدست آمده از نتایج و مطالعات آزمایشگاهی و عددی بود، برای محاسبه بار نهایی ستون بتن مسلح که به وسیله قفس فولادی مقاوم سازی شده است، ارائه کردند. البکری و تارابیا<sup>10</sup> [10]، با انجام یک سری آزمایش روی ستون بتن مسلح تقویت شده با قفس فولادی، افزایش بارنهایی و شکل پذیری ستون تقویت شده را اثبات کردند. بلال<sup>11</sup> و همکاران [11]، با مطالعات آزمایشگاهی و المان محدود به بررسی رفتار ستون بتن مسلح تقویت شده با روکش فولادی پرداختند و تاثیر تعداد و اندازه نوارهای استفاده شده در روکش را بر رفتار ستون بتن مسلح تقویت شده نشان دادند.

## ۲- مدل سازی عددی

مدل سازی با نرم افزار ABAQUS صورت گرفته است. برای مدل سازی قسمتهای بتنی از المان سه‌بُعدی هشت-گرهه (C3D8R) از خانواده المان پیوسته<sup>12</sup>، و برای مدل سازی میلگردها، از المان خرابایی<sup>13</sup> (T3D2) و برای مدل سازی اجزای قفس شامل نبشی و ورق، از المان دوبعدی چهار گرهه (S4R) از خانواده المان پیوسته‌ای<sup>14</sup>،

استفاده از الیاف کامپوزیتی FRP<sup>1</sup> و ژاکت فولادی، است. قفس فولادی نوعی روکش فولادی محسوب شده و تکنیکی اقتصادی، ساده و موثر است که برای تقویت مقاطع مستطیلی و مربعی شکل به کار می‌رود. این روش، شامل استفاده از چهار نبشی فولادی که در طول و چهار گوشه ستون قرار گرفته و به وسیله نوارهای عرضی که به نبشی‌ها جوش داده شده‌اند ساختار قفس را تشکیل می‌دهند. فاصله بین قفس فولادی با ستون، به وسیله ملات سیمانی یا اپوکسی پر می‌شود. در ادامه به مرور برخی از مهمترین پژوهش‌های پیشین انجام شده در این زمینه می‌پردازیم.

فرانگو<sup>2</sup> و همکاران [1]، یک سری آزمایش برای تقویت ستون بتن مسلح، به طریق تسمه زنی انجام دادند که نتایج بدست آمده بیانگر افزایش مقاومت و شکل‌پذیری ستون مقاوم‌سازی شده بود. ابوطاها<sup>3</sup> و همکاران [2]، با انجام آزمایشاتی کارایی ژاکت فولادی که توسط پیچ‌های مهاری به ستون متصل شده بودند را در زمینه مقاوم‌سازی ستون بتن مسلح به اثبات رساندند. سیرتک<sup>4</sup> [3]، یکسری نمونه آزمایشگاهی ستون بتن مسلح را با استفاده نوارهای فولادی پیش تنیده تقویت کرد که نتایج بدست آمده بیانگر افزایش ظرفیت باربری ستون تقویت شده بود. ژیانو و وو<sup>5</sup> [4]، با انجام آزمایش‌هایی روی ستون بتن مسلح، استفاده از روکش فولادی سراسری با سخت‌کننده در نقاط مستعد تشکیل مفصل پلاستیک، برای بهبود مقاومت برشی و شکل پذیری ستون، پیشنهاد دادند. وو<sup>6</sup> و همکاران [5]، با ارزیابی بیش از ۱۲۰ مقاله و نتایج بیش از ۷۰۰ مورد آزمایشگاهی در مورد روش‌های مختلف مقاوم‌سازی و ترکیب آن‌ها با مطالعات تئوریک، اثبات کردند که قفس فولادی، روشی موثر در افزایش مقاومت و شکل‌پذیری ستون‌های بتن مسلح است. آدام<sup>7</sup> و

8 Montuori, Piluso  
9 Calderón  
10 Albakry, Tarabia  
11 Belal  
12 Solid  
13 Truss  
14 Shell

1 Fiber Reinforced Polymer  
2 Frangou  
3 Aboutaha  
4 Cirtek  
5 Xiao, Wu  
6 Wu  
7 Adam

جدول ۱. خواص مکانیکی ستون بتنی تحت نیروی محوری

Concrete Property			
$f'_c$ (MPa)	$E_c$ (MPa)	$\rho$ ( $\frac{Kg}{m^3}$ )	$\nu^*$
8.3	14404	2337	0.2
Longitudinal Bar Property			
$F_y$ (MPa)	$E_s$ (GPa)	$\rho$ ( $\frac{Kg}{m^3}$ )	$\nu^*$
400	210	7850	0.3
Transvers Bar Property			
$F_y$ (MPa)	$E_s$ (GPa)	$\rho$ ( $\frac{Kg}{m^3}$ )	$\nu^*$
230	210	7850	0.3

Table 1. Mechanical properties of RC columns under axial load

جدول ۲. خواص مکانیکی قفس فولادی

Steel Cage Property				
Angle (mm)	Strip (mm)	$F_y$ (GPa)	$E_s$ (GPa)	$\nu^*$
۶۰.۶	270×160×8	۲۷۵	۲۱۰	۰.۳

Table 2. Mechanical properties of Steel cage

\* مقادیر فرض شده در جداول ۱ و ۲.

شکل ۱. مدل آزمایشگاهی تحت نیروی محوری [13]



Fig. 1. Experimental model under axial load [13]

۳-۲. مدل تحت نیروی محوری و لنگر خمشی

مدل انتخابی از مدل‌های آزمایشگاهی ساخته شده توسط روکا<sup>۵</sup> [14]، در آزمایشگاه ICITECH دانشگاه والنسیای اسپانیا است.

این مدل شامل المان طولی با مقطع  $260 \times 260 \text{ mm}^2$  که میانگر ستون و المان عرضی در مرکز ستون با مقطع

بهره برده شده است. رفتار فولاد به عنوان رفتار ماده‌ای الاستیک-پلاستیک تعریف شد. برای اندرکنش بین میلگردها و بتن از قید Embedded Region، و برای اتصالات جوشی از قیدی بنام Tie استفاده شده است. برای تعریف رفتار غیرخطی بتن از مدل رفتاری بتن آسیب دیده خمیری<sup>۱</sup> و برای تعریف منحنی رفتار تک محوره بتن از مدل رفتاری مندر<sup>۲</sup> [12]، استفاده شده است.

### ۳- مشخصات مدل‌های آزمایشگاهی برای

#### کالیبراسیون

مطالعاتی آزمایشگاهی برای تأیید درستی روش عددی و نگرشی بهتر به جزئیات مدل المان محدود، انتخاب شده‌اند. در این مقاله دو طیف از ستون تقویت شده با قفس فولادی را برای بررسی پارامتریک انتخاب نموده‌ایم که در ادامه به شرح آنها می‌پردازیم.

#### ۳-۱. مدل تحت نیروی محوری

مطالعه‌ی تجربی انتخاب شده برای این گروه برگرفته شده از نمونه‌های ساخته شده خیمنز<sup>۳</sup> [13]، در آزمایشگاه ICITECH دانشگاه والنسیای اسپانیا است. مقطع ستون  $300 \times 300 \text{ mm}^2$  بوده و ارتفاع آن ۳۱۰۰ میلی‌متر است که با میلگردهای نمره ۱۲ و ۶ به صورت طولی و عرضی مسلح شده است. ستون با نبشی و نوار فولادی تقویت و فضای مابین ستون و قفس با ملات ماسه و سیمان پر شده است. ستون به وسیله جکی هیدرولیکی با ظرفیت ۵۰۰۰ KN تحت نیروی محوری با نرخ ثابت  $0.5 \frac{mm}{min}$  قرار گرفته و تا زمان خرابی ستون اعمال نیرو ادامه می‌یابد.

1 Concrete Damage Plasticity

2 Mander

3 Giménez

4 Institute of Concrete Science and Technology

5 Roca

### ۴- درستی آزمایشی مدل‌ها

برای ارزیابی دقت روش مدل‌سازی عددی، نتایج به دست آمده از نرم‌افزار با نتایج آزمایشگاهی مقایسه شده است.

شکل ۳. مدل‌های المان محدود

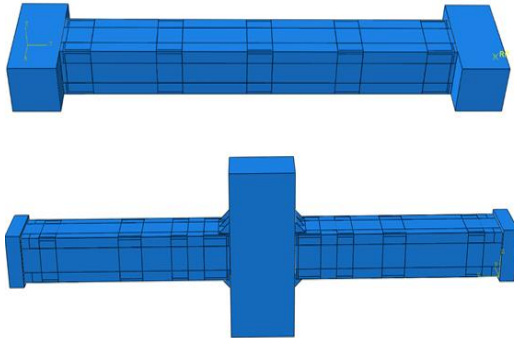


Fig. 3. Finite element models

طبق شکل‌های (۴ و ۵) مشاهده می‌شود که هماهنگی مناسبی بین نتایج المان محدود و آزمایشگاهی وجود دارد که نشان از دقت مناسب نرم‌افزار می‌باشد.

شکل ۴. مقایسه نتایج المان محدود و آزمایشگاهی نمونه تحت نیروی محوری [13]

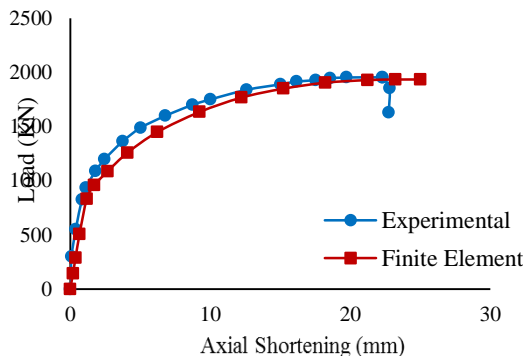


Fig. 4. Comparison between experimental and FEM results in the axially loaded model [13]

شکل ۵. مقایسه نتایج المان محدود و آزمایشگاهی نمونه تحت نیروی محوری و لنگر خمشی [14]

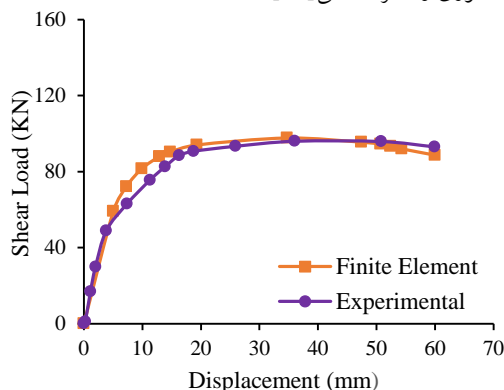


Fig. 5. Comparison between experimental and FEM results in the model subjected to axial load and bending moment [14]

$260 \times 400 \text{ mm}^2$  که بیانگر تیر بوده و طول مدل ۲۹۵۰ میلیمتر می‌باشد. تیر و ستون با میلگردهای نمره ۱۲ و ۶ به صورت طولی و عرضی مسلح شده است. ستون با نبشی و نوار فولادی تقویت و فضای خالی مابین ستون و قفس با ملات ماسه و سیمان پر شده است. بارگذاری به صورت دو مرحله‌ای بوده بطوری که ابتدا ستون توسط جک هیدرولیکی به ظرفیت ۲۵۰۰ kN تحت نیروی محوری از پیش تعیین شده قرار گرفته و سپس با ثابت ماندن مقدار آن در مرحله دوم نیروی برشی توسط جک هیدرولیکی دیگری به ظرفیت ۵۰۰ kN بر تیر اعمال شده و افزایش نیرو تا زمان خرابی مدل ادامه پیدا می‌کند.

جدول ۳. خواص مکانیکی ستون بتنی تحت نیروی محوری و

خمشی

Concrete Property				
$f'_c$ (MPa)	$E_c$ (MPa)	$\rho$ ( $\frac{\text{Kg}}{\text{m}^3}$ )	$\nu^*$	
12.65	17783	2397	0.2	
Longitudinal Bar Property				
$F_y$ (MPa)	$E_s$ (GPa)	$\rho$ ( $\frac{\text{Kg}}{\text{m}^3}$ )	$\nu^*$	
500	200	7850	0.3	
Transvers Bar Property				
$F_y$ (MPa)	$E_s$ (GPa)	$\rho$ ( $\frac{\text{Kg}}{\text{m}^3}$ )	$\nu^*$	
230	210	7850	0.3	

Table 3. Mechanical properties of RC columns under axial load and bending moment

جدول ۴. خواص مکانیکی قفس فولادی

Steel Cage Property				
Angle (mm)	Strip (mm)	$F_y$ (GPa)	$E_s$ (GPa)	$\nu^*$
۶۰.۶	230×140×8	۲۷۵	۲۱۰	۰.۳
	۲۳۰×۱۰۰×۸			

Table 4. Mechanical properties of Steel cage

\* مقادیر فرض شده در جداول ۳ و ۴.

شکل ۲. مدل آزمایشی تحت نیروی محوری و لنگر خمشی [14]

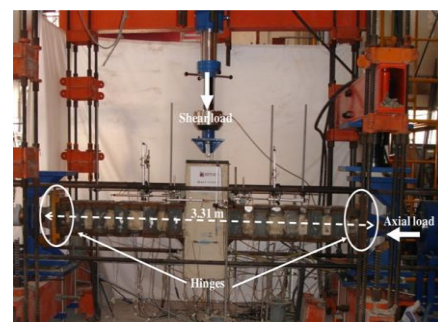


Fig. 2. Experimental model under axial load and bending moment [14]

شکل ۶. جزئیات نمونه‌های مدل شده تحت نیروی محوری

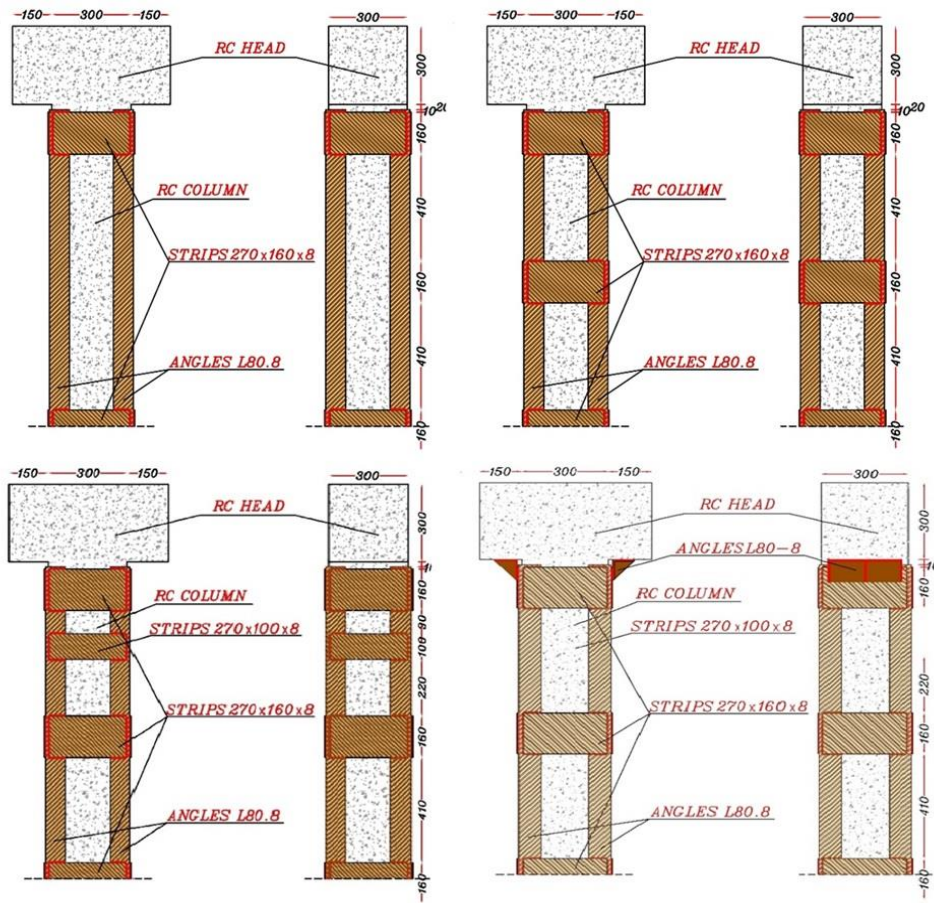


Fig. 6. Details of the axially loaded model

شکل ۷. جزئیات مفصل تیر-ستون نمونه مدل شده تحت نیروی محوری و لنگر خمشی

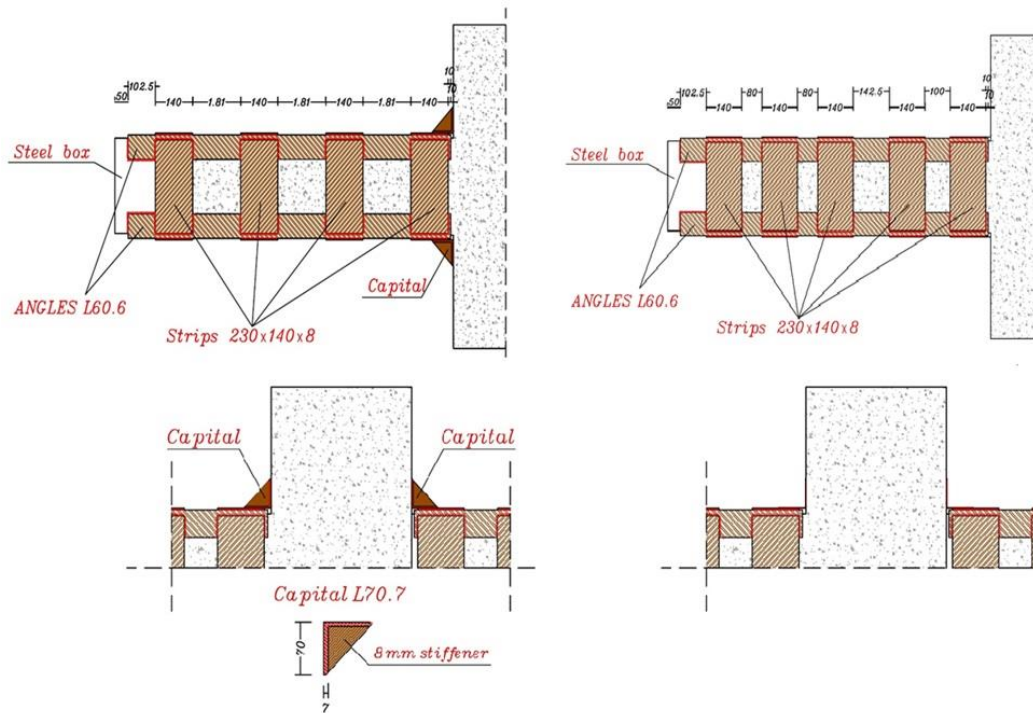


Fig. 7. Details of the model subjected to axial load and bending moment

### ۵- بررسی پارامتریک و مشخصات نمونه-های مدل سازی شده

مطالعات پارامتریک روی مدل‌سازی‌های انجام شده شامل موارد زیر است:

- ۱- تعداد نوارهای فولادی، ۲- سایز نوارهای فولادی،
- ۳- سایز نبشی‌های فولادی، ۴- ضخامت نوارهای فولادی، ۵- مقاومت فشاری بتن، ۶- تنش تسلیم قفس فولادی و ۷- استفاده از سرستون در محل اتصال تیر-

ستون

در نمونه‌های مدل‌سازی شده دو سازوکار انتقال بار، میان ستون بتن مسلح و قفس فولادی بررسی شد:  
 الف): حالت غیرمستقیم، که انتقال بار از طریق تنش‌های برشی و از طریق ملاتی که مابین ستون و قفس وجود دارد، بین ستون و قفس صورت می‌گیرد.  
 ب): حالت مستقیم، مدل دارای سرستون که از نبشی و سخت کننده تشکیل شده، است بار از طریق این المان‌ها به صورت مستقیم در میان ستون و قفس توزیع می‌شود.

جدول ۵. نمونه‌های آنالیز شده در مطالعه پارامتریک مدل تحت نیروی محوری

Specimen	Strengthening			Material properties	
	Angles	Strips (mm <sup>3</sup> )	No. of strips	f <sub>c</sub> (Mpa)	f <sub>yl</sub> (MPa)
C-Un	-	-	-	8.3	-
C-Ref	L80.8	270×160×8	5	8.3	275
C-A.St	L80.8	270×160×8	7	8.3	275
C-D.St	L80.8	270×160×8	3	8.3	275
C-St120	L80.8	270×120×8	5	8.3	275
C-St200	L80.8	270×200×8	5	8.3	275
C-AL60	L60.6	270×160×8	5	8.3	275
C-AL100	L100.10	270×160×8	5	8.3	275
C-T.St6	L80.8	270×160×6	5	8.3	275
C-T.St10	L80.8	270×160×10	5	8.3	275
C-fc12	L80.8	270×160×8	5	12	275
C-fc16	L80.8	270×160×8	5	16	275
C-fy355	L80.8	270×160×8	5	8.3	355
C-fy235	L80.8	270×160×8	5	8.3	235
C-CA.L80	L80.8	270×160×8	5	8.3	275

Table 5. Specimens analysed in parametric study of the model under the axially loaded

جدول ۶. نمونه‌های آنالیز شده در مطالعه پارامتریک مدل تحت نیروی محوری و لنگر خمشی

Specimen	Strengthening			Capital	Material properties	
	Angles	Strips (mm <sup>3</sup> )	No. of strips		f <sub>c</sub> (MPa)	f <sub>yl</sub> (MPa)
R-Un	-	-	-	YES	12	-
R-Ref	L60.6	230×140×8	5	YES	12	275
R-4.St	L60.6	230×140×8	4	YES	12	275
R-3.St	L60.6	230×140×8	3	YES	12	275
R-St120	L60.6	230×120×8	5	YES	12	275
R-St100	L60.6	230×100×8	5	YES	12	275
R-L50	L50.5	230×140×8	5	YES	12	275
R-L70	L70.7	230×140×8	5	YES	12	275
R-T.St6	L60.6	230×140×6	5	YES	12	275
R-T.St10	L60.6	230×140×10	5	YES	12	275
R-fc 8	L60.6	230×140×8	5	YES	8	275
R-fc 16	L60.6	230×140×8	5	YES	16	275
R-fy355	L60.6	230×140×8	5	YES	12	355
R-fy235	L60.6	230×140×8	5	YES	12	235
R-N.Ca	L60.6	230×140×8	5	NO	12	275

Table 6. Specimens analysed in parametric study of the model subjected to axial load and bending moment

## ۶- نتایج

- بررسی تغییرات در ضخامت نوارها اشکال (۱۱) و (۱۸)
- بررسی تغییرات در مقاومت فشاری بتن ستون اشکال (۱۲) و (۱۹)
- بررسی تغییرات در تنش تسلیم قفس فولادی اشکال (۱۳) و (۲۰)
- بررسی آثار استفاده از سرستون در محل اتصال تیر-ستون اشکال (۱۴) و (۲۱)

در این بخش به بررسی نتایج خروجی از مدل‌سازی‌های صورت گرفته از تحلیل عددی می‌پردازیم که شامل مدل‌های تحت نیروی محوری شکل (۸) الی (۱۴) و مدل‌های تحت نیروی محوری و لنگر خمشی شکل (۱۵) الی (۲۱) است. بررسی پارامترها همانطور که در بخش پنجم هم اشاره شد، به شرح زیر می‌باشد:

- بررسی تغییرات در تعداد نوارها (اشکال ۸ و ۱۵).
- بررسی تغییرات در سایز نوارها (اشکال ۹ و ۱۶).
- بررسی تغییرات در سایز نبشی (اشکال ۱۰ و ۱۷).

شکل ۸. نمودار A: توزیع بار میان ستون و قفس در مدل‌های C-A.St و C-D.St، C-Ref (N<sub>C</sub>: بار تحملی ستون، N<sub>S</sub>: بار تحملی قفس فولادی، P<sub>FEM</sub>: بار نهایی ستون) - نمودار B: تنش‌های فشاری بتن

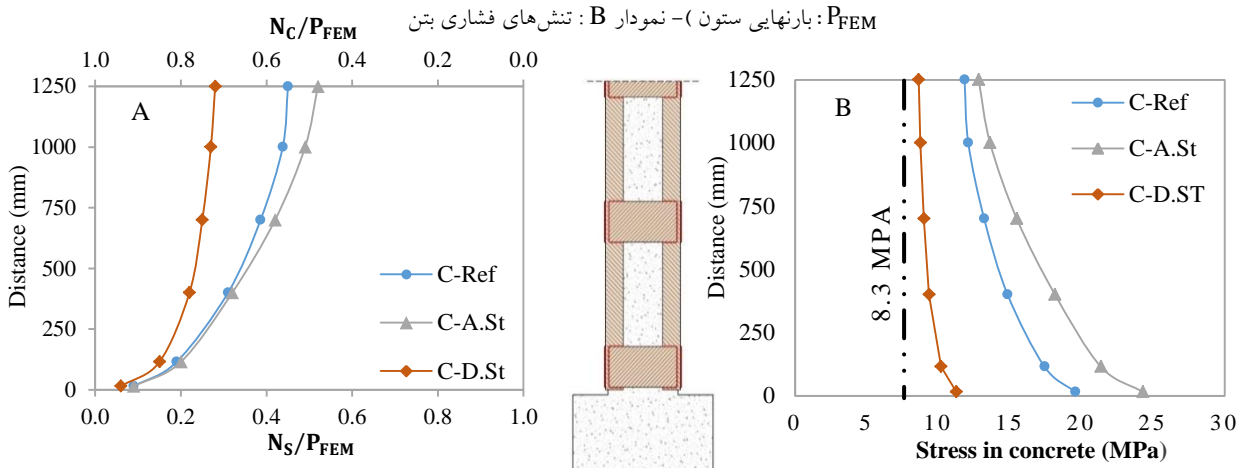


Fig. 8. (A): Load distribution between steel cage and column in C-Ref, C-D.St, C-A.St model. (N<sub>C</sub>, load supported by the column; N<sub>S</sub>, load supported by the cage)., (B): Compressive stress in concrete.

شکل ۹. نمودار A: توزیع بار میان ستون و قفس در مدل‌های C-St200 و C-St120، C-Ref (N<sub>C</sub>: بار تحملی ستون، N<sub>S</sub>: بار تحملی قفس فولادی، P<sub>FEM</sub>: بار نهایی ستون) - نمودار B: تنش‌های فشاری بتن

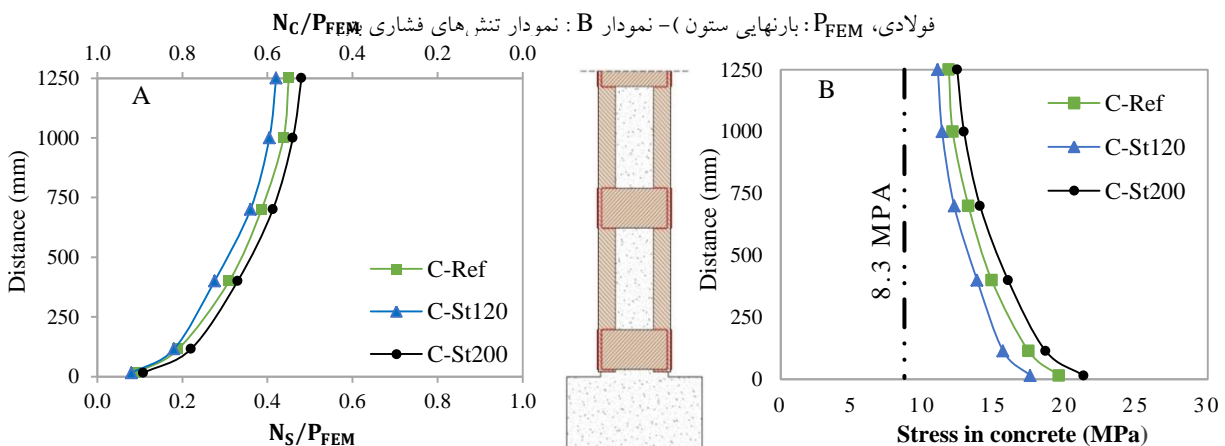


Fig. 9. (A): Load distribution between steel cage and column in C-Ref, C-St120, C-St200 model. (N<sub>C</sub>, load supported by the column; N<sub>S</sub>, load supported by the cage)., (B): Compressive stress in concrete

شکل ۱۰. نمودار A: توزیع بار میان ستون و قفس در مدل‌های C-Ref، C-AL60 و C-AL100.  $N_C$ : بار تحملی ستون،  $N_S$ : بار تحملی قفس

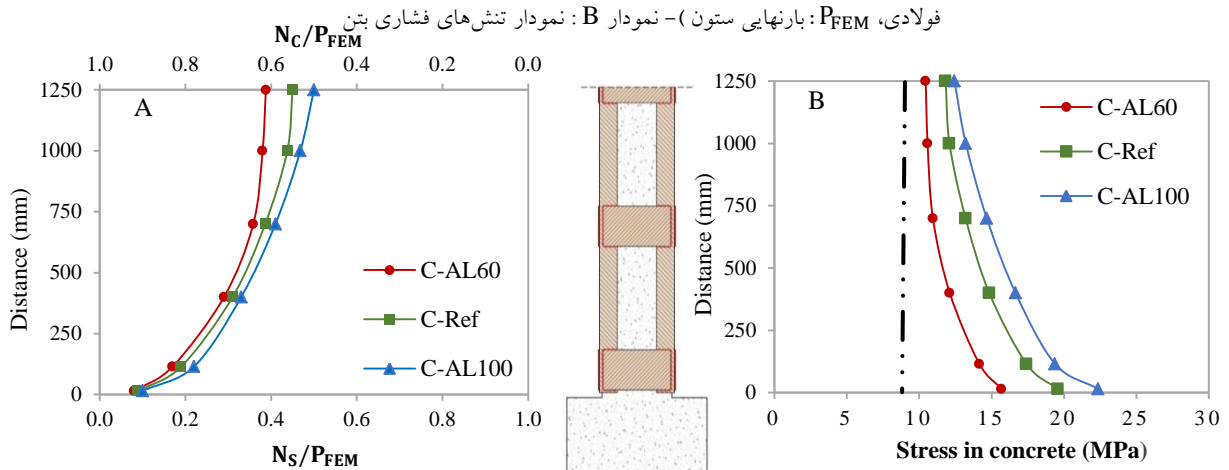


Fig. 10. (A): Load distribution between steel cage and column in C-Ref, C-AL60, C-AL100 model. ( $N_C$ , load supported by the column;  $N_S$ , load supported by the cage)., (B): Compressive stress in concrete

شکل ۱۱. نمودار A: توزیع بار میان ستون و قفس در مدل‌های C-Ref، C-T.St6 و C-T.St10.  $N_C$ : بار تحملی ستون،  $N_S$ : بار تحملی قفس

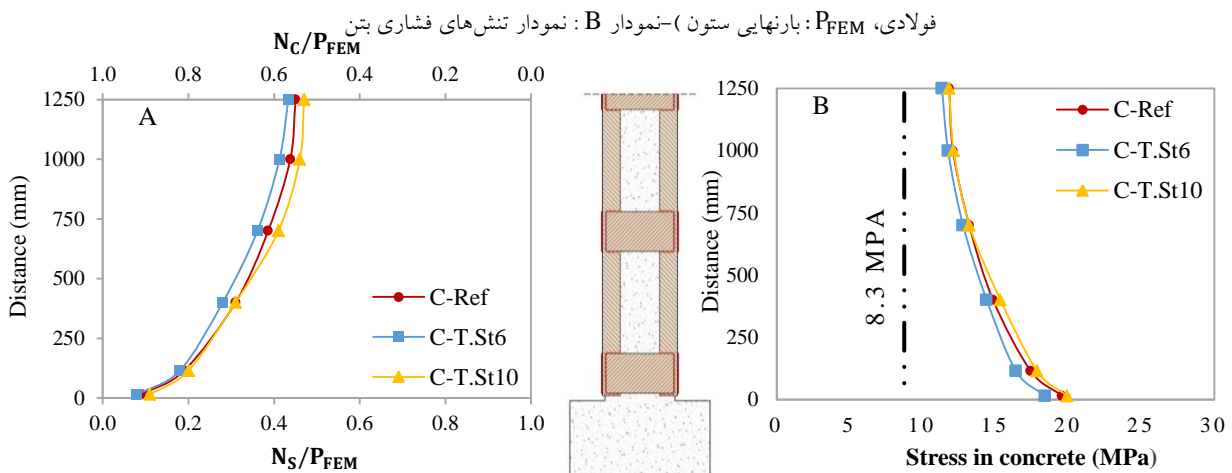


Fig. 11. (A): Load distribution between steel cage and column in C-Ref, C-T.St6, C-T.St10 model. ( $N_C$ , load supported by the column;  $N_S$ , load supported by the cage)., (B): Compressive stress in concrete

شکل ۱۲. نمودار A: توزیع بار میان ستون و قفس در مدل‌های C-Ref، C-fc12 و C-fc16.  $N_C$ : بار تحملی ستون،  $N_S$ : بار تحملی قفس

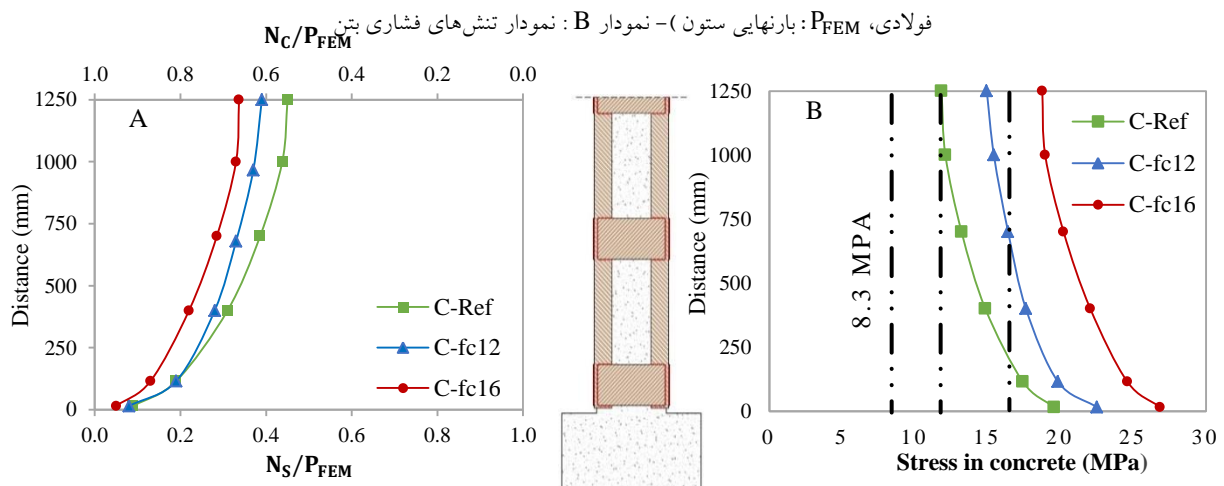


Fig. 12. (A): Load distribution between steel cage and column in C-Ref, C-fc12, C-fc16 model. ( $N_C$ , load supported by the column;  $N_S$ , load supported by the cage)., (B): Compressive stress in concrete



شکل ۱۳. نمودار A: توزیع بار میان ستون و قفس در مدل‌های C-Ref، C-fy235 و C-fy355 (N<sub>C</sub>: بار تحملی ستون، N<sub>S</sub>: بار تحملی قفس)

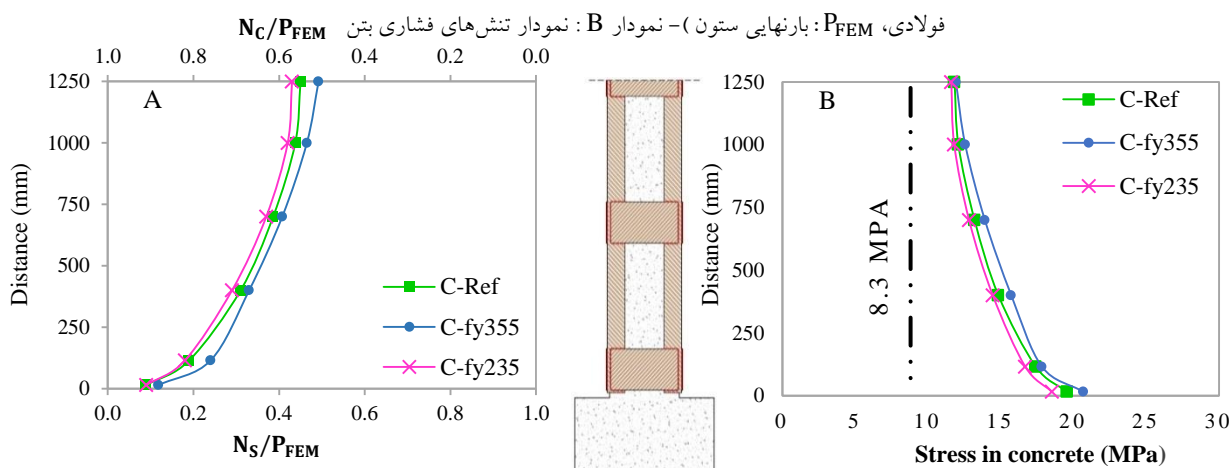


Fig. 13. (A): Load distribution between steel cage and column in C-Ref, C-fy235 C-fy355 model. (N<sub>C</sub>, load supported by the column; N<sub>S</sub>, load supported by the cage)., (B): Compressive stress in concrete

شکل ۱۴. نمودار A: توزیع بار میان ستون و قفس در مدل‌های C-Ref و C-CA.L80 (N<sub>C</sub>: بار تحملی ستون، N<sub>S</sub>: بار تحملی قفس فولادی،

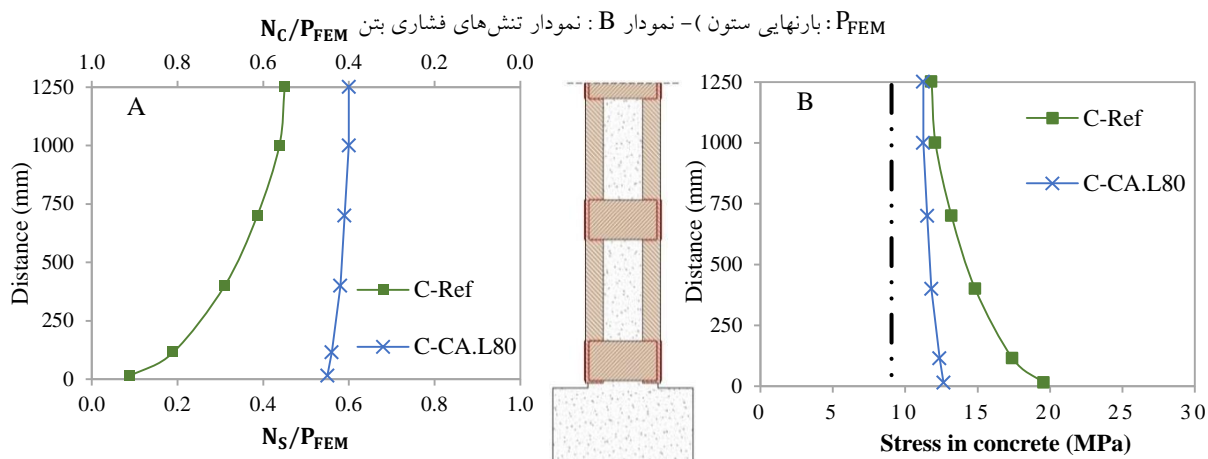


Fig. 14. (A): Load distribution between steel cage and column in C-Ref, C-CA.L80 model. (N<sub>C</sub>, load supported by the column; N<sub>S</sub>, load supported by the cage)., (B): Compressive stress in concrete

برای نمونه‌هایی با سایز نبشی ۶۰ و ۸۰ و ۱۰۰ میلی‌متری نشان داده که سهم بار جذب شده توسط قفس برای این مقادیر به ترتیب ۳۹٪، ۴۵٪ و ۵۰٪ بوده است. مطابق با شکل (۱۱) افزایش ضخامت نوارهای فولادی تاثیر کمی بر رفتار ستون تقویت شده دارد به و میزان جذب بار قفس در زمان استفاده از نوارهایی با ضخامت ۸ میلی‌متری ۴۵٪ بوده که این مقدار در نوار ۶ میلی‌متری به ۴۳٪ و در ۱۰ میلی‌متری به ۴۷٪ رسیده است.

شکل (۱۲) نشان می‌دهد زمانی که مقاومت فشاری بتن ۳/۸ مگاپاسکال بوده، سهم قفس از بار کل ستون ۴۵٪ است که

۱-۶. نتایج نمونه‌های تحت نیروی محوری

شکل (۸) سهم بار تحملی قفس را در مدل‌های دارای ۳، ۵ و ۷ نوار که به ترتیب ۲۸٪، ۴۵٪ و ۵۲٪ است را نشان می‌دهد. نتیجه بدست آمده از افزایش تعداد نوارها، افزایش در ظرفیت بار محوری ستون است.

شکل (۹) بیانگر مقادیر سهم بار جذب شده توسط قفس با نوارهایی به سایز ۱۲۰، ۱۶۰ و ۲۰۰ میلی‌متر به ترتیب ۴۲٪، ۴۵٪ و ۴۸٪ بوده است. نتایج به دست آمده نشانگر میزان بهبود ظرفیت قفس با بزرگتر شدن اندازه نوارها است.

همان‌گونه که انتظار می‌رفت با افزایش سایز نبشی‌ها مقاومت ستون افزایش پیدا کرد. شکل (۱۰) میزان تاثیر سایز نبشی را

محصورشدگی در ستون، مقاومت خمشی و نیروی جذب شده در ستون افزایش یافته که این افزایش در ظرفیت خمشی با افزایش سایز نوارها، در نیروهای محوری بالاتر محسوس تر است.

شکل ۱۶. نمودار نیروی محوری-لنگرخمشی برای نمونه‌های R- R-Un, R-Ref, R-St120, St100,

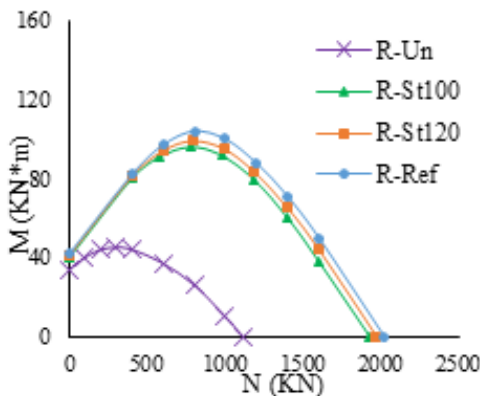


Fig. 16. N-M diagram for specimens R-Un, R-St100, R-St120, R-Ref.

همان‌گونه که انتظار می‌رفت با افزایش سایز نبشی‌ها مقاومت ستون افزایش پیدا کرد. افزایش اندازه نبشی، سبب افزایش سختی آن شده و باعث جذب بار بیشتر در آن می‌شود و در نهایت مقدار باری که بر مفصل تیر- ستون وارد می‌شود، کاهش پیدا می‌کند. بررسی شکل (۱۷) نشان می‌دهد زمانی که مقدار نیروی محوری اعمال شده پایین باشد (حدود ۳۰٪ بیشینه نیروی محوری ستون تقویت شده)، افزایش سایز نبشی تاثیر چندانی در افزایش لنگرخمشی ندارد، اما زمانی که نیروی محوری افزایش پیدا می‌کند تاثیر تغییرات در سایز نبشی بسیار محسوس می‌باشد.

شکل ۱۷. نمودار نیروی محوری-لنگرخمشی برای نمونه‌های R-Un, R-L70, R-Ref, R-L50,

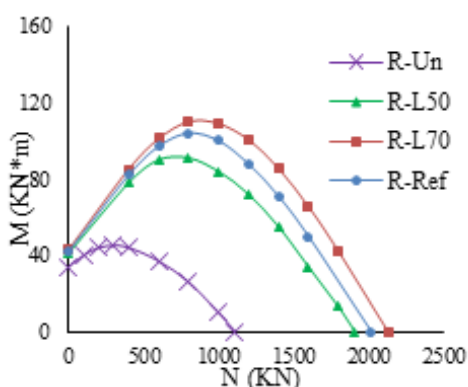


Fig. 17. N-M diagram for specimens R-Un, R-L50, R-Ref, R-L70

این مقدار در نمونه‌هایی با مقاومت فشاری ۱۲ و ۱۶ مگاپاسکالی به ترتیب به ۳۹٪ و ۳۴٪ کاهش یافته است.

مطابق شکل (۱۳)، میزان جذب بار قفس، در زمان استفاده از فولاد با تنش تسلیم ۲۷۵ مگاپاسکال ۴۵٪ بوده که این مقدار در تنش تسلیم ۲۳۵ مگاپاسکال به ۴۳٪ و در تنش تسلیم ۳۵۵ مگاپاسکال به ۴۸٪ رسیده است که نشان از اثر جزیی این پارامتر بر رفتار ستون تقویت شده است.

استفاده از سرستون در مفصل، باعث انتقال خرابی از نقطه بحرانی ستون به سایر نقاط آن می‌شود. همچنین استفاده از این المان باعث افزایش چشمگیر در ظرفیت بار نهایی محوری ستون تقویت شده می‌شود که شکل (۱۴) بیانگر این امر است که سهم بار قفس فولادی در نمونه دارای سرستون از ۴۵٪ به ۶۰٪ رسیده است.

۲-۶. نتایج نمونه‌های تحت نیروی محوری و لنگرخمشی

با مشاهده شکل (۱۵) مشخص است که استفاده از قفس فولادی باعث افزایش چشمگیری در مقاومت خمشی ستون تقویت شده، می‌شود. تغییر در این پارامتر، زمانی که نیروی محوری اعمالی پایین است تاثیر چندانی در افزایش مقاومت خمشی ستون ندارد و افزایش ظرفیت خمشی ستون، زمانی نمود دارد که نیروی محوری اعمال شده، حداقل بیشتر از ۳۰٪ نیروی محوری بیشینه که ستون مقاوم شده، می‌تواند تحمل نماید باشد.

شکل ۱۵. نمودار نیروی محوری-لنگرخمشی برای نمونه‌های R- R-Un, R-Ref, R-4.St, 3.St,

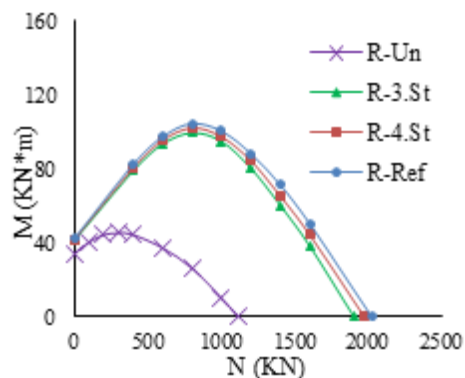


Fig. 15. N-M diagram for specimens R-Un, R-3.St, R-4.St, R-Ref.

نتایج به دست آمده از شکل (۱۶) نشانگر میزان بهبود ظرفیت قفس با بزرگتر شدن اندازه نوارها است. با افزایش

با توجه به شکل (۲۱) استفاده از سرستون باعث بارگذاری مستقیم نبشی‌ها شده و باعث افزایش کارایی قفس فولادی می‌شود که در نهایت استفاده از سرستون در مفصل، سبب افزایش چشمگیر مقاومت خمشی و کارایی قفس فولادی شده است.

شکل ۲۰. نمودار نیروی محوری-لنگرخمشی برای نمونه‌های R- R-Un R-fy355, R-Ref, fy235,

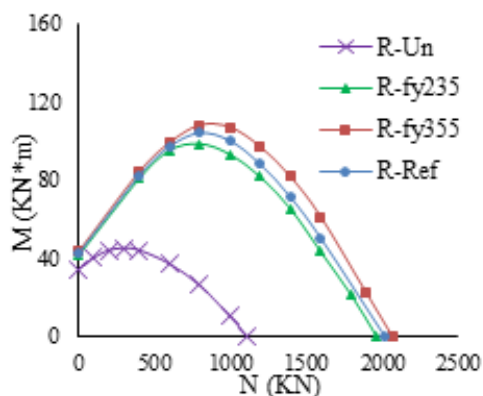


Fig. 20. N-M diagram for specimens R-Un, R-fy235, R-Ref, R-fc16.

شکل ۲۱. نمودار نیروی محوری-لنگرخمشی برای نمونه‌های R-Un R-Ref, R-N.Ca

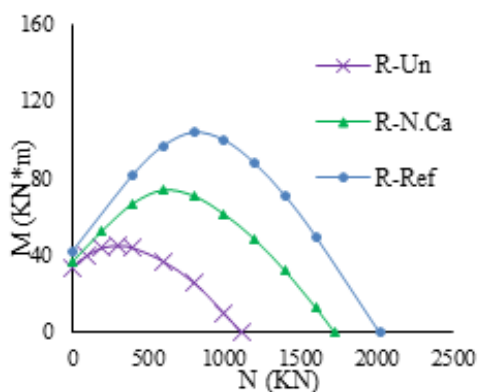


Fig. 21. N-M diagram for specimens R-Un, R-N.Ca, R-Ref.

شکل ۲۲. خرابی مشاهده شده قفس فولادی در نمونه المان محدود و آزمایشگاهی [13]



Fig. 22. Failure modes observed in the FE and experimental model [13]

مطابق با شکل ۱۸. تغییر ضخامت نوارهای فولادی تاثیر چندانی بر رفتار ستون تقویت شده ندارد.

شکل ۱۸. نمودار نیروی محوری-لنگرخمشی برای نمونه‌های R-T.St10, R-Ref, R-T.St6, Un

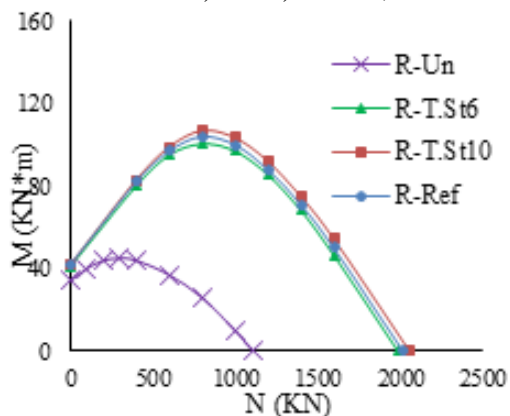


Fig. 18. N-M diagram for specimens R-Un, R-T.St6, R-Ref, R-T.St10.

با افزایش مقاومت فشاری بتن، مقاومت ستون بیشتر شده و بار جذب شده افزایش پیدا کرده و شکل پذیری آن کاهش پیدا می‌کند و این عامل باعث کاهش اثر مقاوم سازی روی ستون است. با مشاهده دیاگرام لنگر- نیرو از شکل (۱۹)، به تاثیر مقاومت فشاری بتن و بهبود ظرفیت خمشی بتن در نیروهای محوری بالاتر پی می‌بریم.

شکل ۱۹. نمودار نیروی محوری-لنگرخمشی برای نمونه‌های R-fc8, R-Un R-fc16, R-Ref,

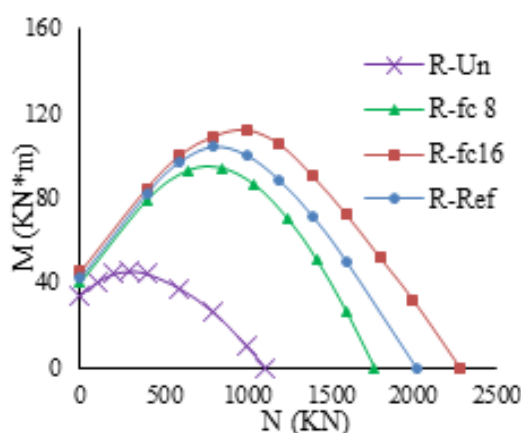


Fig. 19. N-M diagram for specimens R-Un, R-fc8, R-Ref, R-fc16.

مطابق با شکل (۲۰) تغییر تنش تسلیم قفس فولادی تاثیر چندانی در بهبود و افزایش ظرفیت خمشی ستون تقویت شده در بارهای محوری پایین ندارد.

ضخامت نوارهای فولادی، تاثیر جزیی در تغییر ظرفیت بار محوری و مقاومت خمشی ستون تقویت شده، دارد. با افزایش مقاومت فشاری بتن، مقدار سهم بار جذب شده توسط قفس فولادی کمتر می‌شود که ناشی از شکل پذیری کم بتن در مقاومت‌های فشاری بالاترست که می‌توان نتیجه گرفت که هرچه مقاومت فشاری بتن کمتر باشد تاثیر مقاوم-سازی بیشتر است. با این حال با افزایش مقاومت فشاری بتن و افزایش نیروی محوری وارده بر ستون، ظرفیت لنگر خمشی ستون تقویت شده افزایش پیدا می‌کند در حالی که در نیروهای محوری پایین این پارامتر تاثیر چندانی ندارد. افزایش یا کاهش تنش تسلیم قفس فولادی، سهم اندکی در تغییر میزان باربری قفس فولادی و بار نهایی ستون دارد. اضافه کردن سرستون به انتهای نمونه باعث سازوکار انتقال مستقیم بار می‌شود، به شکلی که اضافه شدن این المان باعث بارگذاری مستقیم نبشی در بالای ستون شده و موجب افزایش انتقال بار، بین ستون و قفس فولادی شده و در نهایت سبب افزایش چشمگیر بار نهایی و ظرفیت لنگر خمشی ستون تقویت شده می‌شود.

## References

- ۸-مراجع**
- [1] Frangou, M., Pilakoutas, K. & Dritsos, S. 1995 Structural repair/ strengthening of RC columns. *Construction and Building Materials*, 9(5), 259-266.
- [2] Aboutaha, R. S., Engelhardt, M., Jirsa, J. O., & Kreger, M. F. 1996 Retrofit of Concrete Columns with inadequate lap splices by the use of the rectangular steel jackets. *Earthquake Spectra*, 12(4), 693-714.
- [3] Cirtek, L. 2001 RC columns strengthened with bandage experimental programme and design recommendations. *Construction and Building Materials*, 15(15), 259-266.
- [4] Xiao, Y. & Wu, H. 2003 Retrofit of Reinforced Concrete Columns Using Partially Stiffened Steel Jackets. *Journal of Structural Engineering*, 129(6), 725-732.
- [5] Wu, Y. F., Liu, T., Jirsa, J. O. & Oehlers, D. J. 2006 Fundamental principles that govern retrofitting of reinforced concrete columns by steel and FRP jacketing. *Advances in Structural Engineering*, 9(4), 507-532.
- [6] Adam, J. M., Giménez, E., Calderón, P. A., Pallares, F. J. & Ivorra, S. 2008 Experimental study of beam-column joints in axially loaded RC columns strengthened by steel angles and strips. *Steel and Composite Structures*, 8(4), 329-342.

شکل ۲۳. کانتور تنش فون میزس در نمونه‌های المان محدود

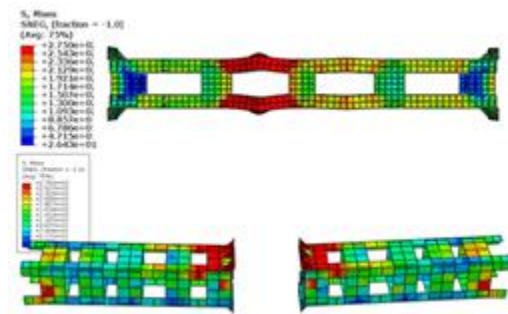


Fig. 23. Von Mises stresses in FE models

شکل ۲۴. مقایسه خرابی در نمونه المان محدود و آزمایشگاهی [14]

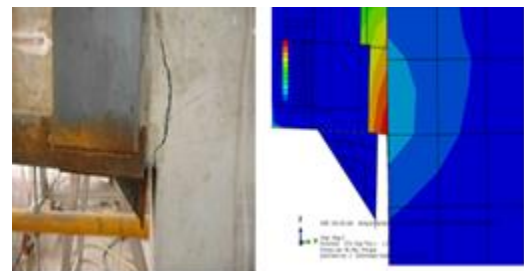


Fig. 24. Comparison of failure in FE and experimental model [14]

## ۷- نتیجه گیری

در این مقاله به بررسی رفتار ستون بتن مسلح تقویت شده با استفاده از روش قفس فولادی پرداخته شده است. بدین منظور رفتار ستون تقویت شده تحت نیروی محوری و لنگر خمشی با هفت پارامتر متغیر ارزیابی گردید که نتایج بدست آمده نشان می‌دهد: تعداد نوارهای فولادی، رابطه‌ی مستقیمی با میزان محصورشدگی ستون دارد که افزایش یا کاهش در تعداد آن، در میزان بار محوری نهایی ستون و مقاومت خمشی آن تاثیر محسوس دارد. محصورشدگی ستون رابطه مستقیمی با اندازه نوارهای فولادی دارد، هرچه این اندازه بیشتر شود در نتیجه انتقال بار توسط تنش‌های برشی افزایش یافته و ظرفیت نهایی ستون افزایش می‌یابد. با افزایش سایز نبشی فولادی، سختی آن نیز بیشتر شده و میزان بار بیشتری جذب می‌کند در نتیجه میزان بار وارده شده بر مفصل تیر-ستون کاهش می‌یابد، بنابراین اندازه نبشی تاثیر زیادی در افزایش باربری و مقاومت خمشی ستون تقویت شده دارد.

- strengthened by steel jacket. *HBRC Journal*, 11(2), 201-212.
- [12] Mander, J., Priestley, M., & Park, R. 1988 Theoretical Stress- Strain Model for Confined Concrete. *Journal of Structural Engineering*,. 114(8), 1804-1826.
- [13] Giménez, E. 2007 Experimental and numerical study of reinforced concrete columns strengthened with steel angles and strips subjected to axial loads. *Technical University of Valencia*. "(PhD thesis in Spanish)"
- [14] Garzón-Roca, J., Adam, J. M. & Calderón, P. A 2011 Behaviour of RC columns strengthened by steel caging under combined bending and axial loads. *Construction and Building Materials*, 25(5), 2402-2412.
- [7] Montuori, R. & Piluso, V. 2009 Reinforced concrete columns strengthened with angles and battens subjected to eccentric load. *Engineering Structures*, 31(31), 539-550.
- [8] Adam, J. M., Ivorra, S., Pallares, F. J. & Giménez, E. 2009 Axially loaded RC columns strengthened by steel caging. Finite element modelling. *Construction and Building Materials*, 23(6), 2265-2276.
- [9] Calderón, P. A., Adam, J. M., Ivorra, S. & Giménez, E. 2009 Design strength of axially loaded RC columns strengthened by steel caging. *Materials & Design*, 30(30), 4069-4080.
- [10] Tarabia, A.M. & Albakry, H.F. 2014 Strengthening of RC columns by steel angles and strips. *Alexandria Engineering Journal*, 53(3), 615-626.
- [11] Belal, M.F., Mohamed, H.M., & Morad, S.A. 2015 Behavior of reinforced concrete columns

## Numerical Investigation of RC Columns Retrofitted with Steel Cage

Gholamreza Zamani Ahari<sup>1</sup>, Ramin Rasouli<sup>2\*</sup>, Saman Yaghmaei Sabegh<sup>3</sup>

1- Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Urmia University

2- M.Sc. in Structural Engineering

3- Associate Professor, Faculty of Civil Engineering, University of Tabriz

\*Rasouli.Ra@yahoo.com

### Abstract

Nowadays, reinforced concrete structures are widely being constructed all over the world and some of them need to be strengthened for variety of reasons such as poor design, damages caused by earthquakes, etc. Nowadays, engineering attitude toward demolition and renovation of structures have been changed to retrofitting and upgrading. By retrofitting, the structural reliability increases and saves both time and cost. In some of special cases that the structure can not be demolished and rebuilt, retrofitting plays an important role. The columns of the structures are one of the main elements that are subjected to axial, shear forces, and bending moments, and their strength and ductility have an important impact on their seismic capacity. Different methods are used for strengthening of columns. These methods include concrete jacketing, steel jacketing and composite jacketing (FRP). Among the various retrofitting methods of reinforced concrete columns, steel jacketing is one of the methods used to strengthening of RC structures, especially for confining RC columns with rectangular and square cross sections. Steel cage is a type of steel jacket and because of its effectiveness, ease of use, light weight and the availability of material, it has become an affordable, effective, economic and simple option. This method involves the use of four longitudinal angle steel profiles fixed to the corners of the RC columns, to which some transverse steel strips are welded. The gap between steel cage and column is filled with cement or epoxy mortar. Different parameters affect the behavior of the column reinforced with steel cage. Studies carried out on this strengthening method have mostly focused on the axially loaded columns. The parameters have been studied are the number of steel strips, the size of the steel strips, the size of the steel angels, the thickness of the steel strips, the yield stress of the steel of the cage, the compressive strength of the concrete used in the column, and, finally, the use of capitals in the beam-column connection joint zone. Capitals are welded to the steel cage and located at each end of the cage, loads applied to the beam are transmitted to the steel cage through the capitals. Loads from an upper floor of the building are also transmitted to the cage through the beam via the capitals. Current study investigates the behavior of RC columns strengthened with steel cage under axial force and bending moment. In this regard, the strengthened RC column with steel cage was modeled using finite element method using ABAQUS software and calibrated by experimental results obtained from other laboratory research works. Then, the parameters affecting the behavior of the strengthened columns were examined. Seven different parametric studies carried out in order to grasp the behavior of the retrofitted columns by using parameters such as the number, size, thickness and yield strength of the steel jacket plates, compressive strength of concrete, condition of the beam to column connection and the mechanism of load transmission. The results of this study show a good agreement with experimental results and demonstrate a considerable increase in the ultimate axial force and bending moment.

**Keywords:** Strengthening, Steel cage, Finite element method, RC column, Seismic retrofitting