



## بررسی رابطه بهینه طراحی آرماتور برشی محصورکننده در شکل‌پذیری ستون‌های بتن مسلح

محمدرضا عدل پرور، احسان دهقانی\*، محمدحسین تقوی پارسا

دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه قم، قم، ایران.

### تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳۹۹/۰۲/۲۲  
بازنگری: ۱۳۹۹/۰۶/۰۸  
پذیرش: ۱۳۹۹/۰۶/۲۱  
ارائه آنلاین: ۱۳۹۹/۰۷/۰۳

### کلمات کلیدی:

شکل‌پذیری  
آرماتورهای برشی محصورکننده  
ستون بتن مسلح  
آباکوس  
DBA  
Vikor

**خلاصه:** از مهم‌ترین ویژگی‌های سازه‌های بتنی رفتار شکل‌پذیر آنها در برابر زلزله است. شکل‌پذیری یک سازه شامل تحمل تغییر شکل‌های غیرارتجاعی نسبتاً زیاد بدون کاهش چشمگیر مقاومت سازه و نیز مستهلک نمودن و جذب مقدار قابل توجهی از انرژی زلزله از طریق چرخه‌های رفتاری پایدار است. آیین‌نامه‌های مختلف برای شکل‌پذیری انواع المان‌های سازه‌ای، محدودیت‌ها و ضوابطی را در نظر گرفته‌اند. هدف از این پژوهش بررسی رابطه بهینه طراحی آرماتور برشی محصورکننده در شکل‌پذیری تیرستون‌های بتن مسلح است. در این مقاله با استفاده از روش عددی، آرماتورهای برشی محصورکننده برای سه نوع ستون با مقطع دایره‌ای با قطر ۷۵۰ میلی‌متر و مربع مستطیلی به ابعاد  $۱۰۰۰ \times ۱۰۰۰$  و  $۵۰۰ \times ۵۰۰$  میلی‌متر در حالت‌های شکل‌پذیری متوسط و زیاد، مورد بررسی قرار گرفته است. همچنین به منظور بررسی اثر مقاومت بتن دو نوع مقاومت ۳۰ و ۶۰ مگاپاسکال در نظر گرفته شده است. مقادیر آرماتور طراحی از طریق روابط پیشنهادی با روابط مقررات ملی ساختمان ایران و نیز انجمن بتن آمریکا مورد ارزیابی قرار گرفت. همچنین شبیه‌سازی عددی با استفاده از نرم‌افزار آباکوس برای حالت‌های شکل‌پذیری متوسط و زیاد با استفاده از روابط مذکور انجام گرفته است. در نهایت با توجه به شکل‌پذیری‌های محوری و دورانی و همچنین آنالیز اقتصادی بر مبنای تحلیل ریاضی DBA و Vikor، در شکل‌پذیری متوسط روابط پیشنهادی بهینه‌ترین روش طراحی در تمامی ستون‌ها محسوب می‌شود. در شکل‌پذیری زیاد نیز، روابط پیشنهادی در ستون‌های دایره‌ای و مربع مستطیلی با مقاومت بتن ۳۰ مگاپاسکال بهینه‌ترین روش طراحی است.

### ۱- مقدمه

هستند. در این مدل‌ها، اگرچه پیشبینی‌های خوبی ارائه می‌گردد، اما در بسیاری موارد از لحاظ آرایش شکل مقطع و تقویت محدودیت دارند. به همین دلیل اثر محصور نمودن تقویت جانبی حلقه‌های اطراف و خاموت‌های میانی، آشکار نیست. لازم به ذکر است که در این تحقیق محصورشدگی میانی مورد بررسی قرار گرفته است.

یکی از مهمترین ویژگی‌های سازه‌های بتنی در مقابل نیروهای ناشی از زلزله رفتار شکل‌پذیر آنها است. به عبارت دیگر هر سازه پایدار و مقاوم در برابر زلزله علاوه بر آنکه باید به صورت یک مجموعه کامل، دارای خاصیت شکل‌پذیری باشد؛ کلیه اعضای آن نیز بایستی جداگانه شکل‌پذیر باشند. شکل‌پذیری سازه‌ها بر دو اساس بیان می‌گردد. نخست آنکه سازه تحمل تغییرشکل‌های غیر ارتجاعی نسبتاً زیاد و در عین حال بدون کاهش چشمگیر مقاومت سازه را داشته باشد؛ دوم، سازه قادر باشد که مقدار قابل توجهی از انرژی زلزله را از طریق چرخه‌های رفتاری پایدار<sup>۱</sup> جذب و مستهلک نماید. یافتن مقادیری برای معیار شکل‌پذیری اعضا به دلیل پیچیدگی‌های رفتار سازه‌ها و مشخص نبودن همه عوامل مؤثر بر آن، با مشکلات زیادی همراه است. مدل‌های تحلیلی معمولاً بر مبنای مجموعه‌ای از داده‌های آزمایشگاهی

آیین‌نامه‌های مختلف تدوین شده در سراسر دنیا برای این مبحث مهم با در نظر گرفتن معیارهای متفاوتی برای شکل‌پذیری، روابطی ارائه نموده‌اند. در آیین‌نامه (ACI318) انجمن بتن آمریکا [۱] برای اطمینان از شکل‌پذیری کافی تیرستون‌های بتن آرمه تحت بار لرزه‌ای شدید، مقدار آرماتورهای عرضی جهت طراحی ستون‌ها به روشنی بیان شده است. در ایران نیز مبحث نهم مقررات ملی ساختمان [۲] و نیز دستورالعمل به سازی لرزه‌های ساختمان‌های موجود (نشریه ۳۶۰) [۳] به این موضوع پرداخته و برای سطوح مختلف شکل‌پذیری، ضوابط و معیارهایی را تعیین نموده‌اند.

1 Hysteresis behavior

\* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: dehghani@qom.ac.ir



محققان دیگر ارائه نموده اند.

بوسالم و شیخ<sup>۷</sup> [۱۰] در سال ۲۰۰۷ یک مدل سازگار برای تیرستونهای بتن مسلح مستطیل شکل را توسعه دادند. متغیرهای اصلی مورد بررسی در این مدل شامل نسبت حجمی تقویت جانبی، خصوصیات فولاد و بتن و ضریب سازگاری اثربخشی است. آنها در مقایسه با سایر مدل‌های موجود نشان دادند که معادلات پیشنهادی از دقت خوبی برخوردار است.

در سال ۲۰۰۹ دوران و همکاران<sup>۸</sup> [۱۱] به مدل‌سازی غیرخطی تیرستون‌های بتنی مستطیلی با FRP پرداختند و نتایج خود را با دستورالعمل (ACI 440.2R-02) مقایسه نمودند. مقایسه‌ها نشان داد که مقادیر فشار حاصل از فرض توزیع تنش یکنواخت در سطح هسته بتن، با حداکثر فشار جانبی در گوشه‌ها سازگار است؛ در حالی که فشار جانبی مؤثر می‌تواند به عنوان حداقل تنش‌های سازگاری در نظر گرفته شود.

یو و همکاران<sup>۹</sup> [۱۲] در سال ۲۰۱۰ با استفاده از مدل آسیب پلاستیک<sup>۱۰</sup>، بتن محصور شده را تحت محصورشدگی غیریکنواخت در نرمافزار آباکوس<sup>۱۱</sup> مدل‌سازی نمودند. آنها در مدل خود تغییراتی بر روی مدل آسیب پلاستیک اعمال نمودند که شامل تعریف یک پارامتر آسیب و یک معیار برای سخت شوندگی و نرم شوندگی بتن است که همه آنها وابسته به فشار حد تسلیم است.

دمیر و همکاران<sup>۱۲</sup> در سال ۲۰۱۶ [۱۳] با استفاده از مدل‌سازی سه بعدی، محصورشدگی را در یک تیر با استفاده از آنالیز غیرخطی اجزاء محدود بررسی کردند و نتایج تحلیل آنها نشان داد که آنالیز اجزاء محدود یک ابزار بسیار مؤثر و قابل اعتماد برای شبیه‌سازی رفتار غیرخطی از تیرهای بتن مسلح است.

ناجدانویچ و همکاران<sup>۱۳</sup> در سال ۲۰۱۶ [۱۴] بر روی مقاومت و شکل پذیری ستونهای دایره‌ای به مطالعه پرداختند. آنها ضمن تمرکز بر روی نمودار تنش-کرنش و تحلیل ارائه شده نشان دادند که محاسبه شکل‌پذیری انحنایی در مقطع، به فاصله بین خاموتها بستگی دارد. آنها همچنین نمودارهایی برای تعیین ابعاد ستون دایره‌ای انعطاف پذیر ارائه نمودند.

وانگ و همکاران<sup>۱۴</sup> [۱۵] در سال ۲۰۱۷ یک مدل رفتاری برای

در سالهای گذشته نیز محققان بسیاری از جمله پالتر<sup>۱</sup> و لگرون<sup>۲</sup> [۴] در سال ۲۰۰۱ بر روی تأثیر مقاومت بتن و تقویت عرضی بر رفتار تیرستونهای بتنی تقویت شده پرداختند. آنها در سال ۲۰۰۸ با انجام پژوهش دیگری بر روی شکل پذیری تیرستونهای بتنی محصور شده، تحقیقات خود را ادامه دادند [۵]. آنها در تحقیق خود معادله جدیدی برای تعیین میزان آرماتورهای محصورکننده ستونهای بتنی دایره‌ای و مستطیلی که قابلیت کاربرد در بتن تا مقاومت ۱۲۰ مگاپاسکال و فولاد تا مقاومت ۱۴۰۰ مگاپاسکال است، ارائه نمودند که این کار بر مبنای معادلات آییننامه بتن کانادا (CSA A23.3) انجام پذیرفت. همچنین پالتر در ادامه تحقیقات خود در مطالعه دیگری در سال ۲۰۰۸ به همراه اید<sup>۳</sup> [۶] به بررسی مدل رفتاری ستون بتنی دایره‌ای مسلح با الیاف از طریق انجام آزمایش و جایگزینی الیاف با آرماتورها پرداخت. محققان با توجه به محدودیت‌های موجود در آیین‌نامه‌های طراحی در تحقیقات بسیاری از روشهای عددی استفاده نموده اند. از طرفی در نظر گرفتن مدل رفتاری مناسب و سازگار با مقطع بتن در شبیه‌سازی‌های عددی نیاز به مهارت و تجربه کاری فراوان دارد. برخی از محققان در زمینه مدل رفتاری مناسب پژوهش‌هایی انجام داده اند. از جمله پارت و همکارش<sup>۴</sup> [۷] در سال ۲۰۰۰ به بررسی عددی تیرستون بتنی محصور شده با مصالح کامپوزیتی پرداختند. آنها مدل پیش‌بینی بار نهایی یک تیرستون بتن مسلح محصور شده با مواد کامپوزیتی را در طول فرآیند بارگیری تا بار نهایی ارائه نمودند.

در سال ۲۰۰۳ هان<sup>۵</sup> و همکاران [۸] مدلی برای محصورشدگی در تیرستونهای بتن مسلح با مقاومت بالا ارائه نمودند. مدل پیشنهادی آنها رفتارهای فشار کششی آزمایشگاهی برای بتن محصور شده با مقاومت بالا تا ۱۰۰ مگاپاسکال را پیش‌بینی می‌کرد.

بینیسی<sup>۶</sup> [۹] در سال ۲۰۰۵ یک مدل تحلیلی برای رفتار تنش-کرنش بتن محصور شده ارائه نموده است. در این مدل، پارامترهای تغییرشکل محوری و جانبی بتن محصور شده تحت فشار بیان و یک مقایسه میان نسبت آرماتور، مقاومت بتن و انرژی شکست فشاری بتن محصور شده با الیاف فولادی و آرماتور انجام گرفته است.

از طرفی، برخی محققان نیز نتایج مدل‌سازی خود را جهت بهره برداری

7 B. Bousalem & N. Chikh

8 B. Doran et al.

9 T. Yu et al.

10 Plastic-Damage Model

11 ABAQUS

12 A. Demir et al.

13 D. Najdanović et al.

14 Zhi-Bin Wang et al.

1 Paul Paultre

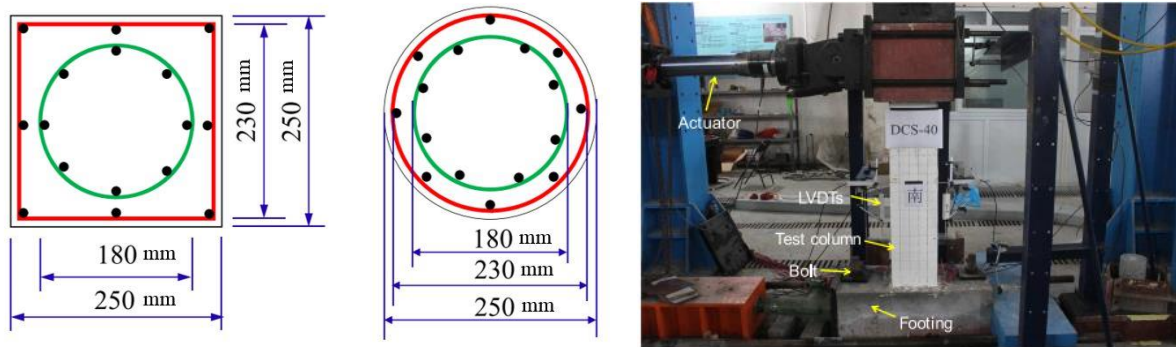
2 Frank Légeron

3 R. Eid

4 S. Parent and P. Labossière

5 Han et al.

6 Baris Binici



شکل ۱. جزئیات آزمایش لی و همکاران [۱۶]

Fig. 1. Details and setup of Li et al. test [16]

با توجه به شکل‌پذیری‌های محوری و دورانی بر مبنای تحلیل ریاضی با روش‌های DBA و Vikor آنالیز اقتصادی انجام گرفته است.

## ۲- طراحی ستونهای بتن آرمه

در اکثر آیین نامه‌ها برای اجرای انواع المانهای سازه‌ای، در بندهای مختلف محدودیت‌ها و ضوابطی در نظر گرفته شده است. مقررات ملی ساختمان ایران نیز ضوابطی مربوط به تعیین طول ناحیه بحرانی تیرستون بیان کرده است. اگر نمودار برش ستونها تحت یک نیروی جانبی نظیر زلزله بررسی شود، مشاهده خواهد شد که در نواحی ابتدایی و انتهایی ارتفاع آزاد ستون، مقدار برش به بحرانیترین مقدار خود میرسد؛ لذا آییننامه برای خاموت گذاری ستون بتنی در این نواحی ضوابط سختگیرانه تری را اعمال میکند. ضوابط خاموت گذاری ستونهای بتن آرمه در مبحث نهم مقررات ملی ساختمان ایران به صورت خلاصه در شکل ۲ نشان داده شده است [۲].

مطابق شکل ۲، طول ناحیه بحرانی که از بر اتصال به اعضای جانبی اندازه‌گیری می‌شود، نباید از هیچ یک از مقادیر زیر تجاوز نماید:

الف) یک ششم ارتفاع آزاد ستون

ب) ضلع بزرگتر مقطع مستطیلی شکل ستون یا قطر مقطع دایره‌ای

شکل ستون

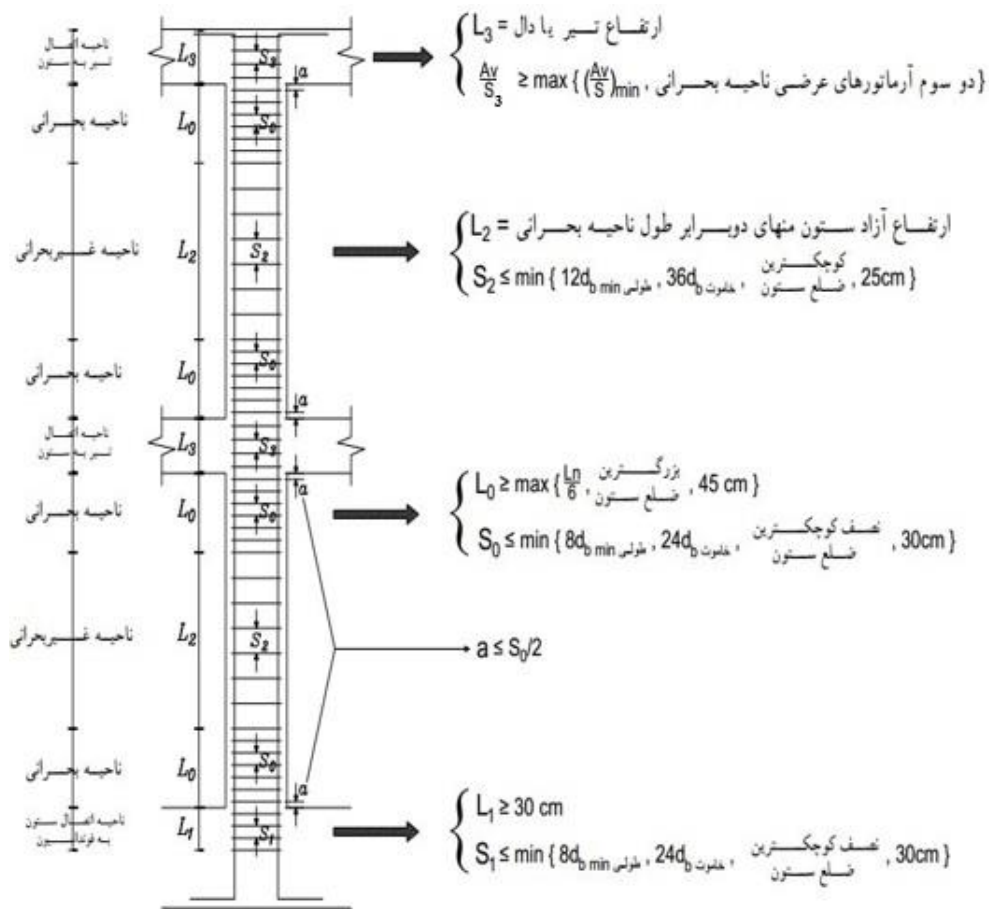
ج) ۴۵۰ میلی‌متر

همچنین فواصل آرماتورهای برشی محصورکننده نیز در مواردی که به صورت خاموت بسته به کار می‌روند، باید کمتر از مقادیر زیر در نظر گرفته

تیرستونهای بتنی محصور شده دایره‌ای و مستطیلی ارائه نمودند که با انجام تحقیقات و آزمایشهای گسترده آن را بهبود بخشیده‌اند. در سال ۲۰۱۸ نیز لی و همکاران [۱۶] به بررسی عملکرد لرزه‌های ستونهای بتن مسلح با دو لایه محصورشدگی به صورت عددی و آزمایشگاهی مطابق شکل ۱ پرداخته‌اند. نتایج آزمونهای آنها نشان می‌دهد که تمام نمونه‌های آزمایش شده، رفتار بسیار شکل‌پذیر از خود نشان می‌دهند.

در داخل کشور نیز تحقیقاتی در این زمینه صورت گرفته است. از جمله مقدم و همکاران [۱۷] در سال ۲۰۰۸ بر روی محصورشدگی تیرستون بتنی با استفاده از نوارهای پس کشیدگی و همچنین مدل رفتاری بتن آزمایشهایی انجام دادند. نتایج آزمون آنها افزایش قابل توجهی در استحکام و انعطاف‌پذیری تیرستون دارای نوارهای فلزی نشان داد. کبیر و شافعی [۱۸] در سال ۲۰۱۱ به مدل‌سازی پلاستیسیته تیرستون بتنی تقویت شده دایره‌ای با FRP که تحت بارگذاری محوری غیر عادی قرار دارد، پرداختند. آنها در مطالعه خود اثر الیاف را بر روی استحکام تیرستون و انعطاف‌پذیری اعضا کاملاً مورد بررسی قرار دادند.

در تحقیق دیگری دهقانی و پارسا [۱۹] بر روی روابط محصورشدگی ستونهای مسلح مستطیلی و دایره‌ای تحقیق نمودند. تحقیق حاضر در راستای تحقیقات گذشته صورت گرفته و با انجام مدل‌سازی عددی، مقادیر آرماتور طراحی حاصل از روابط پیشنهادی با روابط آییننامه مبحث ۹ مقررات ملی ساختمان ایران و روابط انجمن بتن آمریکا مقایسه شده است. همچنین



شکل ۲. ضوابط خاموت گذاری ستون های بتن آرمه مطابق با مبحث نهم مقررات ملی ساختمان [۲]

Fig. 2. Stirrups requirements for concrete columns according to IR code [2]

خمش تأثیرگذار هستند. مقدار آرماتورهای برشی محصورکننده با توجه به سطوح لرزه خیزی در دو حالت شکل پذیری متوسط و زیاد محاسبه می گردد. در متون علمی معتبر روابط بسیاری پیرامون مبحث محصورشدگی ذکر شده است که به بخشی از آنها در مقدمه اشاره گردید. در این قسمت روابط پیشنهادی برای دو مقطع مربع مستطیلی و دایره ای [۱۹] با روابط موجود در مبحث نهم مقررات ملی ساختمان ایران [۲] و همچنین روابط انجمن بتن آمریکا [۱] مقایسه شده است. جداول ۱ و ۲ به ترتیب نشان دهنده روابط سه مرجع یاد شده براساس شکل پذیری متوسط و زیاد است.

#### ۴- طراحی ستون بتن آرمه

در این بخش از تحقیق با توجه به روابط پیشنهادی و نیز ضوابط و بندهای آیین نامه ACI318 و روابط مقررات ملی ساختمان سه نوع ستون

شود:

الف) ۸ برابر قطر کوچکترین میلگرد طولی ستون

ب) ۲۴ برابر قطر خاموت ها

پ) نصف کوچکترین میلگرد طولی ستون

ت) ۳۰۰ میلی متر

#### ۳- آرماتور برشی محصورکننده

به طور کلی در تمامی تیرستون های بتن آرمه دو نوع آرماتور طولی و عرضی استفاده می شود. آرماتورهای طولی جهت تقویت تیرستون بتنی در فشار، خمش و پیچش و نیز آرماتورهای عرضی به منظور تأمین مقاومت برشی و افزایش مقاومت بتن محصور شده در تیرستون های بتن مسلح استفاده می شود. بنابراین هر دو نوع آرماتور در افزایش مقاومت محوری و

جدول ۱. مقایسه ضوابط شکل پذیری متوسط آیین نامه های ایران و آمریکا با روابط پیشنهادی

Table 1. Comparison of medium ductility requirements in IR and ACI code with proposed models

مبحث ۹ مقررات ملی ساختمان ایران [۲]	ACI318 [۱]	رابطه پیشنهادی [۱۹]
مقطع		
دایره‌ای	(۱) $\max \left\{ \rho_s = 0.12 \left( \frac{f'_c}{f_{yt}} \right), \rho_s = 0.45 \left( \frac{A_g}{A_c} - 1 \right) \left( \frac{f'_c}{f_{yt}} \right) \right\}$	(۳) $\rho_s = 0.098 k_p \left( \frac{f'_c}{f_{yh}} \right)$ $k_p = \frac{P}{P_0}$ $P_0 = 0.85 (A_g - A_{st}) f'_c + A_{st} f_y$
مربع مستطیلی	(۲) $\max \left\{ \frac{A_{sh}}{sb_c} = 0.09 \left( \frac{f'_c}{f_{yt}} \right), \rho_s = 0.3 \left( \frac{A_g}{A_c} - 1 \right) \left( \frac{f'_c}{f_{yt}} \right) \right\}$	(۴) $\frac{A_{shy}}{c_y s} = 0.06 k_p k_n \left( \frac{f'_c}{f_{yh}} \right) \left( \frac{A_g}{A_{ch}} \right)$ $k_n = \frac{n_1}{n_1 - 2}$

جدول ۲. مقایسه ضوابط شکل پذیری زیاد آیین نامه های ایران و آمریکا با روابط پیشنهادی

Table 2. Comparison of high ductility requirements in IR and ACI code with proposed models

مقطع	مبحث ۹ مقررات ملی ساختمان ایران [۲]	ACI318 [۱]	رابطه پیشنهادی [۱۹]
دایره‌ای	(۵) $\max of : \left\{ \rho_s = 0.18 \left( \frac{f_{cd}}{f_{yh}} \right), \rho_s = 0.69 \left( \frac{A_g}{A_c} - 1 \right) \left( \frac{f_{cd}}{f_{yh}} \right) \right\}$	(۷) $\rho_s = 0.35 k_f \left( \frac{P_u}{f_{yt} A_{ch}} \right)$	(۹) $\rho_s = 0.17 k_p \left( \frac{f'_c}{f_{yh}} \right)$ $k_p = \frac{P}{P_0}$ $P_0 = 0.85 (A_g - A_{st}) f'_c + A_{st} f_y$
مربع مستطیلی	(۶) $\max of : \left\{ A_{sh} = 0.14 sh_c \left( \frac{f_{cd}}{f_{yh}} \right), A_{sh} = 0.46 sh_c \left( \frac{A_g}{A_{ch}} - 1 \right) \times \left( \frac{f_{cd}}{f_{yh}} \right) \right\}$	(۸) $\frac{A_{sh}}{sb_c} = 0.2 k_f k_n \left( \frac{P_u}{f_{yt} A_{ch}} \right)$	(۱۰) $\frac{A_{shy}}{c_y s} = 0.09 k_p k_n \left( \frac{f'_c}{f_{yh}} \right) \left( \frac{A_g}{A_{ch}} \right)$ $k_n = \frac{n_1}{n_1 - 2}$

جدول ۳. مقایسه مقدار آرماتور برشی محصورکننده از روابط پیشنهادی با آیین نامه ACI 318 در شکل پذیری متوسط

Table 3. Comparison of the required stirrup according to proposed model with ACI code in medium ductility

مقطع ستون	مساحت آرماتور برشی بدست آمده از ACI Committee 318 (میلی متر مربع)	مساحت آرماتور برشی بدست آمده از روابط پیشنهادی (میلی متر مربع)
ستون دایره‌ای با قطر ۷۵۰ میلی متر	۶۲۱	۴۲۵
ستون مربع مستطیلی به ابعاد ۱۰۰۰×۱۰۰۰ میلی متر	۶۳۵	۲۷۴
ستون مربع مستطیلی به ابعاد ۵۰۰×۵۰۰ میلی متر	۲۹۷	۳۰۹

جدول ۴. مقایسه مقدار آرماتور برشی محصورکننده از روابط پیشنهادی با آیین نامه ACI 318 و مقررات ملی ساختمان در شکل پذیری زیاد

Table 4. Comparison of the required stirrup according to proposed model with ACI and IR code in high ductility

مقطع ستون	مساحت آرماتور برشی بدست آمده از ACI Committee 318 (میلی متر مربع)	مساحت آرماتور برشی بدست آمده از مقررات ملی ساختمان (میلی متر مربع)	مساحت آرماتور برشی بدست آمده از روابط پیشنهادی (میلی متر مربع)
ستون دایره‌ای با قطر ۷۵۰ میلی متر	۱۱۴۴	۷۱۲	۱۱۷۱
ستون مربع مستطیلی به ابعاد ۱۰۰۰×۱۰۰۰ میلی متر	۸۵۴	۷۵۴	۴۱۱
ستون مربع مستطیلی به ابعاد ۵۰۰×۵۰۰ میلی متر	۹۱۳	۳۵۳	۲۳۱

در شکل پذیری زیاد، مساحت آرماتور برشی به دست آمده از روابط پیشنهادی در ستون‌های مربع مستطیلی ۵۰۰×۵۰۰ و ۱۰۰۰×۱۰۰۰ میلی متر نسبت به آیین نامه ACI و مقررات ملی ساختمان کمتر است.

#### ۵- شبیه سازی عددی

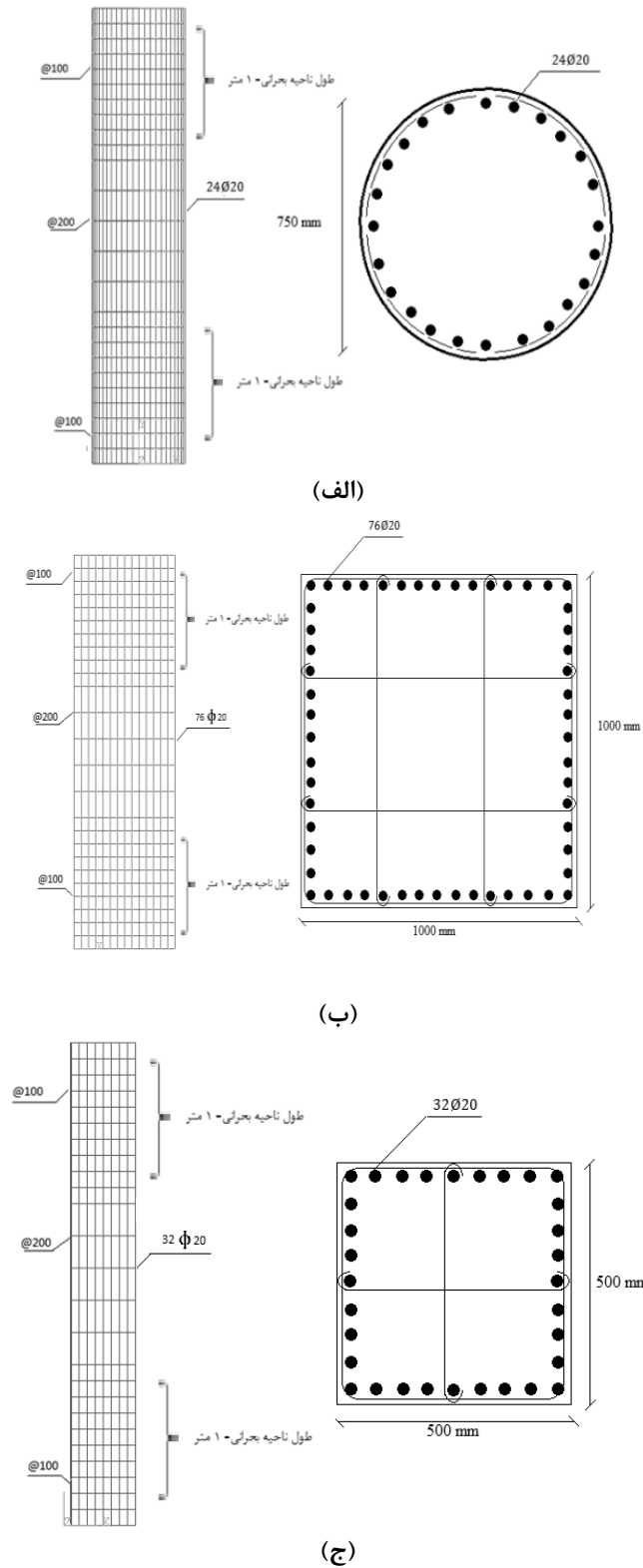
در این قسمت روابط پیشنهادی با انجام مدل سازی عددی مورد بررسی قرار گرفته اند. جهت انجام این کار ابتدا نیاز است تا صحت روش مطالعاتی مورد ارزیابی قرار گیرد.

#### ۵-۱- صحت سنجی

جهت اطمینان از صحت روش مدل سازی، نتایج با مدل آزمایشگاهی

دایره‌ای با قطر ۷۵۰ میلی متر و مربع مستطیلی به ابعاد ۱۰۰۰×۱۰۰۰ و ۵۰۰×۵۰۰ میلی متر طراحی شده است. در شکل ۳ جزئیات آرماتورگذاری ستونها نشان داده شده است. همچنین با توجه به پارامترهای مؤثر در تعیین مقدار آرماتور برشی محصورکننده، به منظور بررسی اثر مقاومت بتن از دو نوع مقاومت ۳۰ و ۶۰ مگاپاسکال استفاده شده است.

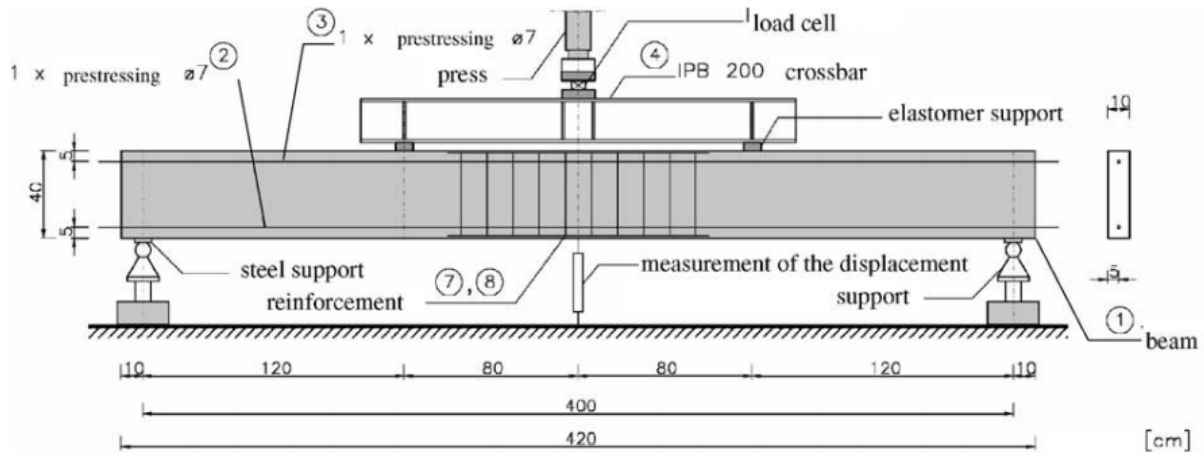
همچنین در جداول ۳ و ۴ مقادیر آرماتور برشی محصورکننده مطابق روابط پیشنهادی با آیین نامه ACI 318 و مقررات ملی ساختمان مبحث ۹ به ترتیب در حالت شکل پذیری متوسط و زیاد مقایسه شده است. با توجه به جدول ۳ برای ستون‌های دایره‌ای به قطر ۷۵۰ میلی متر و مربع مستطیلی به ابعاد ۱۰۰۰×۱۰۰۰ میلی متر در حالت شکل پذیری متوسط استفاده از روابط پیشنهادی آرماتور کمتری را نتیجه می دهد. از طرف دیگر مطابق جدول ۴،



شکل ۳. جزئیات آرماتورگذاری ستون‌ها: (الف) ستون دایره‌ای به قطر ۷۵۰ میلی‌متر، (ب) ستون مربع مستطیلی به ابعاد  $۱۰۰۰ \times ۱۰۰۰$ ، (ج) ستون مربع مستطیلی به ابعاد  $۵۰۰ \times ۵۰۰$

Fig. 3. Arrangement details of bars: (a) circular columns with diameter 750 mm, (b) square columns with cross-section  $1000 \times 1000$  mm, (c) square columns with cross-section  $500 \times 500$  mm





شکل ۴. جزئیات آزمایش تیر مورد نظر [۲۰]

Fig. 4. Details of the simulated beam

جدول ۵. پارامترهای فرض شده در نرم افزار جهت مدل سازی بتن

Table 5. Assumed parameters in ABAQUS for concrete

پارامترهای مصالح	C3D8R	پارامترهای مدل CDP	
		$\psi$	۳۶
خصوصیات الاستیک مصالح		$\sigma_{c0}/\sigma_{p0}$	۱.۱۶
E (Gpa)	۲۵	$K_c$	۰.۶۷
$\nu$	۰.۲	خروج از مرکزیت	۰.۱
تنش فشاری CDP		رفتار خرابی فشاری CDP	
تنش (مگاپاسکال)	کرنش غیرالاستیک	پارامتر خرابی	کرنش غیرالاستیک
9000000	0	0	0
16793967.01	0.0007	0.013483219	3.05E-05
22523018.26	0.001	0.032991157	0.00010211
26666250.56	0.0013	0.062674207	0.000236938
29091277.64	0.0016	0.102243006	0.000440264
30000000	0.0019603	0.160883281	0.000764337
28129409.16	0.002355452	0.248200524	0.001234061
25168472.08	0.002750603	0.343152842	0.001747251
21975839.12	0.003145755	0.437323273	0.002269678
18990847.09	0.003540906	0.524515997	0.002783828
16376673.55	0.003936058	0.601383209	0.003283195
14156449.63	0.004331209	0.666932427	0.003766856
12295340.73	0.004726361	0.721661771	0.004236202
10741068.11	0.005121512	0.766801421	0.004693315
9441309.998	0.005516664	0.80381106	0.005140282
8349982.708	0.005911815	0.834106095	0.00557894
...	...	...	...
1497876.624	0.014605149	0.986500372	0.014545435
1421983.064	0.0150003	0.987513035	0.014943612
تنش کششی CDP		رفتار خرابی کششی CDP	
تنش (مگاپاسکال)	کرنش غیرالاستیک	پارامتر خرابی	کرنش غیرالاستیک
3450652.112	0	0	0
2295713.038	0.000289508	0.740057964	0.000289508
1884035.156	0.000549386	0.86812888	0.000549386
1651583.006	0.000802119	0.9164186	0.000802119
1496056.714	0.001051785	0.940729332	0.001051785
1382096.603	0.001299794	0.955018922	0.001299794

موجود در تحقیق ریزوک و همکاران [۲۰] سنجیده می شود. در این بررسی یک تیر بتن آرمه که مطابق شکل ۴ تحت بار سه نقطه ای قرار داده شده است، در نرم افزار مدل سازی شده و نتایج با یکدیگر مقایسه گردیدند.

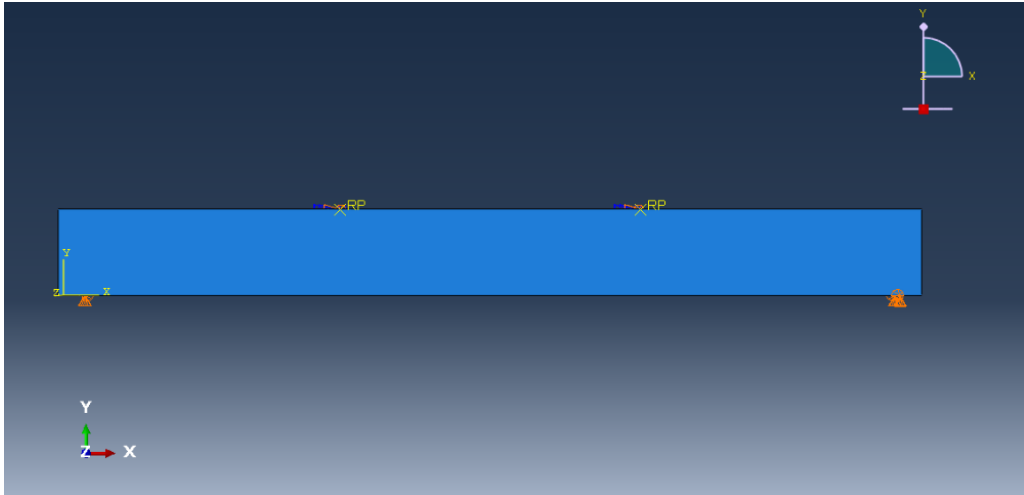
برای مدل سازی بتن در ناحیه پلاستیک و بررسی رفتار آن از مدل پلاستیسیته آسیب بتن<sup>۱</sup> استفاده شده است. در این مدل دو عامل اصلی برای خرابی بتن خردشدگی فشاری و ترک خوردگی کششی فرض می شود. وزن مخصوص بتن ۲۴۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب در نظر گرفته شده و پارامترهای مورد نیاز برای مدل سازی بتن در روش پلاستیسیته آسیب بتن به در جدول ۵ ارائه شده است:

جهت مش بندی بتن از المان استاندارد هشت گرهی و ضمنی خطی C3D8R استفاده شده است و ابعاد مش های در نظر گرفته شده برای بتن ۵ سانتی متر است.

در مدل سازی فولاد، مدل رفتاری به صورت الاستیک-پلاستیک در نظر گرفته شده است. در این مدل، رفتار فولاد قبل از رسیدن به تنش تسلیم به صورت کاملاً الاستیک و خطی بوده و پس از آن تا رسیدن به تنش حد گسیختگی به صورت پلاستیک و غیرخطی است. مدول الاستیسیته و نسبت پواسون فولاد مدل شده به ترتیب برابر با ۲۰۰ گیگاپاسکال و ۰/۳ در نظر گرفته شده است. وزن مخصوص فولاد نیز ۷۸۵۰ کیلوگرم بر مترمکعب در نظر گرفته شده است.

1 Concrete damage plasticity





شکل ۵. مدل ساخته شده در نرم‌افزار

Fig. 5. Simulated model in ABAQUS

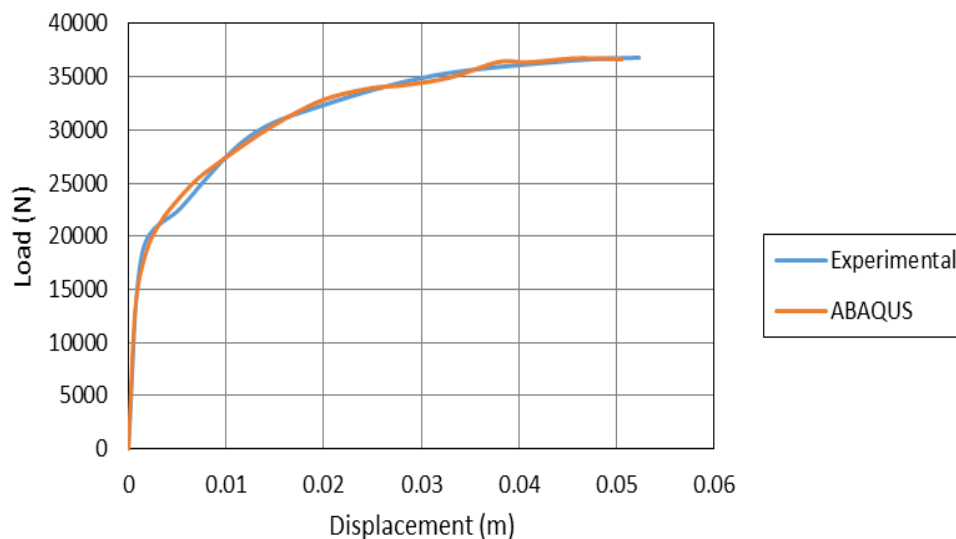
#### ۵-۲- مدل‌سازی هندسی

در این مقاله طول ناحیه بحرانی با استفاده از بندهای مقررات ملی ساختمان محاسبه شده است و در هر مقطع برابر عرض مقطع در نظر گرفته شده است. فاصله خاموت‌ها نیز در تمامی مقاطع در ناحیه بحرانی برابر با ۱۰۰ میلی‌متر و در سایر نواحی ۲۰۰ میلی‌متر در نظر گرفته شده است. فاصله قلاب در مقطع، حداکثر ۳۵۰ میلی‌متر است. بنابراین در مقطع مربع مستطیلی ۵۰۰ میلی‌متری، یک قلاب و مقطع مربع مستطیلی ۱۰۰۰ میلی‌متر، ۲ قلاب به صورت یک در میان روی خاموت‌ها قرار گرفته است.

در این پژوهش، آنالیز توسط نرم‌افزار اجزاء محدود آباکوس انجام گرفته است. برای مدل‌سازی بتن از المان C3D8R با مقاومت ۳۰ و ۶۰ مگاپاسکال و برای مدل‌سازی میلگردها از فولاد با مقاومت تسلیم ۴۰۰ مگاپاسکال استفاده شده است. اندازه مش در نظر گرفته شده برای تمامی مدل‌ها در نرم‌افزار آباکوس برابر ۱۰ سانتی‌متر اختیار شده که هر آرماتور طولی را به ۳۰ المان خربایی، هر خاموت را به ۱۶ المان خربایی، ستون ۵۰۰ میلی‌متری را به ۷۵۰ المان سالیید، ستون ۱۰۰۰ میلی‌متری را به ۳۰۰۰ المان سالیید و ستون دایره‌ای با قطر ۷۵۰ میلی‌متر را به ۲۰۷۰ المان سالیید تقسیم بندی میکند. همچنین ارتفاع کلیه ستونها برابر ۳ متر در نظر گرفته شده است. در جدول ۶ به معرفی مدل‌های عددی ساخته شده در نرم‌افزار پرداخته شده است. لازم به ذکر است در جدول ۶ از نام‌گذاری اختصاری به منظور

به منظور تعیین اندرکنش بین میلگردها و بتن در سازه بتن آرمه، میلگردها به صورت مدفون در بتن در نظر گرفته شده‌اند. همچنین جهت مدل‌سازی آرماتورها از المان‌های دو گرهی میله‌ای (B31) ضمنی و خطی استفاده شده است. طول مش‌ها نیز ۵ سانتی‌متر می‌باشد.

تکیه‌گاه‌های در نظر گرفته شده در مدل به صورت غلتکی با مقید کردن جابه‌جایی در راستای محور Z و Y است. نوع تحلیل هم به شکل تغییر مکان کنترل می‌باشد، یعنی تغییر مکان‌های خواسته شده اعمال می‌شود و سپس بار مورد نیاز توسط نرم‌افزار تعیین می‌گردد. بنابراین جهت بارگذاری دو صفحه صلب با ابعاد ۱۰ سانتی‌متر در ۱۰ سانتی‌متر به گونه‌ای به تیر اتصال داده می‌شود که مرکز آن دقیقاً منطبق بر محل اعمال بار متمرکز وارد بر سازه شود. سپس با تعریف دو نقطه مرجع در مرکز هر یک از این دو صفحه صلب و اعمال جابه‌جایی در خلاف جهت محور Y به آن‌ها، تیر بارگذاری می‌شود. با توجه به این که حل گر آباکوس، دینامیکی ضمنی با گام‌های ضمنی حداکثر ۰/۰۵ و حداقل ۰/۰۰۰۰۱ تا رسیدن به زمان ۱ ثانیه در نظر گرفته شده، جابه‌جایی به سازه وارد می‌شود و نمودار بار جابه‌جایی بدست می‌آید. در شکل‌های ۵ و ۶ به ترتیب مدل ساخته شده در نرم‌افزار و نمودار صحت‌سنجی نتایج عددی با آزمایشگاهی نشان داده شده است. مطابق شکل ۶ نتایج به دست آمده از تحلیل عددی کمتر از ۱۰ درصد با نتایج آزمایشگاهی اختلاف داشت.



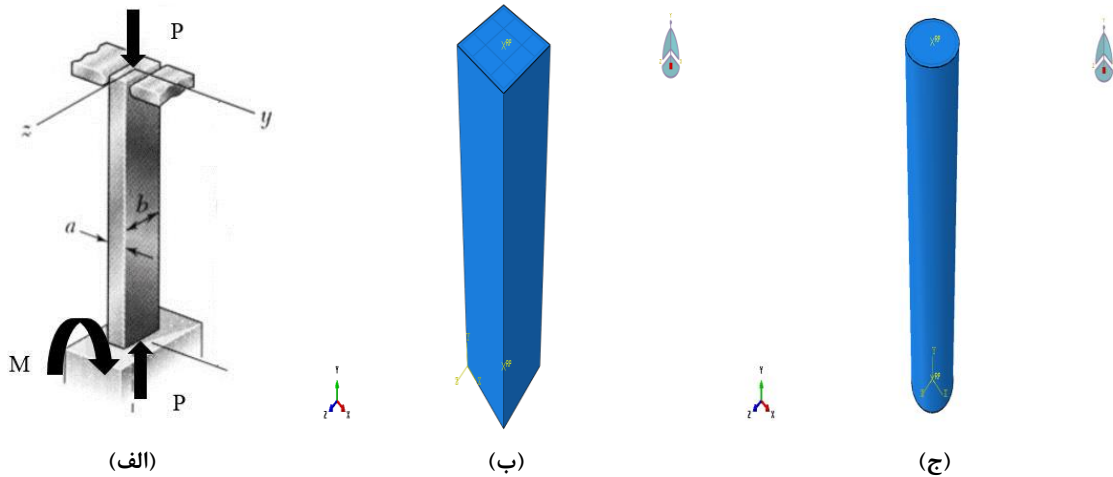
شکل ۶. نمودار صحت‌سنجی نتایج عددی با آزمایشگاهی

Fig. 6. Verification curves of numerical and experimental results

جدول ۶. معرفی مدل‌های عددی ساخته شده

Table 6. Summarization of numerical models

ردیف	نام مدل	توضیح	مرجع
۱	A-C-M	مدل ستون دایره‌ای قطر ۷۵۰ میلی‌تر با شکل‌پذیری متوسط	ACI
۲	P-C-M	مدل ستون دایره‌ای قطر ۷۵۰ میلی‌تر با شکل‌پذیری متوسط	روابط پیشنهادی
۳	A-S500-M	مدل ستون مربع مستطیلی به اضلاع ۵۰۰×۵۰۰ با شکل‌پذیری متوسط	ACI
۴	P-S500-M	مدل ستون مربع مستطیلی به اضلاع ۵۰۰×۵۰۰ با شکل‌پذیری متوسط	روابط پیشنهادی
۵	A-S1000-M	مدل ستون مربع مستطیلی به اضلاع ۱۰۰۰×۱۰۰۰ با شکل‌پذیری متوسط	ACI
۶	P-S1000-M	مدل ستون مربع مستطیلی به اضلاع ۱۰۰۰×۱۰۰۰ با شکل‌پذیری متوسط	روابط پیشنهادی
۷	A-C-H	مدل ستون دایره‌ای قطر ۷۵۰ میلی‌تر با شکل‌پذیری زیاد	ACI
۸	I-C-H	مدل ستون دایره‌ای قطر ۷۵۰ میلی‌تر با شکل‌پذیری زیاد	مبحث ۹
۹	P-C-H	مدل ستون دایره‌ای قطر ۷۵۰ میلی‌تر با شکل‌پذیری زیاد	روابط پیشنهادی
۱۰	A-S500-H	مدل ستون مربع مستطیلی به اضلاع ۵۰۰×۵۰۰ با شکل‌پذیری زیاد	ACI
۱۱	I-S500-H	مدل ستون مربع مستطیلی به اضلاع ۵۰۰×۵۰۰ با شکل‌پذیری زیاد	مبحث ۹
۱۲	P-S500-H	مدل ستون مربع مستطیلی به اضلاع ۵۰۰×۵۰۰ با شکل‌پذیری زیاد	روابط پیشنهادی
۱۳	A-S1000-H	مدل ستون مربع مستطیلی به اضلاع ۱۰۰۰×۱۰۰۰ با شکل‌پذیری زیاد	ACI
۱۴	I-S1000-H	مدل ستون مربع مستطیلی به اضلاع ۱۰۰۰×۱۰۰۰ با شکل‌پذیری زیاد	مبحث ۹
۱۵	P-S1000-H	مدل ستون مربع مستطیلی به اضلاع ۱۰۰۰×۱۰۰۰ با شکل‌پذیری زیاد	روابط پیشنهادی



شکل ۷. (الف) شرایط مرزی ایجاد شده در نرم افزار، (ب) مدل سازی ستون مربع مستطیلی، (ج) مدل سازی ستون دایره ای

Fig. 7. (a) Boundary conditions in ABAQUS, (b) square column simulation, (c) circular column simulation

### ۵-۳- مدل سازی مصالح

به منظور تعریف رفتار بتن در مدل عددی از روش پلاستیسیته آسیب بتن (CDP) استفاده شده است [۲۱]. برای تعیین رفتار کششی و فشاری بتن تحت مدل CDP از روابط (۱۱) تا (۱۳) استفاده می شود:

$$\varepsilon^{in} = \varepsilon - \sigma E^{-1} \quad (11)$$

$$\varepsilon^{pl} = b \varepsilon^{in} \quad (12)$$

$$d_t = 1 - \frac{\sigma E^{-1}}{\varepsilon^{pl} (1/b - 1) + \sigma E^{-1}} \quad (13)$$

در این روابط کرنش پلاستیک (کششی یا فشاری) با توجه به حاصل ضرب ضریب خرابی  $b$  که مقدار آن برابر  $0.7$  توصیه شده، در کرنش غیرالاستیک (کششی یا فشاری) بدست می آید. در نهایت نیز پارامتر خرابی (کششی یا فشاری)  $d_t$  در انتهای محاسبات به همراه کرنش غیرالاستیک در نرم افزار تعریف می شود.

مشخصات پیشنهادی بتن در جدول ۷ و منحنی تنش-کرنش استفاده شده برای بتن در کشش و فشار در شکل ۸ ارائه شده است.

معرفی مدل استفاده شده است. بدین ترتیب اولین حرف اختصاری مشخص کننده نوع رابطه استفاده شده است که حروف  $P$  و  $I, A$  به ترتیب بیانگر روابط آیین نامه ACI 318، مقررات ملی ساختمان مبحث نهم و رابطه پیشنهادی می باشد. دومین حرف اختصاری نشان دهنده شکل مقطع است که از حروف  $S$  و  $C$  به ترتیب برای مقاطع دایره ای و مربع مستطیلی استفاده شده است. اعداد  $500$  و  $1000$  در کنار حرف  $S$  در مقاطع مربع مستطیلی نمایانگر بعد مقطع است. آخرین حرف نیز گویای سطح شکل پذیری مورد نظر است که برای شکل پذیری های متوسط و زیاد از حروف  $H$  و  $M$  استفاده شده است.

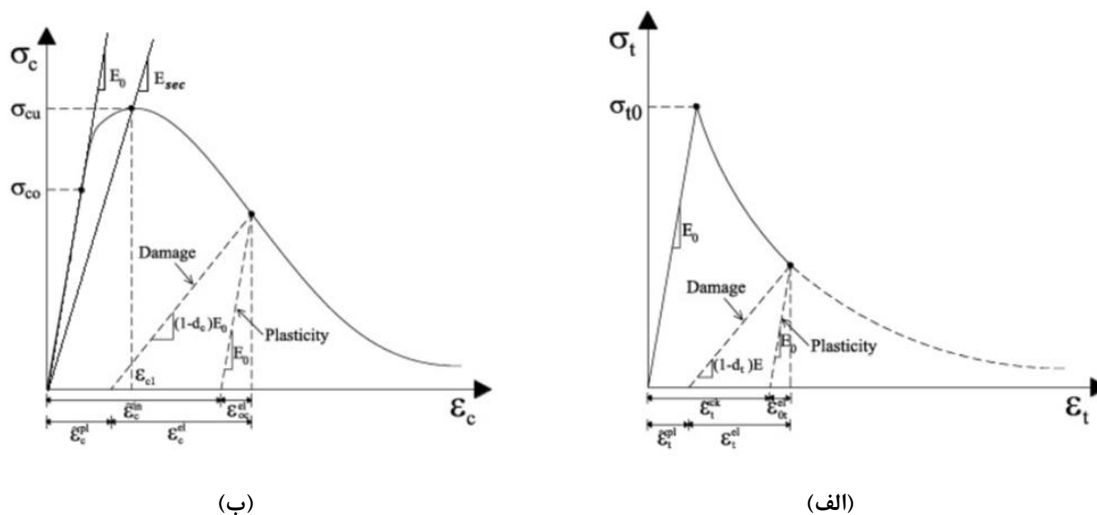
به منظور اعمال شرایط تکیه گاهی تیرستون، دو صفحه صلب، پایین به صورت تکیه گاه گیردار و بالا برای اعمال بار استفاده شده است. همچنین برای بارگذاری، بر روی صفحه صلب بالا، نیروی قائم و لنگر خمشی به صورت متمرکز تعریف شده است. در این مدل سازی فرض می شود که از شکسته ای موضعی محل اعمال نیرو صرف نظر شده است.

برای اعمال بارگذاری در مدل عددی از روش تغییرمکان-کنترل استفاده شده است. در این روش تغییرمکانهای محوری و دورانی هدف به نرم افزار وارد شده و نرم افزار بر حسب تغییرمکان های وارد، نیروهای مورد نیاز را محاسبه می کند. در شکل ۷-الف شرایط مرزی ایجاد شده برای هر تیرستون و در قسمت ۷-ب و ج، تیپ تیرستونهای مدل سازی شده در نرم افزار نشان داده شده است.

جدول ۷. مشخصات پیشنهادی استفاده شده برای مدل CDP بتن

Table 7. Suggested properties for CDP model

پارامتر ویسکوزیته ( $\mu$ )	$K$	$\sigma_{c0}/\sigma_{b0}$	خروج از محوریت	زاویه اتساع ( $\psi$ )
۰/۰۰۱	۰/۶۷	۱/۱۶	۰/۱	۳۶



شکل ۸. رفتار بتن در مدل پلاستیک آسیب دیده (CDP)؛ (الف) رفتار کششی، (ب) رفتار فشاری [۲۱]

Fig. 8. Concrete behavior in CDP model: (a) tensile behavior, (b) compressive behavior

ستون چسبیده می‌شود و سپس با تعریف نقطه مرجع در مرکز این صفحه صلب و اعمال جابه‌جایی و دوران به ترتیب در خلاف جهت محور  $Y$  و محور  $Z$  سازه بارگذاری می‌شود. با انتخاب دینامیک ضمنی با گام‌های ضمنی حداکثر ۰/۰۵ و حداقل ۰/۰۰۰۰۱ تا رسیدن به زمان ۱ ثانیه در آباکوس، جابه‌جایی به سازه به تدریج وارد می‌شود و نمودار بار-جابه‌جایی تا زمان کمانش آرماتورها بدست می‌آید. با کمانش آرماتورها ادامه فرآیند حل در گام زمانی که کمانش رخ می‌دهد، متوقف شده و با بررسی سازه محل وقوع کمانش در آرماتورها مشخص می‌شود.

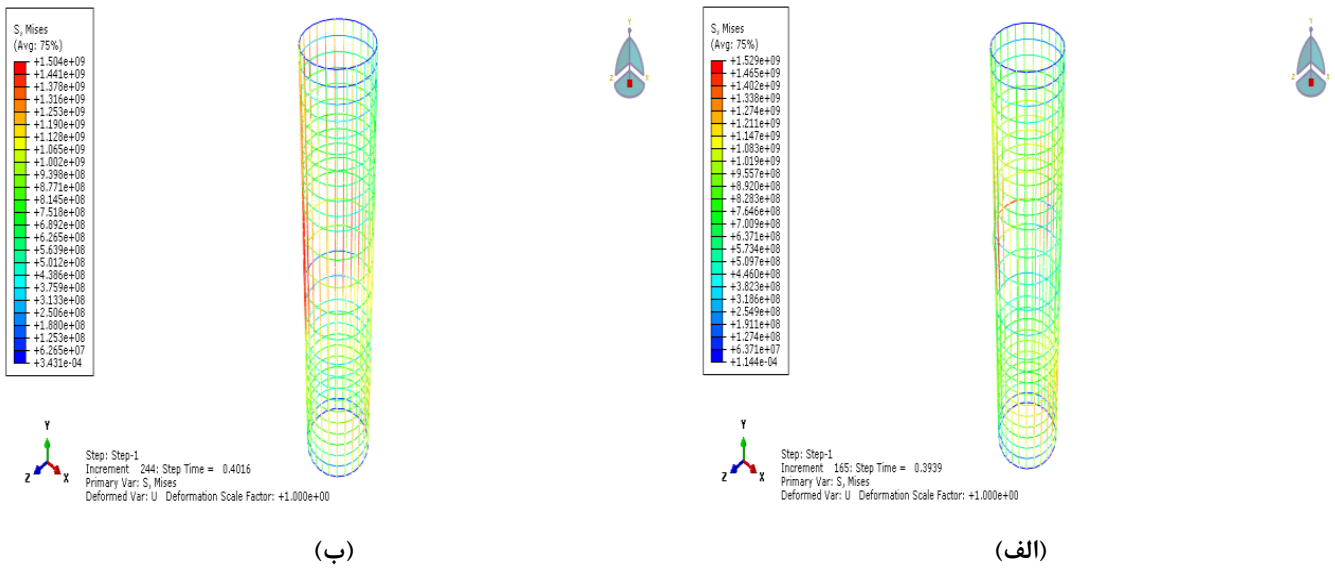
همچنین در شکل‌های ۱۲ تا ۱۴ تیپ کمانش طولی آرماتورها برای شکل‌پذیری متوسط و زیاد هر یک از تیرستونها نشان داده شده است.

همچنین در شکل‌های ۱۵ تا ۱۷ تغییرشکل تیرستونها برای شکل‌پذیری متوسط و زیاد نشان داده شده است. نتایج تحلیل عددی صورت گرفته در آباکوس بر اساس مقررات ملی ساختمان ایران، آئین‌نامه ACI و

در مورد آرماتورها بایستی به این نکته اشاره شود که چون طول آرماتورها در مقایسه با قطر آنها زیاد است، آرماتورها به صورت المان سه‌بعدی سیم (wire) در آباکوس تعریف شده است. همچنین فرض شده است که آرماتورها کاملاً در بتن مدفون شده و امکان لغزش ندارند. خم خاموت‌های مستطیلی نیز در مدل‌سازی وارد نشده و به صورت ۹۰ درجه مدل شده‌اند.

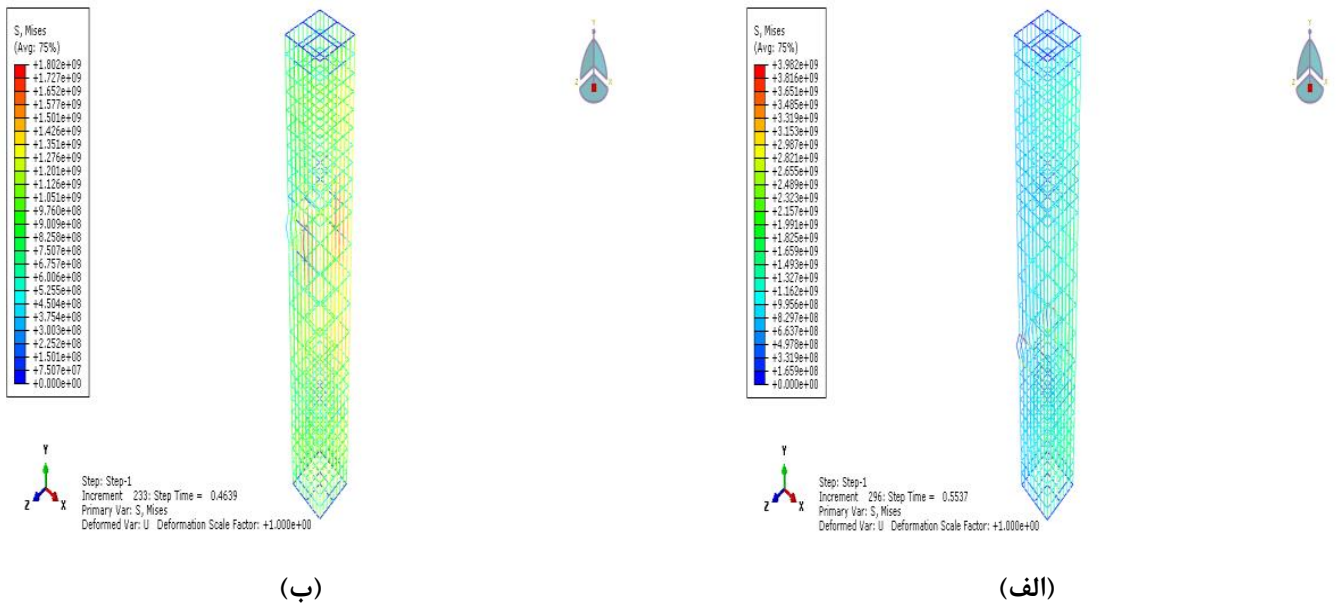
۵-۴- تحلیل عددی

با توجه به تحلیل عددی صورت گرفته، در شکل‌های ۹ تا ۱۱ توزیع تنش در آرماتورها برای شکل‌پذیری متوسط و زیاد هر یک از تیرستونها به صورت نمونه نشان داده شده است. لازم به ذکر است که نوع تحلیل به شکل تغییرمکان کنترل است، یعنی تغییرمکان‌های خواسته شده اعمال می‌شود و سپس بار مورد نیاز را خود نرم‌افزار اعمال می‌کند. بنابراین جهت بارگذاری نیز یک صفحه صلب در بالای ستون در نظر گرفته شده و به قسمت فوقانی



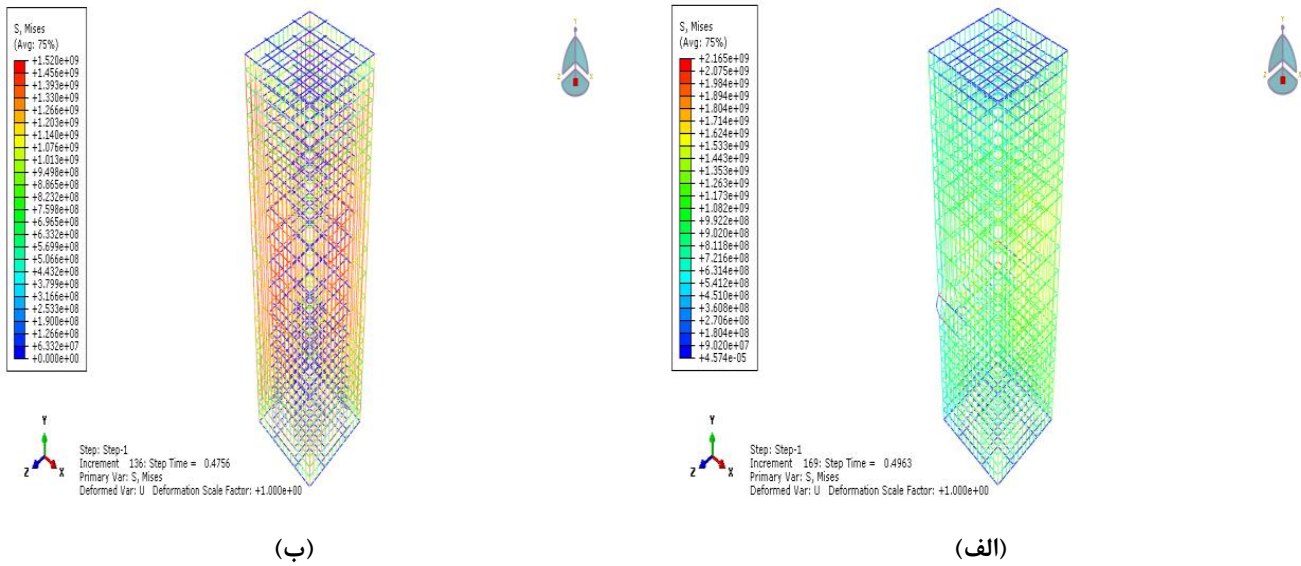
شکل ۹. توزیع تنش در آرماتورهای ستون دایره‌ای (الف) شکل پذیری متوسط، (ب) شکل پذیری زیاد

Fig. 9. Stress distribution in circular column bars: (a) medium ductility, (b) high ductility



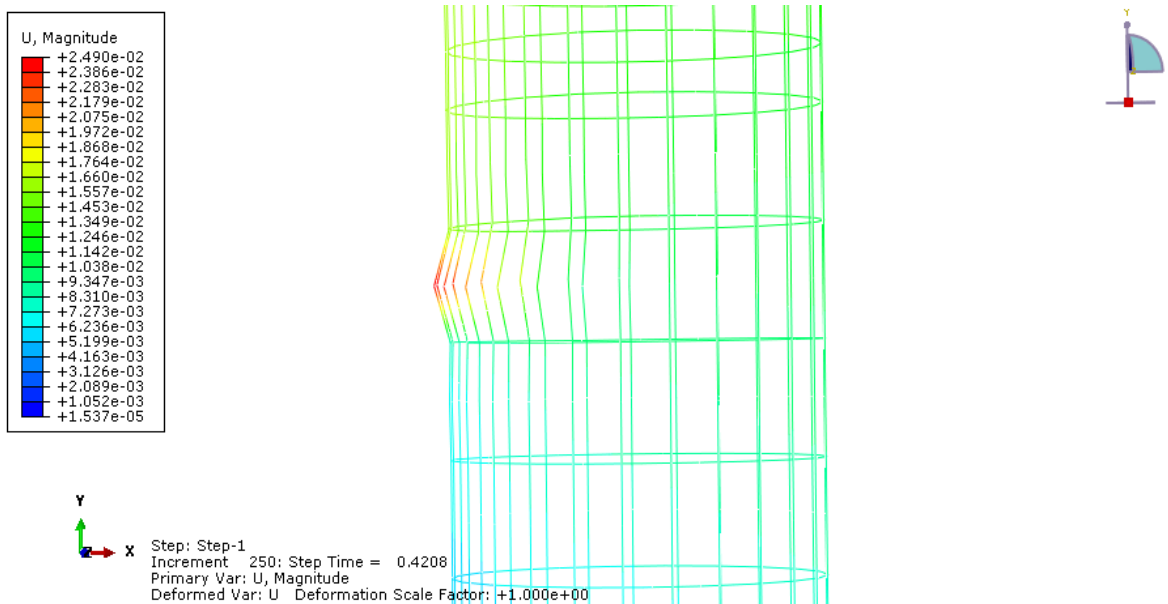
شکل ۱۰. توزیع تنش در آرماتورهای ستون مربع مستطیلی ۵۰۰×۵۰۰ (الف) شکل پذیری متوسط، (ب) شکل پذیری زیاد

Fig. 10. Stress distribution in bars of square column with cross-section 500×500 mm: (a) medium ductility, (b) high ductility



شکل ۱۱. توزیع تنش در آرماتورهای ستون مربع مستطیلی  $1000 \times 1000$  (الف) شکل پذیری متوسط، (ب) شکل پذیری زیاد

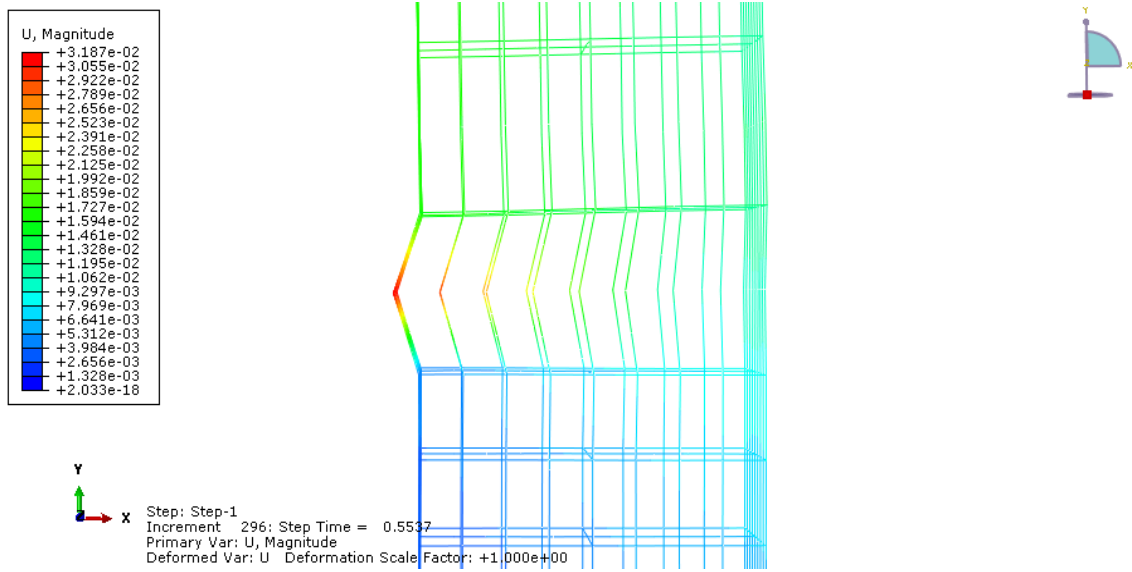
Fig. 11. Stress distribution in bars of square column with cross-section  $1000 \times 1000$  mm: (a) medium ductility, (b) high ductility



شکل ۱۲. کماتش طولی آرماتورهای ستون دایره‌ای

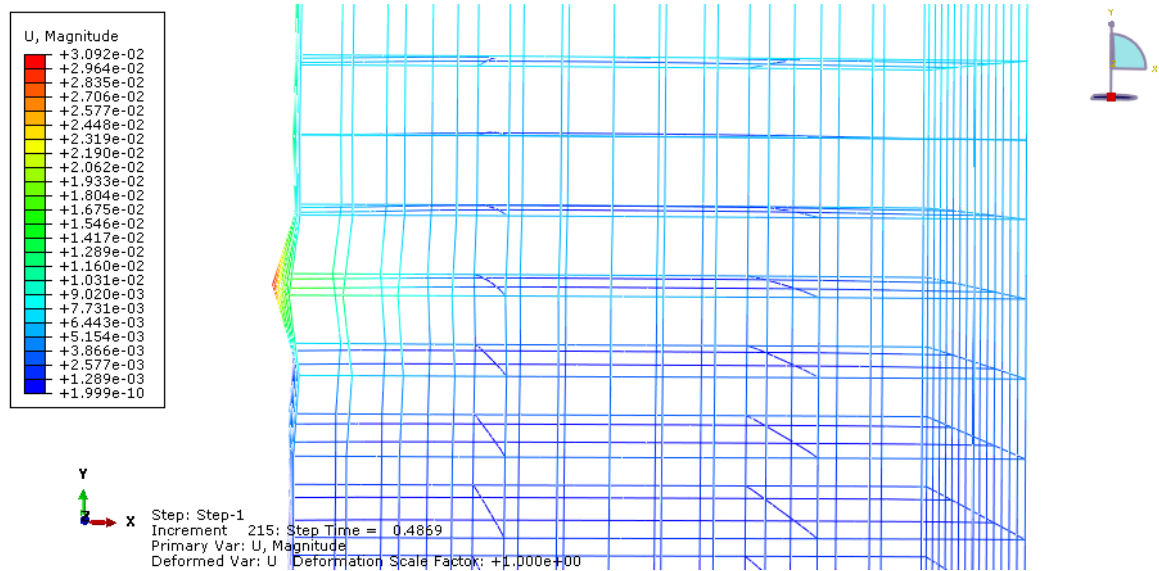
Fig. 12. Longitudinal buckling for bars of circular column





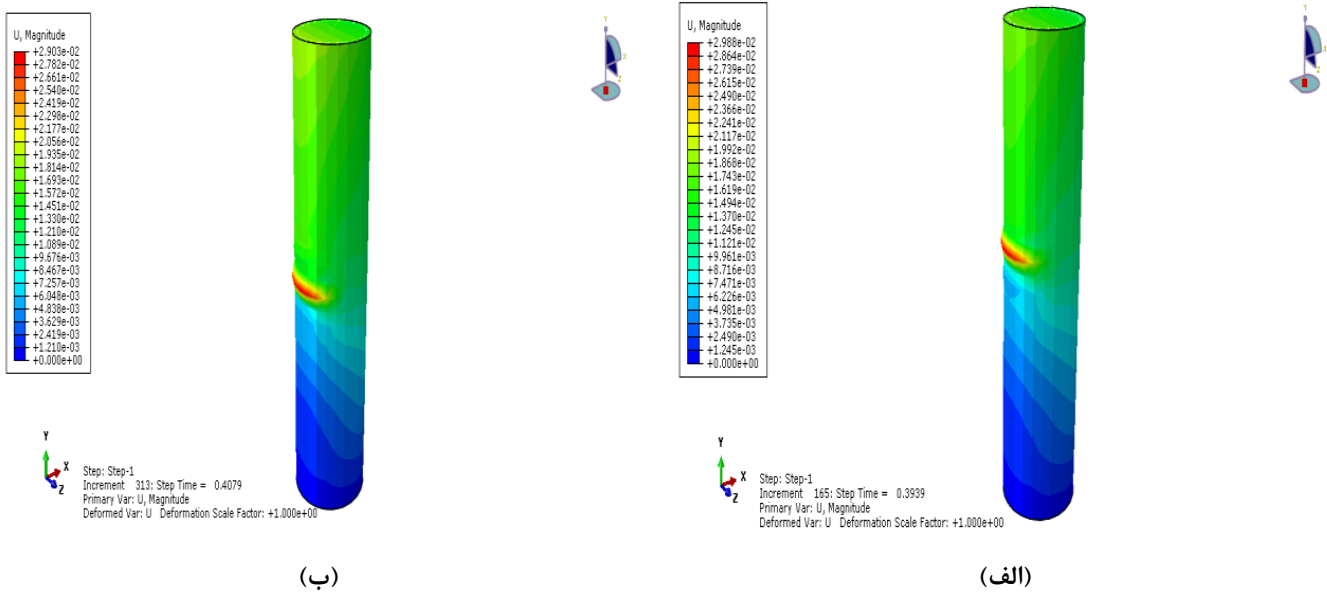
شکل ۱۳. کمانش طولی آرماتورهای ستون مربع مستطیلی ۵۰۰×۵۰۰

Fig. 13. Longitudinal buckling for bars of square column with cross-section 500×500 mm



شکل ۱۴. کمانش طولی آرماتورهای ستون مربع مستطیلی ۱۰۰۰×۱۰۰۰

Fig. 14. Longitudinal buckling for bars of square column with cross-section 1000×1000 mm

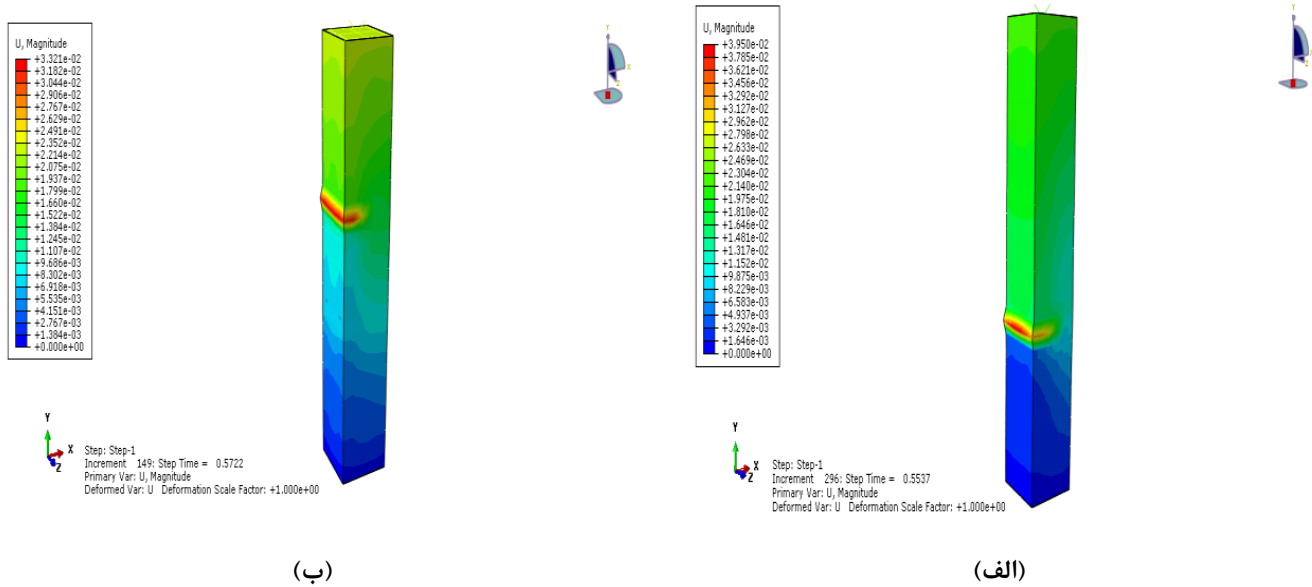


(ب)

(الف)

شکل ۱۵. تغییر شکل ستون دایره‌ای (الف) شکل پذیری متوسط، (ب) شکل پذیری زیاد

Fig. 15. Deflection of circular column: (a) medium ductility, (b) high ductility

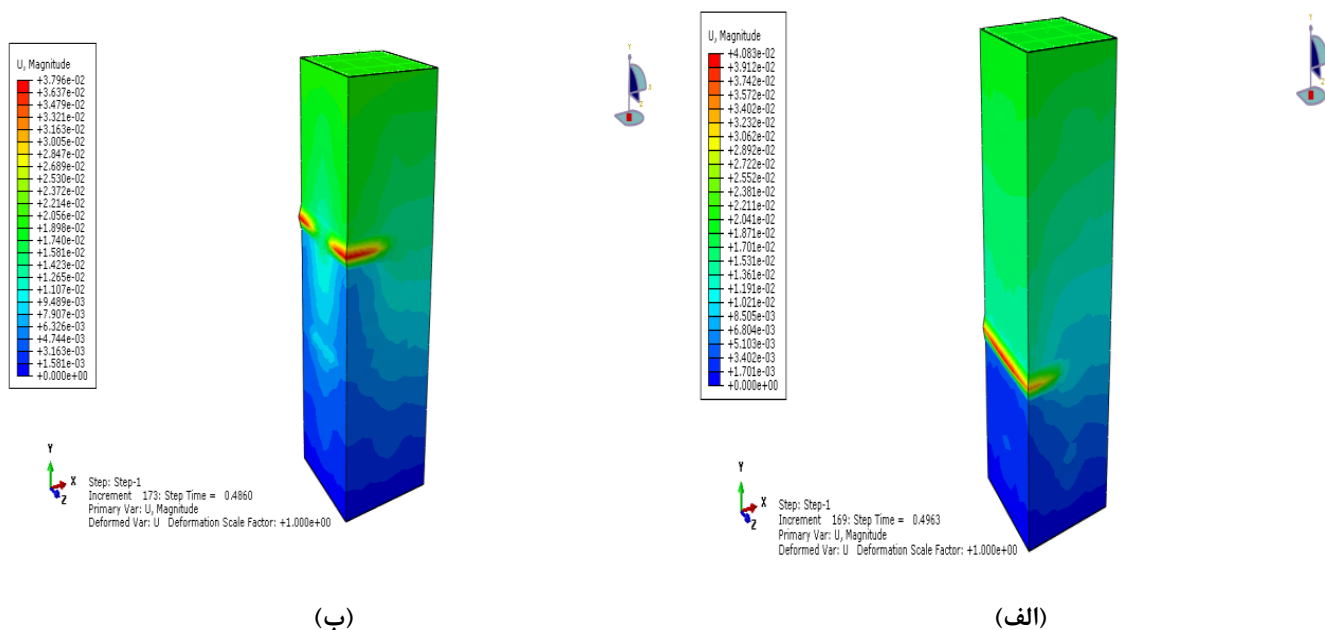


(ب)

(الف)

شکل ۱۶. تغییر شکل ستون مربع مستطیلی ۵۰۰×۵۰۰ (الف) شکل پذیری متوسط، (ب) شکل پذیری زیاد

Fig. 16. Deflection of square column with cross-section 500×500 mm: (a) medium ductility, (b) high ductility



شکل ۱۷. تغییر شکل ستون مربع مستطیلی  $1000 \times 1000$  (الف) شکل پذیری متوسط، (ب) شکل پذیری زیاد

Fig. 17. Deflection of square column with cross-section  $1000 \times 1000$  mm: (a) medium ductility, (b) high ductility

## ۶- آنالیز اقتصادی ۶-۱- روش DBA

روش DBA یک روش آماری به منظور یافتن یک گزینه بهینه در میان تمام گزینه‌های موجود در یک فرآیند است. به منظور پیاده‌سازی روش DBA، در یک مطالعه آماری  $n$  گزینه‌ای و دارای  $m$  ویژگی، یک گزینه به عنوان بهینه انتخاب می‌شود. این گزینه‌ها و ویژگی‌های مورد مطالعه، تحت عنوان ماتریس معیار به صورت زیر قابل توصیف هستند.

$$\begin{bmatrix} X_{11} & X_{12} & \dots & X_{1m} \\ X_{21} & X_{22} & \dots & X_{2m} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ X_{n1} & X_{n2} & \dots & X_{nm} \end{bmatrix} \quad (16)$$

بنابراین یک بردار در فضای  $m$  بعدی تشکیل می‌شود که تمام  $n$  گزینه قابل بررسی را معرفی می‌نماید. این نکته باید اشاره شود که در هر یک از  $m$  ویژگی یک گزینه در بدترین وضعیت قرار دارد که برای تشکیل ماتریس

روابط پیشنهادی برای تیرستون‌های شبیه‌سازی شده به ترتیب در جدول‌های ۸-۱۰ گزارش شده است. در این جداول ضریب شکل‌پذیری محوری و دورانی به ترتیب مطابق روابط (۱۴) و (۱۵) محاسبه شده است:

$$\mu_{\Delta} = \frac{\Delta_u}{\Delta_y} \quad (14)$$

$$\mu_{\theta} = \frac{\theta_u}{\theta_y} \quad (15)$$

که در روابط فوق  $\Delta_u$  و  $\theta_u$  به ترتیب تغییرمکان نهایی محوری و دورانی و  $\Delta_y$  و  $\theta_y$  به ترتیب تغییرمکان تسلیم محوری و دورانی می‌باشد.

در شکل‌های ۱۸ تا ۲۱ شکل‌پذیری‌های محوری و دورانی برای تیرستون‌های مختلف با مقاومت بتن متفاوت مطابق سه روش طراحی مقایسه شده است.

جدول ۸. مقایسه نتایج تغییرمکان محوری و دورانی برای حالت شکل‌پذیری زیاد بر اساس مقررات ملی ساختمان

Table 8. The results of axial and rotational deflection for high ductility based on IR code

ضریب شکل‌پذیری $\mu_\theta$	تغییرمکان نهایی دورانی، $\theta_u$ (Rad)	تغییرمکان تسلیم دورانی، $\theta_y$ (Rad)	ضریب شکل‌پذیری محوری، $\mu_\Delta$	تغییرمکان نهایی محوری، $\Delta_u$ (mm)	تغییرمکان تسلیم محوری، $\Delta_y$ (mm)	مقاومت بتن (MPa)	نوع ستون
۳/۶۵	۰/۰۰۷۱۷	۰/۰۰۱۹۶	۳/۷۶	۲۰/۰۲	۵/۳۲	۳۰	دایره‌ای با قطر ۷۵۰ میلی‌متر
۱/۶۶	۰/۰۰۴۴۹	۰/۰۰۲۶۷	۱/۶۹	۹/۵۲	۵/۶۵	۶۰	مربع مستطیلی به ابعاد ۵۰۰×۵۰۰ میلی‌متر
۲/۶۷	۰/۰۰۰۶۴	۰/۰۰۰۲۴	۲/۳۷	۱۳/۳۱	۵/۶۱	۳۰	مربع مستطیلی به ابعاد ۱۰۰۰×۱۰۰۰ میلی‌متر
۲/۲۷	۰/۰۰۰۵۶	۰/۰۰۰۲۵	۱/۹۲	۱۱/۸۲	۶/۱۴	۶۰	مربع مستطیلی به ابعاد ۱۰۰۰×۱۰۰۰ میلی‌متر
۲/۷۵	۰/۰۰۰۶۴	۰/۰۰۰۲۳	۳/۲۰	۱۸/۱۲	۵/۶۷	۳۰	مربع مستطیلی به ابعاد ۱۰۰۰×۱۰۰۰ میلی‌متر
۱/۸۷	۰/۰۰۰۵۵	۰/۰۰۰۲۹	۱/۷۶	۱۱/۳۱	۶/۴۴	۶۰	مربع مستطیلی به ابعاد ۱۰۰۰×۱۰۰۰ میلی‌متر

جدول ۹. مقایسه نتایج تغییرمکان محوری و دورانی برای حالت شکل‌پذیری زیاد و متوسط بر اساس ACI

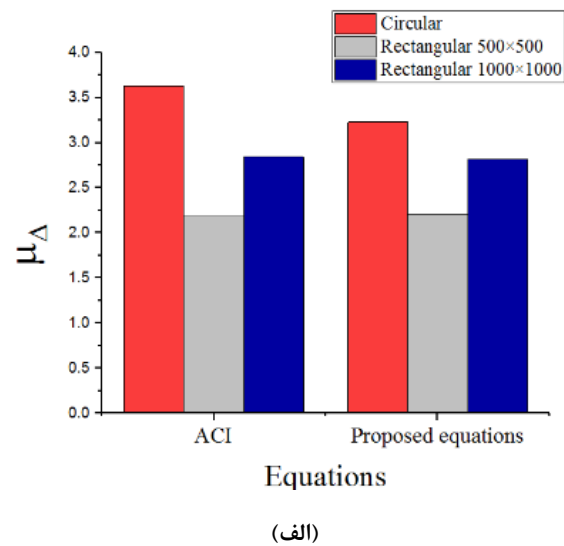
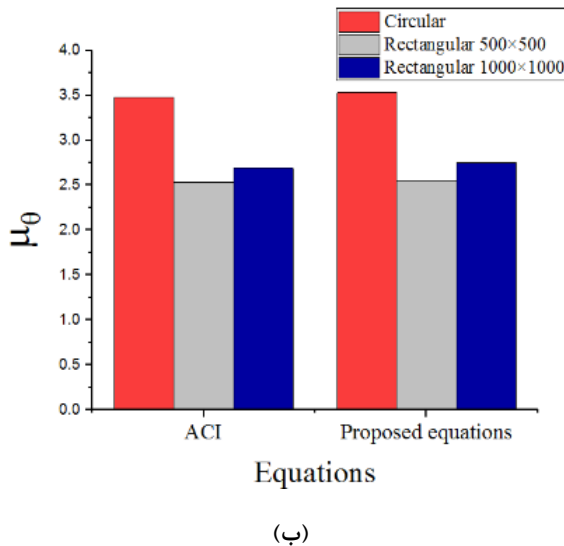
Table 9. The results of axial and rotational deflection for high and medium ductility based on ACI code

ضریب شکل‌پذیری $\mu_\theta$	تغییرمکان نهایی دورانی، $\theta_u$ (Rad)	تغییرمکان تسلیم دورانی، $\theta_y$ (Rad)	ضریب شکل‌پذیری محوری، $\mu_\Delta$	تغییرمکان نهایی محوری، $\Delta_u$ (mm)	تغییرمکان تسلیم محوری، $\Delta_y$ (mm)	مقاومت بتن (MPa)	سطح شکل‌پذیری	نوع ستون
۳/۴۸	۰/۰۰۶۸۴	۰/۰۰۱۹۶	۳/۶۳	۱۹/۳	۵/۳۲	۳۰	متوسط	دایره‌ای با قطر ۷۵۰ میلی‌متر
۱/۶۴	۰/۰۰۴۴۳	۰/۰۰۲۷	۱/۶۹	۹/۵	۵/۶۳	۶۰	زیاد	مربع مستطیلی به ابعاد ۵۰۰×۵۰۰ میلی‌متر
۳/۸۵	۰/۰۰۷۵۶	۰/۰۰۱۹۶	۳/۸۷	۲۰/۹۱	۵/۴۱	۳۰	متوسط	مربع مستطیلی به ابعاد ۱۰۰۰×۱۰۰۰ میلی‌متر
۱/۷۲	۰/۰۰۴۵۹	۰/۰۰۲۶۷	۱/۷۲	۹/۶۸	۵/۶۳	۶۰	زیاد	مربع مستطیلی به ابعاد ۱۰۰۰×۱۰۰۰ میلی‌متر
۲/۵۳	۰/۰۰۰۶۴	۰/۰۰۰۲۵	۲/۱۸	۱۲/۱۸	۵/۵۸	۳۰	متوسط	مربع مستطیلی به ابعاد ۱۰۰۰×۱۰۰۰ میلی‌متر
۲/۱۵	۰/۰۰۰۵۳	۰/۰۰۰۲۵	۱/۹۱	۱۱/۶۹	۶/۱۳	۶۰	زیاد	مربع مستطیلی به ابعاد ۱۰۰۰×۱۰۰۰ میلی‌متر
۲/۵۹	۰/۰۰۰۶۳	۰/۰۰۰۲۴	۲/۲۳	۱۲/۶۴	۵/۶۷	۳۰	متوسط	مربع مستطیلی به ابعاد ۱۰۰۰×۱۰۰۰ میلی‌متر
۲/۲۴	۰/۰۰۰۵۹	۰/۰۰۰۲۶	۱/۹۴	۱۲/۳۱	۶/۳۴	۶۰	زیاد	مربع مستطیلی به ابعاد ۱۰۰۰×۱۰۰۰ میلی‌متر
۲/۶۹	۰/۰۰۰۶۲	۰/۰۰۰۲۳	۲/۸۴	۱۵/۹۱	۵/۶	۳۰	متوسط	مربع مستطیلی به ابعاد ۱۰۰۰×۱۰۰۰ میلی‌متر
۱/۸۲	۰/۰۰۰۵۳	۰/۰۰۰۲۹	۱/۷۴	۱۱/۱۷	۶/۴۳	۶۰	زیاد	مربع مستطیلی به ابعاد ۱۰۰۰×۱۰۰۰ میلی‌متر
۲/۷۸	۰/۰۰۰۶۴۱	۰/۰۰۰۲۳	۲/۹۷	۱۶/۴۹	۵/۵۶	۳۰	متوسط	مربع مستطیلی به ابعاد ۱۰۰۰×۱۰۰۰ میلی‌متر
۱/۸۷	۰/۰۰۰۵۴۷	۰/۰۰۰۲۹	۱/۷۶	۱۱/۲۶	۶/۳۹	۶۰	زیاد	مربع مستطیلی به ابعاد ۱۰۰۰×۱۰۰۰ میلی‌متر

جدول ۱۰. مقایسه نتایج تغییرمکان محوری و دورانی برای حالت شکل‌پذیری زیاد و متوسط بر اساس رابطه پیشنهادی

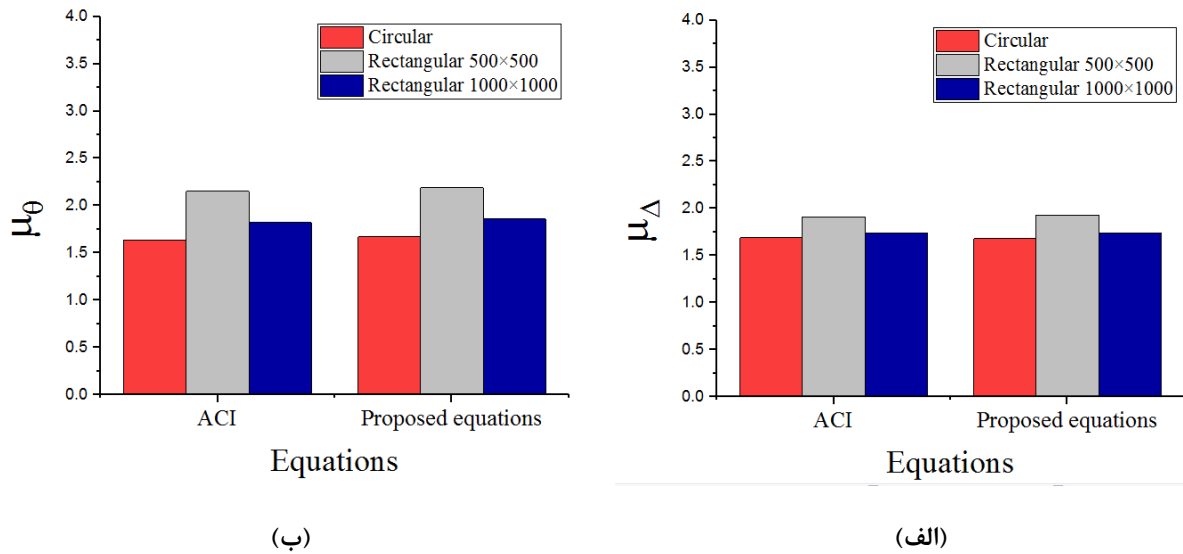
Table 10. The results of axial and rotational deflection for high and medium ductility based on proposed model

نوع ستون	سطح شکل‌پذیری	مقاومت بتن (MPa)	تغییرمکان تسلیم محوری، $\Delta_y$ (mm)	تغییرمکان نهایی محوری، $\Delta_u$ (mm)	ضریب شکل‌پذیری محوری، $\mu_\Delta$	تغییرمکان تسلیم دورانی، $\theta_u$ (Rad)	تغییرمکان نهایی دورانی، $\theta_y$ (Rad)	ضریب شکل‌پذیری دورانی، $\mu_\theta$
دایره‌ای با قطر ۷۵۰ میلی‌متر	متوسط	۳۰	۵/۲۰	۱۶/۸۰	۳/۲۳	۰/۰۰۱۹۶	۰/۰۰۶۹۲	۳/۵۳
	زیاد	۶۰	۵/۵۸	۹/۳۷	۱/۶۸	۰/۰۰۲۶۷	۰/۰۰۴۴۷	۱/۶۷
		۳۰	۵/۴۲	۲۱/۸۳	۴/۰۳	۰/۰۰۱۹۶	۰/۰۰۷۹۴	۴/۰۵
	۶۰	۵/۶۳	۹/۷۷	۱/۷۳	۰/۰۰۲۶۷	۰/۰۰۴۶۰	۱/۷۲	
مربع مستطیلی به ابعاد ۵۰۰×۵۰۰ میلی‌متر	متوسط	۳۰	۵/۷۳	۱۲/۵۹	۲/۲۰	۰/۰۰۰۲۴	۰/۰۰۰۶۲	۲/۵۵
	زیاد	۶۰	۶/۱۴	۱۱/۸۷	۱/۹۳	۰/۰۰۰۲۵	۰/۰۰۰۵۵	۲/۱۹
		۳۰	۵/۷۱	۱۳/۰۱	۲/۲۸	۰/۰۰۰۲۴	۰/۰۰۰۶۳	۲/۵۹
	۶۰	۶/۱۱	۱۲/۳۸	۲/۰۳	۰/۰۰۰۲۵	۰/۰۰۰۵۶	۲/۲۷	
مربع مستطیلی به ابعاد ۱۰۰۰×۱۰۰۰ میلی‌متر	متوسط	۳۰	۵/۵۳	۱۵/۵۸	۲/۸۲	۰/۰۰۰۲۳	۰/۰۰۰۶۴	۲/۷۵
	زیاد	۶۰	۶/۳۷	۱۱/۰۸	۱/۷۴	۰/۰۰۰۲۹	۰/۰۰۰۵۴	۱/۸۶
		۳۰	۵/۵۱	۱۵/۸۲	۲/۸۷	۰/۰۰۰۲۳	۰/۰۰۰۶۷	۲/۹۲
	۶۰	۶/۳۷	۱۱/۰۸	۱/۷۴	۰/۰۰۰۲۹	۰/۰۰۰۵۵	۱/۸۷	



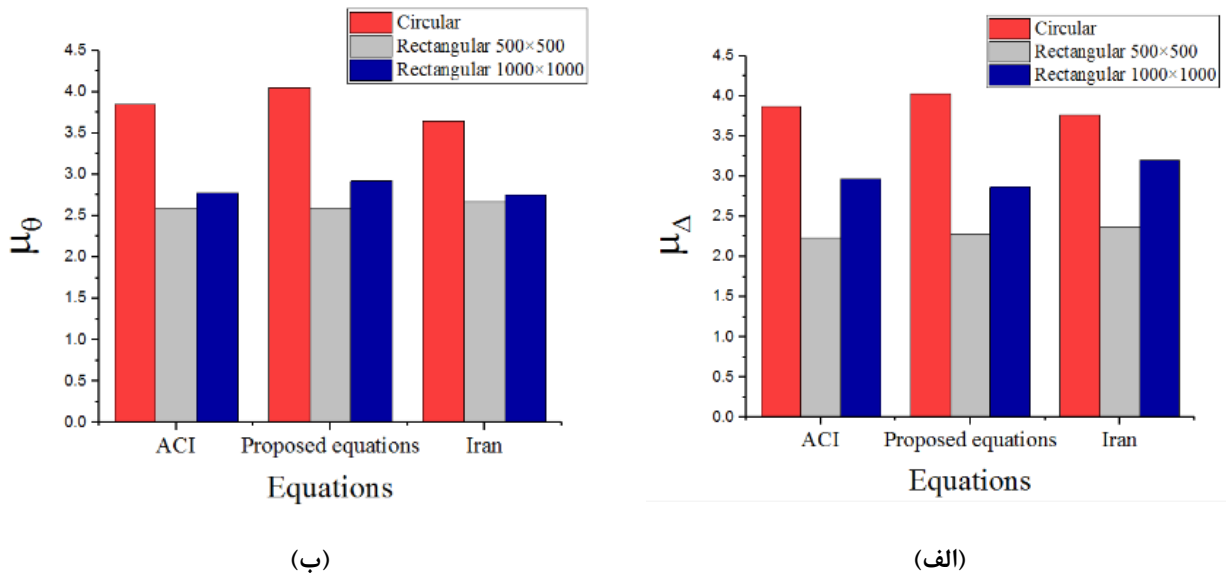
شکل ۱۸. مقایسه شکل‌پذیری ستون‌های با مقاومت ۳۰ مگاپاسکال در حالت متوسط (الف) شکل‌پذیری محوری، (ب) شکل‌پذیری دورانی

Fig. 18. Medium ductility of columns with concrete strength 30 MPa: (a) axial ductility, (b) rotational ductility



شکل ۱۹. مقایسه شکل پذیری ستون‌های با مقاومت ۶۰ مگاپاسکال در حالت متوسط (الف) شکل پذیری محوری، (ب) شکل پذیری دورانی

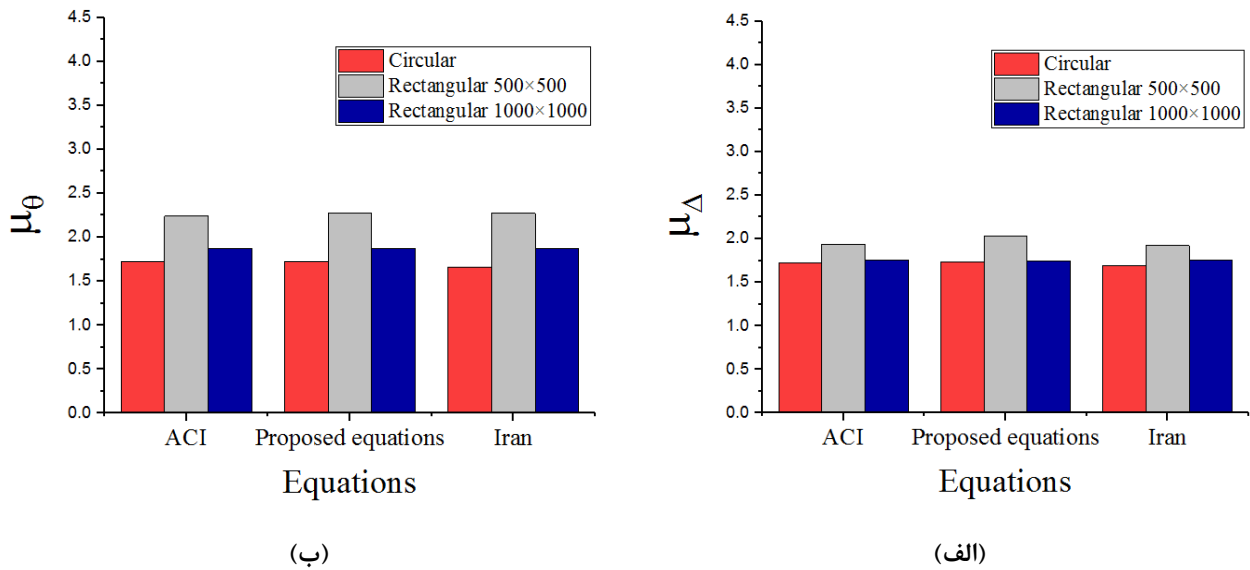
Fig. 19. Medium ductility of columns with concrete strength 60 MPa: (a) axial ductility, (b) rotational ductility



شکل ۲۰. مقایسه شکل پذیری ستون‌های با مقاومت ۳۰ مگاپاسکال در حالت زیاد (الف) شکل پذیری محوری، (ب) شکل پذیری دورانی

Fig. 20. High ductility of columns with concrete strength 30 MPa: (a) axial ductility, (b) rotational ductility





شکل ۲۱. مقایسه شکل پذیری ستون‌های با مقاومت ۶۰ مگاپاسکال در حالت زیاد (الف) شکل پذیری محوری، (ب) شکل پذیری دورانی

Fig. 21. High ductility of columns with concrete strength 60 MPa: (a) axial ductility, (b) rotational ductility

$$CD_i = \left[ \sum_{j=1}^m (Z_{opj} - Z_{ij})^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (18)$$

که در آن  $CD_i$  فاصله مرکب هر گزینه تا وضعیت بهینه با توجه به خصوصیات معرفی شده برای آن است. گزینه بهینه در میان  $n$  حالت دارای کمترین فاصله مرکب است.

در این تحقیق سه روش ACI، مقررات ملی ساختمان مبحث ۹ و روابط پیشنهادی جهت محاسبه مقدار آرمتور برشی محصورکننده در تیرستون‌های بتنی به منظور دستیابی به شکل‌پذیری‌های متوسط و زیاد مطرح شده است. از آنجا که یکی از ویژگی‌های تعیین‌کننده در انتخاب روش طراحی، هزینه مورد نیاز جهت تأمین میلگرد است، علاوه بر خصوصیات مکانیکی (شکل‌پذیری‌های محوری و دورانی)، هزینه تأمین آرمتور برشی محصورکننده برای یک تیرستون به عنوان یک ویژگی به دو ویژگی مذکور اضافه شده است. در نهایت نیز سعی شده است تا با استفاده از روش DBA یک روش طراحی به عنوان روش بهینه برای انواع تیرستون‌ها با شکل‌پذیری‌های مختلف و مقاومت بتن ۳۰ و ۶۰ مگاپاسکال معرفی شود.

معیار این ویژگی برای آن گزینه صفر در نظر گرفته شده و مقدار عددی آن ویژگی برای سایر گزینه‌ها از قدر مطلق تفاضل بدترین وضعیت از مقدار ویژگی موجود در هر گزینه به دست می‌آید. در مرحله بعد می‌بایست فاصله بین مقادیر یک ویژگی در تمام گزینه‌ها با بیشترین مقدار آن ویژگی (مقدار بهینه) به دست آید. این کار منجر به تشکیل ماتریس دیگری به صورت زیر خواهد شد:

$$\begin{bmatrix} Z_{op1} - Z_{11} & Z_{op2} - Z_{12} & \dots & Z_{opm} - Z_{1m} \\ Z_{op1} - Z_{21} & Z_{op2} - Z_{22} & \dots & Z_{opm} - Z_{2m} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ Z_{op1} - Z_{n1} & Z_{op2} - Z_{n2} & \dots & Z_{opm} - Z_{nm} \end{bmatrix} \quad (17)$$

در ماتریس فوق  $Z_{opj}$ ها بیشترین مقادیر عددی  $Z_{ij}$  در هر ویژگی می‌باشند. در نهایت فاصله مرکب ( $CD$ ) برای هر گزینه تا وضعیت بهینه از رابطه (۱۶) محاسبه می‌شود:

جدول ۱۱. مقادیر معیار برای روش‌های مختلف مسلح‌سازی

Table 11. Main values for different reinforcement method

رابطه مورد استفاده	شکل‌پذیری		هزینه تهیه آما تور برشی محصور کننده برای یک ستون (تومان)
	محوری	دورانی	
ACI	۰/۱۱	۰/۲۰	۵۰۸۶
مقررات ملی مبحث ۹	۰/۰۰	۰/۰۰	۸۶۴۷۵
رابطه پیشنهادی	۰/۲۷	۰/۴۰	.

جدول ۱۲. مقادیر استاندارد شده برای روش‌های مختلف مسلح‌سازی

Table 12. Standard values for different reinforcement method

رابطه مورد استفاده	شکل‌پذیری		هزینه تهیه آما تور برشی محصور کننده برای یک ستون (تومان)
	محوری	دورانی	
ACI	-۰/۱۸	۰/۰۰	-۰/۶۴
مقررات ملی مبحث ۹	-۱/۱۸	-۱/۲۵	۱/۴۱
رابطه پیشنهادی	۱/۲۷	۱/۲۵	-۰/۷۷

جدول ۱۳. فاصله مقادیر استاندارد شده با مقدار بهینه برای روش‌های مختلف مسلح‌سازی

Table 13. Distance of standardized values with optimized values for different reinforcement method

رابطه مورد استفاده	شکل‌پذیری		هزینه تهیه آما تور برشی محصور کننده برای یک ستون (تومان)
	محوری	دورانی	
ACI	۱/۴۵	۱/۲۵	۲/۰۵
مقررات ملی مبحث ۹	۲/۴۵	۲/۵۰	۰/۰۰
رابطه پیشنهادی	۰/۰۰	۰/۰۰	۲/۱۸

برای این منظور در ابتدا ویژگی‌های تعیین شده در این تحقیق برای تمامی روش‌ها تعیین می‌شوند. خواص مکانیکی شامل شکل‌پذیری‌های محوری و دورانی به همراه هزینه تأمین آرماتور برشی محصور کننده برای یک تیرستون به عنوان ویژگی‌های روش‌های مختلف طراحی در نظر گرفته شده‌اند. در جداول ۱۱ تا ۱۴ به ترتیب مقادیر معیار، استاندارد شده، فاصله با مقدار بهینه و نتایج روش DBA برای روش‌های مختلف طراحی در ستون‌های دایره‌ای به قطر ۷۵۰ میلی‌متر، با شکل‌پذیری زیاد و مقاومت بتن ۳۰ مگاپاسکال به

عنوان نمونه ارائه شده است.

در مورد سایر تیرستون‌ها با اشکال، سطح شکل‌پذیری و مقاومت بتن متفاوت همین روند قابل تکرار است. در جدول ۱۵ خلاصه نتایج روش DBA برای تمام تیرستون‌ها به همراه انتخاب بهینه‌ترین روش طراحی آورده شده است.

مطابق روش DBA، در شکل‌پذیری متوسط رابطه پیشنهادی بهینه‌ترین روش طراحی در تمامی تیرستون‌ها با اشکال و مقاومت بتن متفاوت محسوب

جدول ۱۴. نتایج روش DBA

Table 14. The results of DBA method

رابطه مورد استفاده	Sum	CD	بهینه‌ترین روش طراحی
ACI	۷/۸۸	۲/۸	
مقررات ملی مبحث ۹	۱۲/۲۶	۳/۵	رابطه پیشنهادی
رابطه پیشنهادی	۴/۷۵	۲/۲	

جدول ۱۵. خلاصه نتایج روش DBA برای ستون‌های مختلف

Table 12. Summarization of the DBA results for different columns

نوع ستون	سطح شکل‌پذیری	مقاومت بتن (مگاپاسکال)	مقدار فاصله مرکب (CD)		
			ACI	مقررات ملی مبحث ۹	رابطه پیشنهادی
دایره‌ای با قطر ۷۵۰ میلی‌متر	متوسط	۳۰	۲/۸	-	۲/۰
	زیاد	۶۰	۲/۸	-	۲/۰
		۳۰	۲/۸	۳/۵	۲/۲
		۶۰	۲/۱	۲/۸	۲/۲
مربع مستطیلی به ابعاد ۵۰۰×۵۰۰ میلی‌متر	متوسط	۳۰	۲/۸	-	۲/۰
	زیاد	۶۰	۲/۸	-	۲/۰
		۳۰	۴/۲	۲/۲	۰/۴
		۶۰	۳/۳	۳/۴	۰/۰
مربع مستطیلی به ابعاد ۱۰۰۰×۱۰۰۰ میلی‌متر	متوسط	۳۰	۲/۸	-	۲/۰
	زیاد	۶۰	۲/۸	-	۰/۰
		۳۰	۳/۵	۳/۰	۲/۴
		۶۰	۳/۱	۱/۸	۲/۸

می‌کند. هدف از چنین روش‌هایی رتبه‌بندی گزینه‌های پژوهش و در نهایت انتخاب گزینه بهینه است. روش ویکور از جمله روش‌های تصمیم‌گیری چند معیاره است، که هدف آن رتبه‌بندی گزینه‌های پژوهش بر اساس تعداد معیار می‌باشد. در معادلات مطرح شده برای این روش، تعداد گزینه‌های پژوهش است که به صورت  $a_1, a_2, \dots, a_j$  نمایش داده می‌شود. همچنین این گزینه‌ها براساس معیارهای مختلف که با حرف  $I$  نمایش داده می‌شود، رتبه‌بندی می‌گردند. بنابراین پارامتر  $f_{ij}$  گویای مقدار کمی از آمین گزینه در آمین معیار است [۲۲]. در روش ویکور مقادیر  $S_j$  و  $R_j$  به ترتیب براساس معادلات (۱۹)

می‌شود. در شکل‌پذیری زیاد نیز، رابطه پیشنهادی در ستون‌های دایره‌ای و مربع مستطیلی با مقاومت بتن ۳۰ مگاپاسکال بهینه‌ترین روش طراحی است. روابط ارائه شده توسط ACI و مقررات ملی ساختمان مبحث ۹ به ترتیب در ستون‌های دایره‌ای و مربع مستطیلی به ابعاد ۱۰۰۰×۱۰۰۰ میلی‌متر با شکل‌پذیری زیاد و مقاومت بتن ۶۰ مگاپاسکال بهینه هستند.

۶-۲- روش ویکور

استفاده از روش‌های تصمیم‌گیری چند معیاره در مواقعی که هدف مسأله انتخاب بهترین گزینه با توجه به تعدادی شاخص می‌باشد اهمیت پیدا

جدول ۱۶. خلاصه نتایج روش ویکور برای ستون دایره‌ای با شکل‌پذیری زیاد و مقاومت بتن ۳۰ مگاپاسکال

Table 16. Summarization of the Vikor results for circular columns with high ductility and concrete strength 30 MPa

رابطه مورد استفاده	شکل‌پذیری	
	محوری	دورانی
ACI	۱/۴۵	۱/۲۵
مقررات ملی محث ۹	۲/۴۵	۲/۵۰
رابطه پیشنهادی	۰/۰۰	۰/۰۰

در این تحقیق سه روش ACI، مقررات ملی ساختمان مبحث ۹ و روابط پیشنهادی جهت محاسبه مقدار آرماتور برشی محصورکننده در تیرستون‌های بتنی به منظور دستیابی به شکل‌پذیری‌های متوسط و زیاد مطرح شده است. از آنجا که یکی از ویژگی‌های تعیین‌کننده در انتخاب روش طراحی، هزینه مورد نیاز جهت تأمین میلگرد است، علاوه بر خصوصیات مکانیکی (شکل‌پذیری‌های محوری و دورانی)، هزینه تأمین آرماتور برشی محصورکننده برای یک تیرستون به عنوان یک ویژگی به دو ویژگی مذکور اضافه شده است. در جدول ۱۶ خلاصه‌ای از روش ویکور برای روش‌های مختلف طراحی در ستون‌های دایره‌ای به قطر ۷۵۰ میلی‌متر، با شکل‌پذیری زیاد و مقاومت بتن ۳۰ مگاپاسکال به عنوان نمونه ارائه شده است.

در مورد سایر ستون‌ها با اشکال، سطح شکل‌پذیری و مقاومت بتن متفاوت همین روند قابل تکرار است. نتایج حاصل از روش ویکور با روش DBA مطابقت خوبی دارد و رابطه پیشنهادی در اکثر ستون‌ها به عنوان بهترین روش شناخته شده است.

### ۷- نتیجه‌گیری

مقاله حاضر با هدف بررسی رابطه بهینه طراحی آرماتور برشی محصورکننده در شکل‌پذیری تیرستون‌های بتن مسلح انجام شده است. در این مقاله با استفاده از روش عددی، آرماتورهای برشی محصورکننده برای سه نوع ستون با مقطع دایره‌ای با قطر ۷۵۰ میلی‌متر و مربع مستطیلی به ابعاد ۱۰۰۰×۱۰۰۰ و ۵۰۰×۵۰۰ میلی‌متر در حالت‌های شکل‌پذیری متوسط و زیاد، مورد بررسی قرار گرفته است. همچنین به منظور بررسی اثر مقاومت بتن دو نوع مقاومت ۳۰ و ۶۰ مگاپاسکال در نظر گرفته شده است. مقادیر آرماتور طراحی از طریق روابط پیشنهادی با روابط مقررات ملی ساختمان

و (۲۰) محاسبه می‌گردند:

$$S_j = \sum_{i=1}^n \left[ w_i \frac{f_i^* - f_{ij}}{f_i^* - f_i^-} \right] \quad (19)$$

$$R_j = \max_i \left[ w_i \frac{f_i^* - f_{ij}}{f_i^* - f_i^-} \right] \quad (20)$$

که در آن  $W_i$  وزن معیار  $\lambda_m$  و  $S_j$  و  $R_j$  تعیین‌کننده رتبه‌بندی گزینه‌ها می‌باشند.

الگوریتم روش ویکور به صورت مراحل زیر توصیف می‌شود:

- تعیین بهترین ( $f_i^*$ ) و بدترین ( $f_i^-$ ) مقادیر برای تمامی  $n$  معیار.
- محاسبه مقادیر  $S_j$  و  $R_j$  براساس معادلات (۱۹) و (۲۰).
- محاسبه شاخص ویکور ( $Q_j$ ) براساس معادله (۲۱).

$$Q_j = v \left( \frac{S_j - S^*}{S^- - S^*} \right) + (1-v) \left( \frac{R_j - R^*}{R^- - R^*} \right) \quad (21)$$

$$S^* = \min_j S_j; S^- = \max_j S_j$$

$$R^* = \min_j R_j; R^- = \max_j R_j$$

که در آن  $v$  معمولاً برابر ۰/۵ فرض می‌شود.

- رتبه‌بندی گزینه‌ها براساس مقادیر  $S$ ،  $R$  و  $Q$  به صورت افزایشی.
- معرفی بهترین گزینه که دارای کمترین شاخص ویکور ( $Q$ ) باشد.

ملی ساختمان مبحث نهم.

$f_{yt}$  مقاومت مشخصه آرماتور عرضی در روابط ACI 318.

$k_n$  ضریب محصورشدگی.

$k_p$  ضریب بار محوری که برابر است با نسبت فشار محوری وارده به

فشار محوری مرکزگرا.

$n_1$  تعداد آرماتورهای واقع در محیط هسته بتن با دورگیرهای مستقیم

که در راستای عرضی به قلاب‌های لرزه‌ای و یا گوشه دورگیرها متصل هستند.

$P$  فشار محوری وارده به مقطع.

$P_0$  فشار محوری بدون خروج از مرکزیت.

$S$  فاصله بین سفره‌های میلگردهای عرضی در امتداد محور طولی

عضو.

$\rho_s$  نسبت حجم میلگرد دورپیچ به حجم بتن محصور شده که از

پشت تا پشت میلگرد دورپیچ اندازه‌گیری می‌شود.

## منابع

- [1] ACI Committee 318; Buildings Code Requirements for Structural Concrete (ACI318-99) and Commentary (318R-99), American concrete Institute, Farmington Hills and Mich., (1999) 391-392.
- [2] Section 9 National Building Regulations: Design and Construction of Reinforced concrete buildings, national building regulations, (2013).
- [3] Code 360: Seismic improvement instructions for existing buildings, First revision, (2013).
- [4] P. Paultre, L. Legeron, D. Mongeau, Influence of concrete strength and transverse reinforcement yield strength on behaviour of high-strength concrete columns, ACI Structural Journal, 98(4) (2001), 490-501.
- [5] P. Paultre, L. Legeron, Confinement reinforcement design for reinforced concrete column, Journal of Structural Engineering, 134(5) (2008).
- [6] R. Eid, P. Paultre., Analytical model for FRP-confined circular reinforced concrete columns, Journal of Composites for Construction, 12(5) (2008).
- [7] S. Parent, P. Labossière, Finite element analysis of reinforced concrete columns confined with composite

ایران و نیز انجمن بتن آمریکا مورد ارزیابی قرار گرفت. همچنین شبیه‌سازی عددی با استفاده از نرم‌افزار آباکوس برای حالت شکل‌پذیری متوسط و زیاد با استفاده از روابط مذکور انجام گرفته است. در نهایت با توجه به شکل‌پذیری‌های محوری و دورانی بر مبنای روش DBA و Vikor آنالیز اقتصادی صورت گرفته است که نتایج آن به شرح زیر است:

۱- با توجه به این که اعداد روابط پیشنهادی در مقاله کمتر از ۱۰ درصد با روابط آیین‌نامه‌ای اختلاف داشته و در برخی موارد حتی این اختلاف به کمتر از ۱ درصد هم رسیده است، نشان‌دهنده این است که روابط درست کار می‌کنند و بهینه هستند.

۲- در شکل‌پذیری متوسط روابط پیشنهادی بهینه‌ترین روش طراحی در تمامی تیرستون‌ها تعیین گردید.

۳- در شکل‌پذیری زیاد، روابط پیشنهادی در ستون‌های دایره‌ای و مربع مستطیلی با مقاومت بتن ۳۰ مگاپاسکال بهینه‌ترین روش طراحی است. همچنین روابط مربوط به انجمن بتن آمریکا و مقررات ملی ساختمان به ترتیب در ستون‌های دایره‌ای و مربع مستطیلی به ابعاد  $1000 \times 1000$  میلی‌متر با شکل‌پذیری زیاد و مقاومت بتن ۶۰ مگاپاسکال بهینه هستند.

۴- با افزایش مقاومت بتن از ۳۰ به ۶۰ مگاپاسکال مقادیر شکل‌پذیری دورانی و محوری کاهش می‌یابد که علت این امر ترد شدن بیشتر تیرستون‌های بتن مسلح است.

۵- از بررسی شکل مقاطع مشخص می‌گردد که در بتن‌های با مقاومت ۳۰ و ۶۰ مگاپاسکال به ترتیب ستون‌های دایره‌ای و ستون‌های مربع مستطیلی به ابعاد  $500 \times 500$  میلی‌متر دارای بیشترین شکل‌پذیری هستند.

## ۸- فهرست علائم

$A_c = A_{ch}$  مساحت قسمتی از مقطع که داخل میلگرد دورپیچ واقع شده است.

$A_g$  سطح مقطع کل مقطع.

$A_{sh} = A_{shy}$  مجموع مساحت آرماتورهای عرضی.

$A_{st}$  سطح مقطع کل آرماتورهای طولی.

$C_y$  بعد مقطع در جهت  $y$ .

$f_{cd}$  مقاومت محاسباتی بتن که برابر است با  $\phi_c f'_c$ .

$f'_c$  مقاومت فشاری مشخصه بتن.

$f_y$  مقاومت مشخصه آرماتورهای طولی.

$f_{yh}$  مقاومت مشخصه آرماتور عرضی در روابط پیشنهادی و مقررات

- Special Buildings, 27(12) (2018).
- [16] W. Li, L. Sun, J. Zhao, P. Lu, F. Yang, Development of a confined model for rectangular ordinary reinforced concrete columns, *Materials and Structures*, 40 (2007) 605–613.
- [17] H. Moghaddam, K. Pilakoutas, M. Samadi, S. Mohebbi, Behaviour and modelling of concrete columns confined by external post-tensioned strips, *ASCE Structures Congress*, (2008).
- [18] M.Z. Kabir, E. Shafei, Plasticity modelling of FRP-confined circular reinforced concrete columns subjected to eccentric axial loading, *Journal of Composites: Part B*, 43 (2012) 3497–3506.
- [19] E. Dehghani, M.H.T. Parsa, Investigation of analytical relations on the effect of confinement in the design of reinforced concrete columns, *Journal of Concrete Structure and Materials*, 4(1) (2019) 110-125.
- [20] T. Rabczuk, J. Eibl, Numerical analysis of prestressed concrete beams using a coupled element free Galerkin/finite element approach, *International Journal of Solids and Structures*, 41 (2004) 1061-1080.
- [21] ABAQUS Inc., 2004. ABAQUS 6.5 Analysis User's Manual. SIMULIA.
- [22] M. Pouraminian, S. Pourbakhshian, Multi-criteria shape optimization of open-spandrel concrete arch bridges: Pareto front development and decision-making, *World Journal of Engineering*, 5(3) (2019) 670–680.
- materials, *Can. J. Civ. Eng.*, 27 (2000) 400-411.
- [8] B.S. Han, S.W. Shin, B.Y. Bahn, A model of confined concrete in high-strength reinforced concrete tied columns, *Magazine of Concrete Research*, 55(3) (2003) 203–214.
- [9] B. Binici, An analytical model for stress–strain behaviour of confined concrete, *Engineering Structures*, 27(7) (2005) 1040–1051.
- [10] B. Bousalem, N. Chikh, Development of a confined model for rectangular ordinary reinforced concrete column, *Materials and Structures*, 40 (2007) 605–613.
- [11] B. Doran, H.O. Koksall, T. Turgay, Nonlinear finite element modelling of rectangular/square concrete columns confined with FRP, *Materials and Design*, 30 (2009) 3066–3075.
- [12] T. Yu, J.G. Teng, Y.L. Wong, S.L. Dong, Finite element modelling of confined concrete-II: Plastic-damage model, *Engineering Structures*, 32 (2010) 680-691.
- [13] A. Demir, H. Ozturk, G. Dok, 3D numerical modelling of RC deep beam behaviour by nonlinear finite element analysis, *Disaster Science and Engineering*, 2(1) (2016) 13-18.
- [14] D. Najdanović, B. Milosavljević, Strength and ductility of concrete confined circular columns, *Građevinar*, 5 (2014) 417-423.
- [15] J.Z. Wang, L. Cheng, M.L. Sun, J.Q. Jia, Seismic performance of reinforced concrete columns confined with two layers of stirrups, *The Structural Design of Tall*

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

M.R. Adl Parvar, E. Dehghani, M.H. Taghavi Parsa, Investigation of the Optimal Design Equation for Stirrups Used in Ductile Reinforced Concrete Columns, *Amirkabir J. Civil Eng.*, 53(11) (2022) 4613-4638.

DOI: 10.22060/ceej.2020.18396.6868

