

# Investigating the Effect of infill Walls in Creating Short Columns in Concrete Frames (a case study)

**Mohammad Reza Tabeshpour**

Assistant Professor in the Department of Mechanical Engineering, Sharif University of Technology, Tehran, Iran

**Soudabeh Taheri**

Graduate of Civil Engineering, Zand High Education Institute, Shiraz, Iran  
tabeshpour@sharif.edu

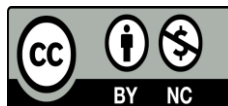
DOI 10.30495/CIVIL.2023.702324

## Keywords:

Nonlinear static analysis,  
short column,  
infill wall

## Abstract

Owing to the common use of infill walls in conventional buildings, it is a practical and important topic to investigate the effect of infill walls on the behavior of structures during earthquakes. One of the disadvantages of infilled frames is the presence of large window openings in some of the reinforced concrete frame buildings, which results in the short column phenomenon. The part of the column that is adjacent to the wall is almost integrated with the wall and leads to a reduction in the height of the column. Therefore, the lateral stiffness increases considerably. With increasing stiffness, the lateral force applied to the column also increases. In this study, a 4-story, 3-span reinforced concrete model with a different arrangement of infill walls in the stories and considering short walls on the ground floor, the short column phenomenon has been investigated in ETABS software. Also, the seismic capacity of the structure has been calculated by valid methods based on the capacity spectrum method proposed by ATC40. The results indicate that with increasing stiffness, the maximum shear force applied to the column due to the presence of the infill wall under the designed earthquake load will increase by about 50% compared to the frame without the infill wall. Furthermore, the amount of stiffness difference in the frame with and without infill wall in the analyzed models is about 70%, which can prevent irreparable damage by predicting this event and proper design.



This work is licensed under a [Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)

(این نشریه تحت قانون بین المللی کپی رایت Creative Commons: BY-NC می باشد).

# بررسی اثر دیوارهای پرکننده در ایجاد ستون کوتاه در قاب‌های بتنی (مطالعه‌ی موردی)

محمد رضا تابش پور

عضو هیأت علمی، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شریف، تهران، ایران

سودابه طاهری

دانش‌آموخته‌ی کارشناسی ارشد مهندسی عمران، مؤسسه آموزش عالی زند، شیراز، ایران

tabeshpour@sharif.edu

تاریخ پذیرش: ۰۸ دی ۱۴۰۱

تاریخ دریافت: ۱۱ شهریور ۱۴۰۱

## چکیده

به علت استفاده زیاد از دیوارهای پرکننده در ساختمان‌های متعارف، بررسی اثر دیوار پرکننده بر رفتار سازه در هنگام زلزله موضوعی کاربردی و مهم است. یکی از حالت‌های نامناسب در رابطه با قاب‌های میان‌پر، وجود بازشوهای سراسری در برخی سازه‌های بتنی است که منجر به وجود آمدن ستون کوتاه می‌شود. قسمتی از ستون که مجاور دیوار است، تقریباً به طور یک‌پارچه با دیوار عمل کرده و منجر به کاهش ارتفاع ستون می‌شود، در نتیجه سختی ستون بسیار افزایش می‌یابد. به تناسب این افزایش سختی، ستون متحمل نیروهای شدیدتری می‌شود. در این مقاله با مدل‌سازی و تحلیل پوش‌آور، یک مدل ۴ طبقه ۳ دهانه بتن مسلح با آرایش متفاوت دیوارهای پرکننده در طبقات و در نظر گرفتن دیوارهای کوتاه در طبقه هم‌کف پدیده‌ی ستون کوتاه در نرم‌افزار ایتبس مورد بررسی و تجزیه تحلیل قرار گرفته شده است. و هم‌چنین ظرفیت لرزه‌ای سازه با روش‌های معتبر بر اساس روش طیف ظرفیت پیشنهاد شده توسط ATC40، محاسبه شده است. نتایج نشان می‌دهد با افزایش سختی، نیروی برشی بیشینه وارده به ستون به دلیل حضور دیوار پرکننده تحت بار زلزله طرح، حدود ۵۰ درصد نسبت به قاب بدون دیوار پرکننده افزایش خواهد داشت، هم‌چنین مقدار اختلاف سختی در قاب با و بدون دیوار پرکننده در مدل مورد بررسی حدود ۷۰ درصد می‌باشد که با پیش‌بینی این رخداد و طراحی مناسب می‌توان از آسیب‌های غیرقابل جبران جلوگیری کرد.

کلید واژگان: تحلیل استاتیکی غیرخطی، ستون کوتاه، دیوار پرکننده

## ۱- مقدمه

جدا کردن آن‌ها از قاب مجاور ارائه داده‌اند [۲، ۳]. به منظور کاهش خطرات احتمالی ناشی از شکست ترد ستون‌ها در زلزله‌های آتی، قبل از مقاوم سازی، ظرفیت لرزه‌ای سازه باید با روش‌های معتبر بر اساس روش طیف ظرفیت پیشنهاد شده توسط ATC40 [۴]، محاسبه شود. تحلیل استاتیکی غیرخطی برای به دست آوردن روابط برش - جابه‌جایی ساختمان‌ها استفاده می‌شود که منحنی ظرفیت نام دارد. دقت این تحلیل وابسته به خواص درست تعریف شده مفاصل پلاستیک در المان‌های سازه است. مسئله ستون کوتاه به دو صورت مطرح است: اول، هنگامی که تعدادی از ستون‌ها در یک قاب خمشی از بقیه ستون‌ها کوتاه‌ترند، و دوم، جایی که ستون‌ها بسیار کوتاه‌اند و خاصیت ذاتی ترد بودن را دارند. ستون‌های کوتاه دسته دوم غالباً دارای طول معمولی هستند که وجود دیوارهای پرکننده قسمتی یا تیرهای محیطی عمیق مانع از انعطاف‌پذیری آن‌ها و تحمل جابه‌جایی نسبی وارده در کل ارتفاعشان می‌شود [۵]. در جدول (۱) تخریب ستون‌ها به‌علت پدیده‌ی ستون کوتاه در طی زمین‌لرزه‌های گذشته در سراسر دنیا را نشان می‌دهد، که نشان دهنده اهمیت بررسی این موضوع می‌باشد.

برای جدا کردن فضای ساختمان و بیرون آن معمولاً از دیوارهایی با مصالح بنایی استفاده می‌شود که در داخل قاب قرار می‌گیرند. با دقت در آسیب‌های ایجاد شده در طی زلزله‌های اخیر می‌توان دریافت که اغلب سازه‌ها با مصالح بنایی خسارت قابل ملاحظه‌ای دیده‌اند. این زلزله‌ها به ما می‌گویند که ظرفیت سازه‌های موجود هنگام رخداد زلزله کافی نمی‌باشد. با وجود تأثیر ستون کوتاه ضعف بسیار شدید ظرفیت لرزه‌ای سازه مشاهده می‌شود. مطابق بند ۷-۵-۱ آیین‌نامه طراحی ساختمان‌ها در برابر زلزله (استاندارد ۲۸۰۰) [۱] باید از ایجاد ستون‌های کوتاه به خصوص در نورگیرهای زیرزمین‌ها حتی‌الامکان خودداری شود. به دلیل شرایط خاص معماری متأسفانه آیین‌نامه‌های ایران هیچ توجهی به اهمیت مسأله و غیرقابل تعمیر بودن آسیب‌های وارده ناشی از این پدیده و چگونگی در نظر گرفتن اثر ستون‌های کوتاه نکرده‌اند، حال آن‌که آیین‌نامه‌های معتبری همچون نیوزیلند، استرالیا و ... وجود دارند که بر روی این مسأله تمرکز نموده‌اند و راهکارهای خوبی ارائه داده‌اند. و محققان زیادی با بررسی این موضوع راهکارهایی از قبیل در نظر گرفتن اثر پرکننده‌ها در طراحی و یا

جدول ۱- شکست ستون کوتاه طی چندین زلزله در سراسر دنیا

	<p>آسیب ستون به علت اثر ستون در زمین‌لرزه آرمینیا، کلمبیا در سال ۱۹۹۹ (عکس توسط عمر دری و کاردونا، <a href="http://www.researchgate.net">www.researchgate.net</a>).</p>
	<p>شکست برشی ستون در دبیرستان راه آهن در میاگی کن اوکی، ژاپن، در زمین‌لرزه ۱۲ ژون، ۱۹۷۸ (عکس از شونسوکه اوتانی، دانشگاه توکیو).</p>
	<p>خسارت به ساختمان قدیمی و بتن مسلح در زلزله نورتریج، ۱۹۹۴. (عکس توسط پیتر دبلیو کلارک و رجنتس از دانشگاه کالیفرنیا، <a href="http://www.structuremag.org">www.structuremag.org</a>)</p>

تخریب ستون به علت ایجاد پدیده‌ی ستون کوتاه، زلزله مورموری ایلام، ۱۳۹۳. (عکس توسط مهرداد خواجه‌پور، mkhajepour.blogfa.com).



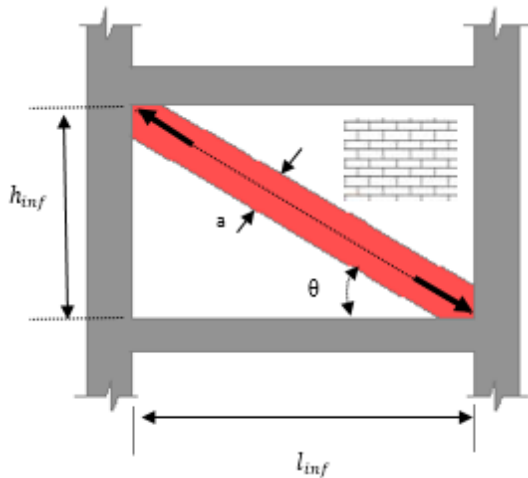
ستون‌های بتنی در اثر بارهای لرزه‌ای پرداختند و به منظور جلوگیری از ایجاد آن راهکارهایی ارائه دادند [۱۴، ۱۵]. بن و کیانگ در پژوهشی به بررسی یک قاب بتنی با چیدمان مختلف دیوار پرکننده و با تجزیه و تحلیل غیرخطی به خوبی نشان دادند که به علت اثر دیوار پرکننده بر قاب سازه‌ای قانون تیر ضعیف- ستون قوی همیشه جواب‌گو در طراحی نمی‌باشد [۱۶]. نوری‌فرد و تابش‌پور در پژوهشی به پدیده‌ی طبقه‌ی نرم و روش‌های محاسبه سختی در ادبیات پرداخته و سپس شش روش دقیق (نرم‌افزاری) برای محاسبه سختی طبقات از طریق تحلیل قاب‌های بتنی دو بعدی پیشنهاد نمودند [۱۷]. همچنین پرادپ در مقاله‌ای به بررسی المان محدود پدیده‌ی ستون کوتاه تحت سیکل بارگذاری جانبی در قاب‌های بتنی پرداختند. نتایج نشان می‌دهد که هنگامی که نسبت ابعاد پرکننده افزایش می‌یابد، مقاومت و سختی نیز افزایش می‌یابد و در عین حال تغییرمکان و شکل‌پذیری سازه کاهش می‌یابد. و همچنین با بررسی نتایج الگوی ترک‌های ایجاد شده در قاب میان‌پر نحوه تشکیل ستون کوتاه در سازه را که منجر به فروپاشی سازه می‌شود را به وضوح نشان دادند [۱۸]. زوو و همکاران در یک مطالعه تجربی اثر موقعیت دیوار پرکننده در مودهای شکست قاب‌های بتن مسلح را بررسی کردند بر اساس نتایج تجزیه و تحلیل، نسبت ظرفیت برشی بحرانی ستون به دیوار پرکننده در یک قاب را مقدار ۲ پیشنهاد کردند و نشان دادند که اگر نسبت ظرفیت برشی کمتر از ۲ و نسبت برش قسمتی از ستون که دیوار وجود ندارد (قسمت آزاد ستون) از ۲ بیشتر نباشد، اثر ستون کوتاه رخ می‌دهد. و در صورتی که بین قاب و پرکننده با مصالح انعطاف‌پذیر پر شود، باعث کاهش یا جلوگیری از اثر ستون کوتاه می‌شود. نتیجه این تحقیق می‌تواند به عنوان راهنمایی برای طراحی و ساخت سازه‌های بتنی میان‌پر مورد استفاده قرار گیرد. باشا و کوشیک در تحقیقی به بررسی رفتار برشی ستون‌ها در قاب‌های میان‌پر تحت بارهای جانبی پرداختند، و روش‌هایی را به منظور کاهش آسیب‌پذیری لرزه‌ای ساختمان‌های بتن مسلح میان‌پر پیشنهاد دادند [۱۹]. واراروکساجا و همکاران یک روش طراحی پیشنهادی را برای جلوگیری از شکست

تابش‌پور و همکاران در مقاله‌ای به بررسی اندرکنش بین قاب بتنی و دیوار پرکننده اجرای برای بررسی اثر منفی دیوار پرکننده پرداختند. در این تحقیق به کمک نرم‌افزار سپ و اپن‌سیس قاب با و بدون دیوار پرکننده مقایسه شد. نتایج بیان‌گر این است که خاموت برشی موجود در ستون‌های بتنی متصل با دیوار پرکننده اجرای جواب‌گوی برش ایجاد شده در بالا و پایین ستون نمی‌باشد و باعث شکست برشی و تشکیل مفصل برشی در این نواحی از ستون می‌شود. این پژوهش می‌تواند به عنوان راهکاری در اختیار مهندسين سازه قرار گیرد تا با در نظر گرفتن اثرات منفی دیوار و مدل‌سازی دقیق این المان از گسیختگی سازه پیشگیری کنند [۳، ۶-۸]. همچنین کریمی در پژوهشی به بررسی نحوه محاسبه دیوار پرکننده در طراحی و بررسی الزامات تعیین ضریب رفتار سازه‌های بتنی با دیوار پرکننده پرداخته است [۹]. موسوی در تحقیقی به بررسی ستون کوتاه در طراحی و بهسازی لرزه‌ای پرداخت و راهکارهایی را برای مقاوم‌سازی سازه بتنی بر اثر پرکننده‌ها ارائه داد [۱۰]. موریتی و تاسیوس در مطالعه تجربی یک مدل خرابی برای شبیه‌سازی رفتار ستون‌های کوتاه در هنگام خرابی، برای محاسبه کرنش مصالح در هر مرحله معمولی یا بحرانی ارائه کردند. مدل خرابی پیشنهادی قادر می‌سازد که بار خرابی ستون‌های کوتاه را پیش‌بینی کرده و تخمین زد که کدام عنصر ابتدا خراب می‌شود، بنابراین می‌توان در صورت بروز یک شکست ترد در اعضاء آن‌ها را اصلاح و قوی‌تر کرد [۱۱]. وحیدی و ملک‌آبادی به بررسی مفهومی اثر ستون‌های کوتاه و قاب‌های پر شده با مصالح بنایی تحت اثر زمین‌لرزه پرداختند و با در نظر گرفتن دیوارهای پرکننده به عنوان عضو سازه‌ای، اثرات نامطلوب آن‌ها را در سازه‌ها که منجر به شکست‌های سازه‌ای اضافی و فروپاشی و آسیب جدی به سازه می‌شود، را به خوبی نشان دادند [۱۲]. همچنین وانگ و همکاران در پژوهشی به بررسی رفتار تجربی و محاسبه ظرفیت برشی ستون‌های بتن مسلح با شکست شدید عمودی پرداختند و یک روش پیشنهادی برای بهبود رفتار ترد ستون‌های کوتاه پیشنهاد دادند [۱۳]. همچنین دوغان و ارسلان و محراب‌پور به بررسی عوامل خرابی



خرابی ستون‌های بتنی در اثر شکست برشی به دلیل وجود دیوار پرکننده در سازه مورد استفاده قرار گیرد [۲۰].

فشاری با عرض موثر معادل، برای شبیه‌سازی رفتار پرکننده مصالح بنایی غیرمسلح استفاده شده است. مدول یانگ و ضخامت دستک فشاری معادل باید با ضخامت دیوار پرکننده برابر باشد. و همچنین با توجه به ماهیت رفتار مصالح بنایی، تاکنون روابط مختلفی توسط محققان برای مدول الاستیسیته دیوار پرکننده ارائه شده است که هر کدام مقادیر پراکنده‌ای را به دست می‌دهد که در این پژوهش رابطه مورد استفاده از رابطه پیشنهادی دستورالعمل بهسازی ساختمان‌های موجود است (رابطه ۱) [۲۱].



شکل ۲- معادل‌سازی دیوار پرکننده با دو دستک فشاری قطری

پهنای مؤثر مهاربند معادل دیوار پرکننده که توسط محققین مختلف پیشنهاد شده، شدیداً دارای پراکندگی است و بین ۱۱٪ تا ۳۵٪ در تغییر است [۵]. دستک معادل فشاری دارای ضخامتی برابر ضخامت دیوار پرکننده  $t_{inf}$  و طول قطری برابر  $F_{inf}$  بوده و پهنای مؤثر آن برابر است با [۲۱]:

$$E_{me} = 500F_m \quad (1)$$

$$a = 0.175(\lambda h_{col})^{-0.4} r_{inf} \quad (2)$$

$$\lambda = 4 \sqrt{\frac{E_{me} t_{inf} \sin(2\theta)}{4E_{fe} I_c h_{inf}}}$$

ترد برشی ستون‌های بتن مسلح به دلیل اندرکنش قاب میان‌پر ارزیابی کردند که این روش باعث تغییر بنیادی در طراحی متعارف سازه نمی‌شود. ولی می‌توان به عنوان یک معیار تکمیلی برای جلوگیری از

## ۲- روش انجام تحقیق

در این پژوهش گام‌های زیر پیموده خواهد شد:

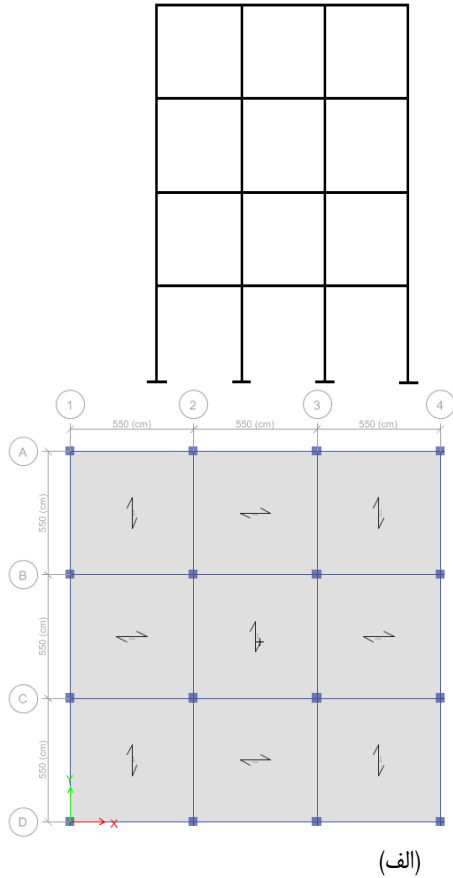
۱. مطالعه و بررسی ضوابط و ملاحظات آیین‌نامه‌های لرزه‌ای در خصوص ستون کوتاه
۲. انتخاب طرح‌های مناسب ساختمان‌های متعارف مسکونی بتن مسلح با جای‌گذاری مختلف دیوار پرکننده در آن و مدل‌سازی آن‌ها با و بدون در نظر گرفتن دیوارهای پرکننده
۳. بررسی اثر دیوار پرکننده در سازه بر ایجاد ستون کوتاه : یک قاب دو بعدی با و بدون در نظر گرفتن اثر دیوار پرکننده و ایجاد ستون کوتاه در آن مدل‌سازی و عوامل مؤثرتر بر شکل‌گیری ستون کوتاه (مقاومت دیوار، ارتفاع دیوار و قاب‌های مجاور) و آثار آن بر سازه در مقیاس ماکرو مورد بررسی قرار خواهد گرفت.
۴. انجام تحلیل‌های استاتیکی غیرخطی بر روی سازه‌های انتخاب شده با استفاده از نرم‌افزار ایتسی
۵. تعیین نتایج حاصل از تجزیه و تحلیل‌های انجام شده و نتایج به دست آمده از تحلیل‌های غیرخطی انجام شده بر روی قاب‌های مورد مطالعه با نتایج حاصل از تحلیل‌های خطی صورت گرفته از تحقیقات انجام شده در این زمینه مقایسه و بررسی خواهد شد.

## ۳- مطالعه‌ی موردی

### ۳-۱- فرضیات مدل‌سازی دیوار پرکننده در سازه

محققان از همان اوایل تحقیقات خود بر روی نحوه‌ی مدل‌سازی دیوار پرکننده یک روش ساده را برای این کار پیشنهاد دادند که یک میله‌ی قطری با خواص مکانیکی مناسب می‌تواند جای‌گزین خوبی برای دیوار باشد، که بسته به هدف تحقیق می‌تواند به سه روش مدل‌سازی شود (مدل گوشه به گوشه یا یک دستک، مدل گوشه به گوشه با دو یا سه دستک، مدل تیر به تیر و مدل ستون به ستون) که در شکل ۲ معادل‌سازی دیوار پرکننده با دو دستک فشاری معادل را نشان می‌دهد. به همین دلیل در این مقاله دیوار پرکننده با دستک معادل فشاری جای‌گزین شده است. این دستک به صورت قطری و گره به گره مدل‌سازی شده است. که خصوصیات دستک معادل بر اساس توصیه‌های تابش‌پور [۵] محاسبه شده، که طول آن برابر قطر قاب و پهنای مؤثر آن را  $0.7$  برابر قطر قاب در نظر گرفته شده است. ضخامت دستک نیز همان ضخامت دیوار پرکننده است. در دستورالعمل بهسازی لرزه‌ای ساختمان‌های موجود [۲۱] از مدل دستک

است. بار مرده بر واحد سطح بام ۴۱۳ کیلوگرم بر مترمربع و در طبقات ۶۰۰ کیلوگرم بر مترمربع و بار زنده بام ۱۵۰ کیلوگرم بر مترمربع و طبقات ۲۰۰ کیلوگرم بر مترمربع در نظر گرفته شد. بار مرده دیوار ۱۷ سانتی متری ۱۷۰ کیلوگرم بر مترمربع دیوار در نظر گرفته شد.



شکل ۳- پلان و نمای قاب مورد بررسی

جزئیات مقاطع طراحی شده در جدول (۱) خلاصه شده است:

جدول ۱: جزئیات مقاطع طراحی شده

طبقه	ابعاد ستون (cm)	ابعاد تیر (mm)	آرماتور فوقانی (mm)	آرماتور تحتانی (mm)
۱	۴۵ × ۴۵	۱۲ # ۲۰	۳۵ × ۴۵	۳ # ۱۶
۲	۴۵ × ۴۵	۱۲ # ۲۰	۴۵ × ۳۵	۳ # ۱۶
۳	۴۰ × ۴۰	۱۲ # ۲۰	۴۰ × ۴۰	۳ # ۱۴
۴	۴۰ × ۴۰	۱۲ # ۲۰	۴۰ × ۴۰	۳ # ۱۴

$$\theta = \tan^{-1} \left( \tan \frac{h}{l} \right) \quad (۴)$$

که در این رابطه،  $h_{inf}$  ارتفاع پانل دیوار پرکننده (mm)،  $E_{fe}$  مدول ارتجاعی مورد انتظار برای مصالح قاب (MPa)،  $E_{me}$  مدول مورد انتظار مصالح دیوار پرکننده (MPa)،  $F_m$  مقاومت فشاری مورد انتظار (MPa)،  $I_c$  ممان اینرسی ستون ( $m^2$ )،  $l$  طول پانل پرکننده (mm)،  $r_{inf}$  طول قطری پانل دیوار پرکننده (mm)،  $t_{inf}$  ضخامت پانل دیواری پرکننده و میلیه معادل  $\theta$  زاویه‌ای که تانژانت آن برابر ارتفاع پانل به طول آن است (رادیان)،  $a$  عرض دستک فشاری معادل.

برای در نظر گرفتن اثر بازشو از رابطه‌ی موجود در آیین‌نامه نیوزیلند [۲۲] استفاده شده است، که در آن یک ضریب کاهش پهنای مؤثر برای حالت دیوار با بازشو مطابق با رابطه (۵) در نظر گرفته شده است.

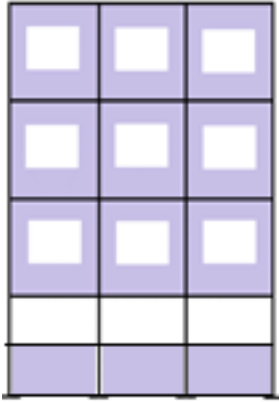
$$\lambda_{opening} = 1 - 1.5 \left( \frac{L_{opening}}{L_{inf\ ill}} \right) \quad (۵)$$

در این رابطه  $\lambda_{opening}$  ضریب کاهش پهنای مؤثر و  $L_{opening}$  طول بازشو در راستای افقی دیوار و  $L_{inf\ ill}$  طول کل دیوار در راستای افقی می‌باشد. اگر در ۳۳ درصد طول دیوار بازشو باشد، ضریب کاهش ۰/۵ بر اساس رابطه بالا به دست می‌آید.

### ۲-۳- معرفی قاب مورد مطالعه

در این تحقیق سازه‌های مورد بررسی ۴ طبقه و ۳ دهانه می‌باشند. طول دهانه‌ها ۵/۵ متر می‌باشد و ارتفاع طبقات اول ۳/۵ متر و ارتفاع طبقات دیگر ۳ متر می‌باشد. و سیستم باربر جانبی قاب خمشی متوسط بتنی می‌باشد و در شهر شیراز و خاک منطقه نوع ۳ در نظر گرفته شد. و جنس مصالح بنایی مصرفی در دیوارهای پرکننده بلوک سقالی در نظر گرفته شده است. پلان و نمای قاب مورد بررسی در شکل ۳ نشان داده شده است.

برای آن که هدف بررسی اثر دیوار پرکننده بر رفتار سازه می‌باشد. سازه‌های مذکور طبق روال موجود در طراحی بدون هر گونه دیوار پرکننده بر اساس آخرین استانداردهای موجود در ایران بارگذاری و طراحی شده‌اند. طراحی سازه‌ها با نرم‌افزار ایتبس انجام شده است. برای بارگذاری سازه‌های مورد بررسی از مقررات ملی ساختمان ایران، مبحث ۶ [۲۳] و برای بارهای لرزه‌ای از استاندارد ۲۸۰۰ ویرایش چهارم [۲۴] استفاده شده



شکل ۴- چیدمان قرارگیری دیوار پرکننده در قاب ستون کوتاه

### ۳-۴- مفاصل پلاستیک تعریف شده در مدل مورد بررسی

پارامتر مدل سازی و معیار پذیرش ستون بتن آرمه با مود شکست خمشی (PMM) و مود شکست برشی (V)، طبق جدول (۶-۹) نشریه ۳۶۰ به دست آمده است که در جدول (۳) مشاهده می شود. در تحلیل غیرخطی، کنترل اعضاء بر اساس تغییرشکل صورت می گیرد. منحنی بار - تغییرشکل کلی (تعمیم یافته) برای اعضاء بتنی در شکل (۷) نشان داده شده است [۲۱].

جدول ۳: پارامتر مدل سازی و معیار پذیرش ستون های بتن آرمه

با توجه به جدول ۶-۹ نشریه ۳۶۰ [۲۱] بر اساس جزئیات آرماتور عرضی، پارامترهای مدل سازی های مورد نیاز در تعریف مفاصل ستون ها تعریف شده است که پس از به دست آوردن نسبت های بیان شده با استفاده از درون یابی خطی میان مقادیر جدول، پارامترها و معیار پذیرش مفاصل به صورت دستی به دست آمده است.

### ۴- تحلیل استاتیکی فزاینده غیرخطی (Pushover)

در تحلیل پوش آور با تعیین تغییرمکان هدف برای هر سازه نیروهای جانبی به طور فزاینده به مدل سازه اعمال می شود تا تغییرمکان نقطه کنترل که در مدل ها در تراز بام در نظر گرفته شده است، به تغییرمکان هدف برسد. در تحلیل غیرخطی به دلیل عدم صحت جمع آثار قوا لازم است تا ابتدا بارهای ثقلی بر سازه اعمال گردد، سپس بارهای جانبی به مرور اعمال گردد تا در نهایت با رسیدن به تغییرمکان هدف در نقطه کنترل تحلیل به پایان برسد.

و همچنین مشخصات مصالح مصرفی تعریف شده در مدل های سازه ای در جدول (۲) آورده شده است.

نوع المان	شماره طبقه	نوع	رفتار	مود شکست اعضا
تیر	۱ و ۲	ممان خمشی (M3)	تغییرشکل کنترل	خمشی
تیر	۳ و ۴	ممان خمشی (M3)	تغییرشکل کنترل	خمشی
ستون	۱ و ۲	اندرکنش نیرو- خمش دو محوره	تغییرشکل کنترل	خمشی
ستون	۱	نیروی برشی	تغییرشکل کنترل	برشی

جدول ۲- مشخصات مصالح مصرفی تعریف شده در قاب های بتنی

نوع مصالح	مدول الاستیسیته ( $\text{ton/m}^2$ )	ضریب پواسون	مقاومت فشاری ( $\text{ton/m}^2$ )	وزن واحد حجم ( $\text{ton/m}^3$ )
بتن	۲۳۳۳۷۹۰	۰/۲	۲۰۰۰	۲/۵
فولاد	۲۱۰۰۰۰۰	۰/۳	۳۸۶۶۸	۷/۸۵
مصالح بنایی	۱۰۱۹۷۱	۰/۲۵	۲۰۴	۰

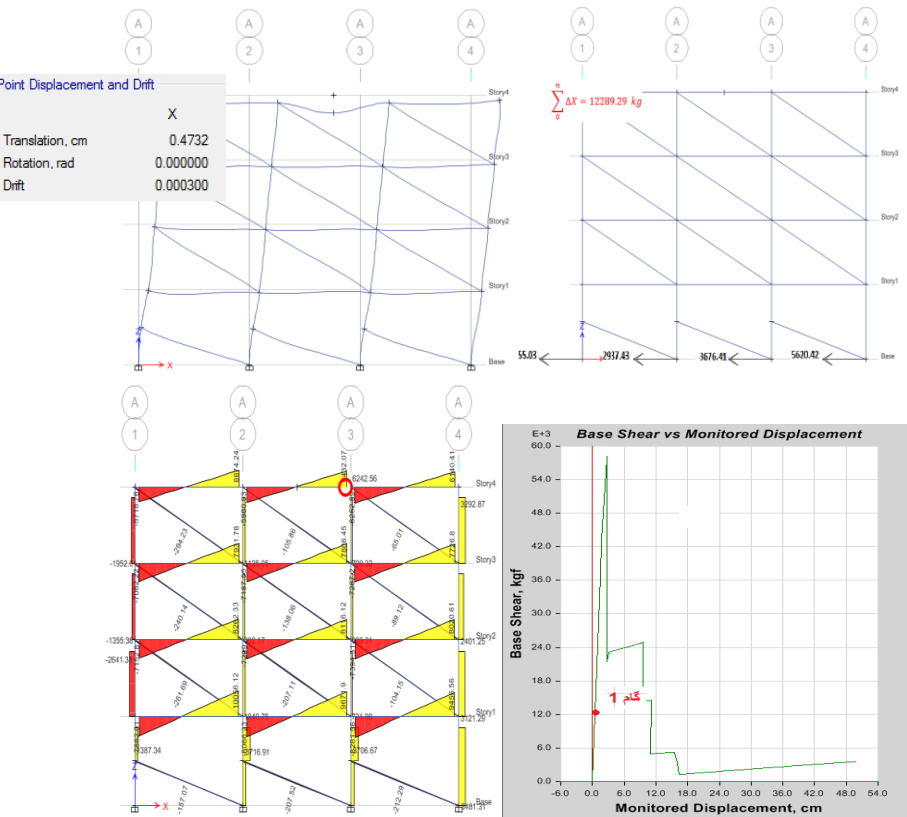
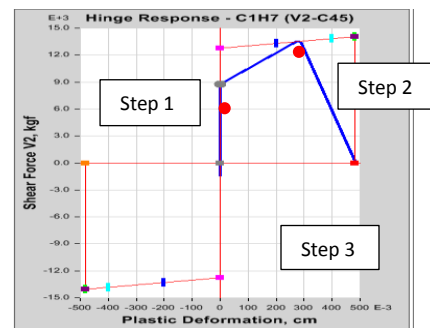
### ۳-۳- مشخصات مربوط به قاب مورد مطالعه

همان طور که در شکل (۴) مشاهده می شود، الگوهای مختلف قرارگیری دیوار پرکننده در یک قاب دو بعدی که دارای بازشوهای در ارتفاع می باشد، نشان داده شده است. اندازه بازشوها مطابق شکل (۴) در طبقه هم کف ۵۰ درصد طول دیوار و در سایر طبقات بالای ۳۳ درصد فرض شده است. لازم به ذکر است که در این پژوهش دو تیپ قاب بتنی مورد بررسی قرار گرفته شده است، قابی که دیوار پرکننده در آن مدل سازی شده با نام "قاب ستون کوتاه (short column frame)" و قابی که بدون در نظر گرفتن دیوارهای پرکننده مدل سازی و تحلیل شده است با نام "قاب خالی (bare frame)" معرفی شده است.

#### ۴-۱- بررسی نتایج مفاصل برشی در طی روند گام به گام تحلیل و بررسی ایجاد شکست ترد برشی در ستون های کوتاه

همان طور که در شکل (۵) مشاهده می شود در گام ۱ مفصل پلاستیک وارد گام غیرالاستیک نشده است و در سطح عملکرد قابلیت استفاده بی وقفه قرار گرفته است. در گام ۲ مفصل پلاستیک ستون به بیشترین ظرفیت برشی خود رسیده است که در گام ۳ به صورت ناگهانی دچار فروریزش و شکست برشی می شود و مفصل پلاستیک، ظرفیت برشی خود را به طور کامل از دست می دهد.

شکل ۵- بررسی مفصل برشی ستون کوتاه در حین تحلیل پوش آور



شکل ۶: گام ۱ در قاب ستون کوتاه

#### ۴-۲- مراحل تحلیل پوش آور مدل مورد بررسی

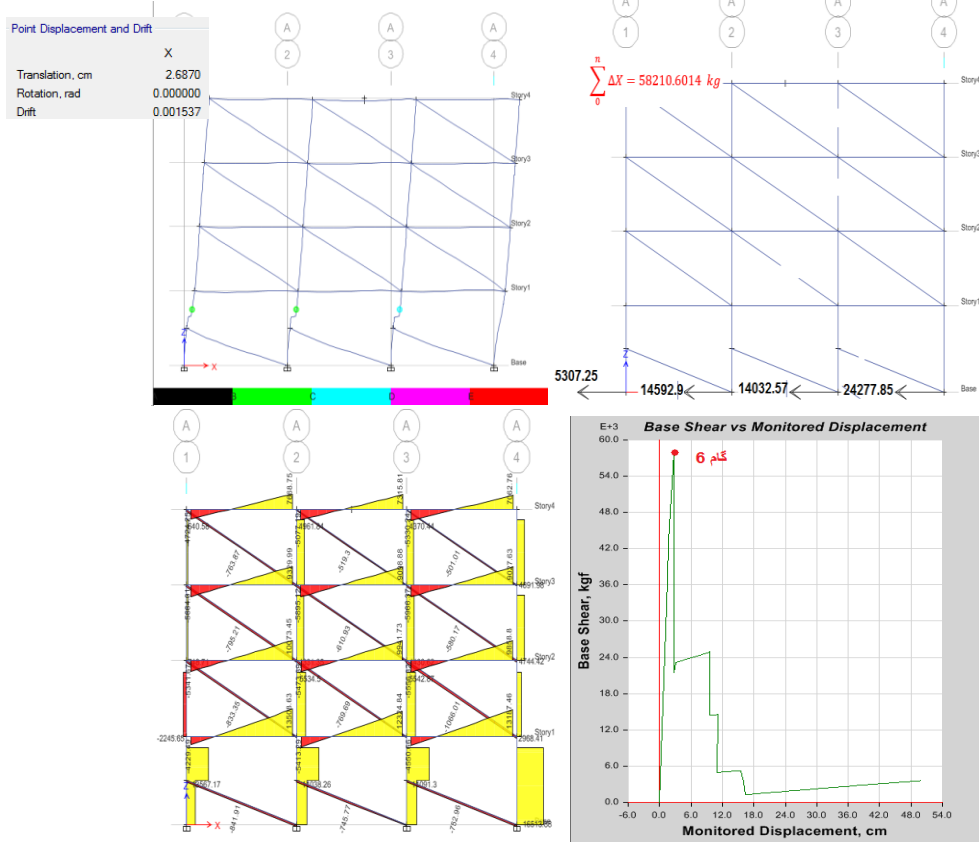
با توجه به طولانی بودن گام های تحلیل پوش آور در این جا مراحل که اتفاقات مهمی در نمودار پوش آور اتفاق افتاده را در شکل های ۶ تا ۸ آورده و مورد تجزیه و تحلیل قرار داده شده است.

در گام یک با وارد کردن بار جانبی طیفی به سازه تغییر مکان جانبی و مقدار برش پایه سازه را خوانده، که در این جا حدود ۱۲۰۰۰ کیلوگرم نیروی برش پایه در سازه ایجاد شده است. و مقدار تغییر مکان جانبی ۰/۴۷ سانتی متر می باشد. و با این حال سازه در حالت الاستیک قرار دارد.



است زیرا این ستون به صورت ستون بلند عمل می کند، و پس از فروپاشی کامل ستون های کوتاه در دهانه های مجاور مود شکست خمشی در این ستون اتفاق می افتد.

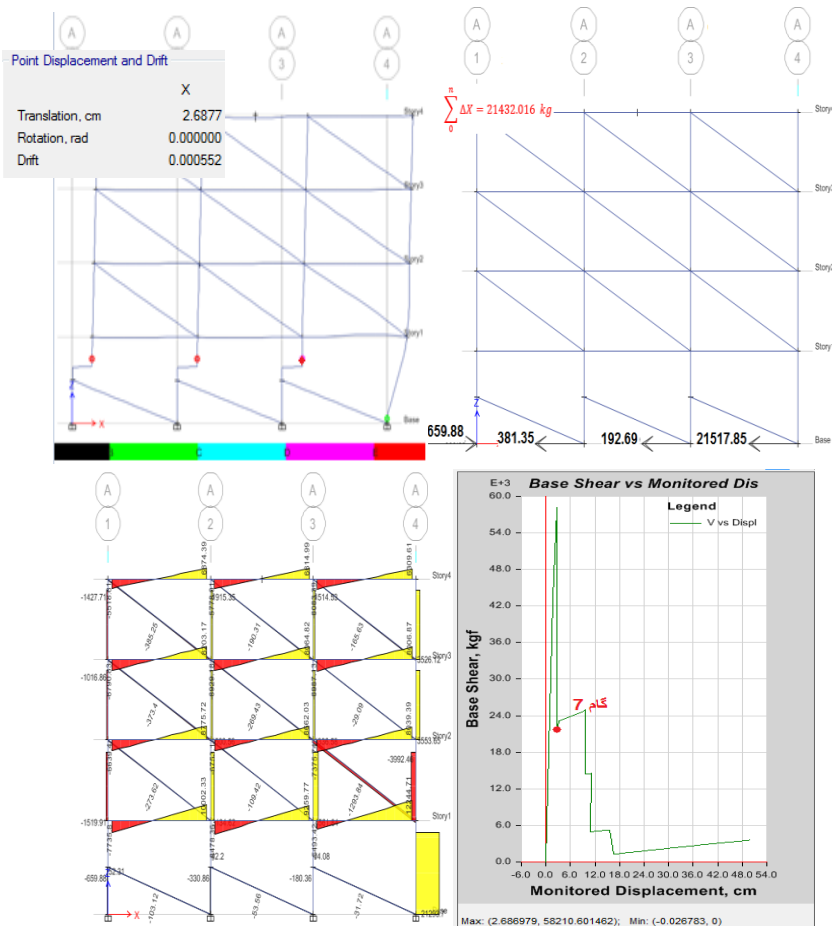
در گام ۶ مقدار کل برش پایه برداشت شده از نمودار پوش آور ۵۸۰۰۰ کیلوگرم است که به پیشینه برش پایه رسیده است و مقدار تغییرمکان جانبی ۲/۷ سانتی متر می باشد. و همان طور که در شکل ۷ نشان داده شده است با توجه به اینکه وارد کردن بار جانبی از سمت چپ سازه می باشد، مفاصل پلاستیک برشی در سه ستون کوتاه تشکیل شده اند. و ستون سمت راست یک ستون معمولی (بلند) است و در آن شکست برشی رخ نداده



شکل ۷- گام ۶ از قاب ستون کوتاه

فروپاشی سازه می شود و همان طور که دیده می شود ستون سمت راست که ستون بلند است هم زمان با فروپاشی ستون های کوتاه یک مفصل سبز رنگ تشکیل شده است، که با ادامه دادن مراحل تحلیل ستون بلند هم به شکست خمشی کامل می رسد (شکل ۸).

در گام ۷ با تغییرمکان جانبی ۲/۷ سانتی متر مقدار برش پایه سازه با یک افت شدید ناگهانی به ۲۱۰۰۰ کیلوگرم می رسد و در هر سه ستون کوتاه یک شکست بزرگ ایجاد و باعث فروپاشی کامل ستون می شود. این اتفاق به علت مود شکست برشی ستون کوتاه شکل می گیرد. در یک تغییرمکان خیلی کم باعث افت شدید در مقاوت سازه ( $\Delta V=30 \text{ ton}$ ) و

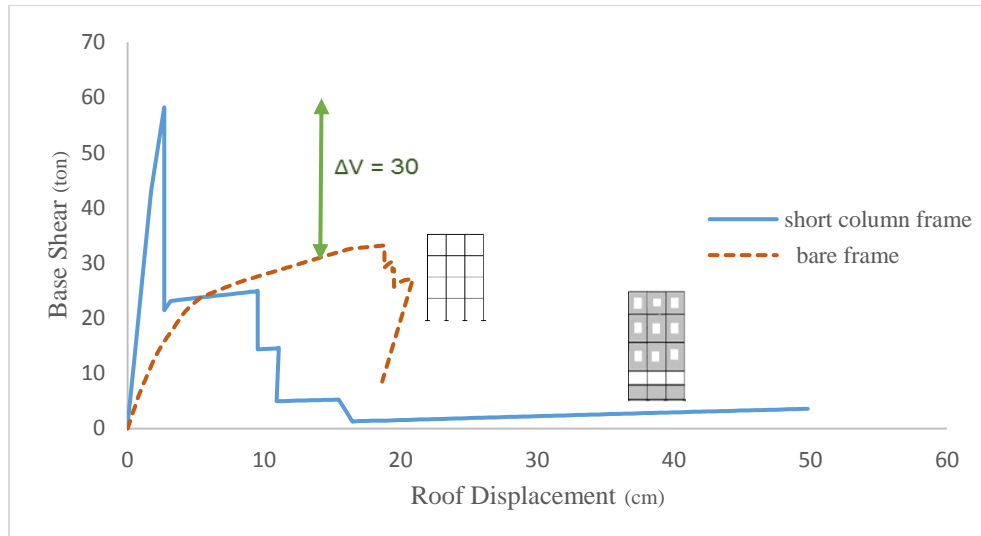


شکل ۸- گام ۷ قاب ستون کوتاه

(اختلاف سختی اولیه‌ی سازه) در رفتار الاستیک دو سازه در جدول (۴) مشاهده می‌شود که مقدار اختلاف سختی در قاب با و بدون دیوار پرکننده ۷۳ درصد می‌باشد، همچنین در شکل (۱۰) مشاهده می‌شود که مقاومت قاب ستون کوتاه از حدود ۶۰ تن به ۳۰ تن رسیده است، که نشان‌دهنده‌ی کاهش ۵۰ درصدی مقاومت در کل قاب بتنی می‌باشد. مشاهده می‌شود با رخداد شکست ستون کوتاه افت شدیدی در مقاومت و افزایش قابل ملاحظه‌ی سختی پدید می‌آید.

### ۳-۴- مقایسه منحنی پوش‌آور قاب ستون کوتاه و قاب خالی

در شکل (۹) منحنی‌های پوش‌آور برای قاب ۴ طبقه بتنی در حالت وجود دیوار ۱۷ سانتی‌متری در تمام دهانه‌ها نشان داده شده است. این شکل گویای تفاوت رفتاری سازه با قاب بدون دیوار پرکننده و سازه با دیوار پرکننده است. همچنین به دلیل وجود دیوارهای پرکننده اختلاف شیب



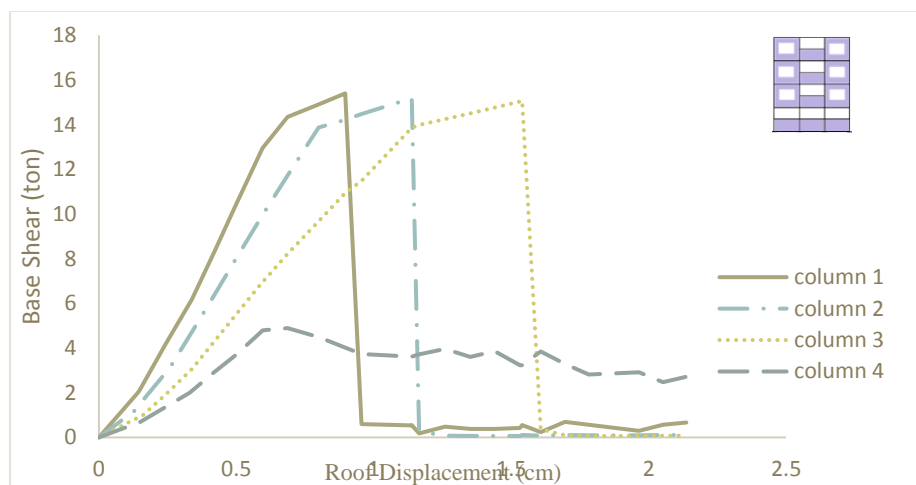
شکل ۹- مقایسه منحنی پوش آور قاب ستون کوتاه و قاب خالی

#### ۴-۴- مقایسه منحنی نیروی برشی ستون‌های طبقه اول قاب یک ستون کوتاه

با دقت در منحنی‌های شکل (۱۰) نیروی برشی بیشینه وارده به ستون به دلیل حضور پرکننده از حدود نیروی برشی ۵ تن به حدود ۱۴ تن افزایش یافته که بیان‌گر افزایش ۱۸۰٪ نیروی برشی بیشینه می‌باشد. این افزایش نیروی برشی در ناحیه اندرکنشی است بنابراین با افزایش مقاومت ستون در ناحیه کنج‌های فشاری با تأمین درصد مناسب و فواصل مناسب برای میلگردهای عرضی می‌توان از وقوع این نوع گسیختگی جلوگیری کرد.

جدول ۴- سختی جانبی مؤثر و الاستیک سازه

درصد کاهش سختی در قاب	قاب بدون دیوار پرکننده	قاب با دیوار پرکننده (ستون کوتاه)	سختی قاب (ton/m)
۷۲	۶۳۰	۲۲۵۰	سختی قاب (ton/m)



شکل ۱۰- مقایسه منحنی نیروی برشی ستون‌های طبقه اول در قاب ستون کوتاه

$S_d$ : جابه‌جایی طیفی       $S_a$ : شتاب طیفی

هم‌چنین بر اساس ATC-40 منحنی طیف نیاز با استفاده از روابط زیر به فرمت ADRS تبدیل می‌شود.

$$S_{di} = \frac{T_{i2}}{4\pi^2} \quad (7)$$

حال طیف ظرفیت دو خطی ایده‌آل و نیاز روی یک نمودار رسم می‌شوند و با فرض اولین نقطه عملکردی، میرایی کاهش یافته و ضرایب کاهش طیفی محاسبه می‌شوند و طیف نیاز کاهش یافته رسم می‌گردد. اگر اختلاف بین نقطه تلاقی طیف نیاز کاهش یافته با طیف ظرفیت کمتر از ۵ درصد با نقطه فرض اولیه باشد، این نقطه به عنوان نقطه عملکرد قابل قبول می‌باشد.

به منظور بررسی توانایی سازه‌ها در برآوردن شرایط عملکردی آستانه فروریزش در زلزله طرح، با استفاده از روش طیف ظرفیت برای الگوی بارگذاری جانبی طیفی نقاط عملکرد مطابق شکل (۱۱) که از نرم‌افزار ایتبس استخراج شده، برای سازه با و بدون دیوار پرکننده تعیین شده است. چنان‌که ملاحظه می‌شود مطابق با استاندارد یوروکد ۲۰۰۴ نقطه‌ی عملکرد سازه تعریف نشده است، یعنی شرایط مربوط به آستانه فروریزش در زلزله‌ی طرح را برآورده نمی‌کند.

### ۵- نمودارهای طیف- ظرفیت با رویکردهای مختلف

منحنی پوش‌آور سازه با استفاده از یک تحلیل استاتیکی غیرخطی در ایتبس بدست آورده شده است. نرم‌افزار ایتبس به صورت اتوماتیک منحنی پوش‌آور را با توجه به ضوابط ATC-40 به منحنی طیف ظرفیت تبدیل می‌کند. بر اساس ATC-40 منحنی پوش‌آور با استفاده از روابط زیر به فرمت ADRS تبدیل می‌کند.

$$\frac{V_i/W}{\alpha_1} \quad (5)$$

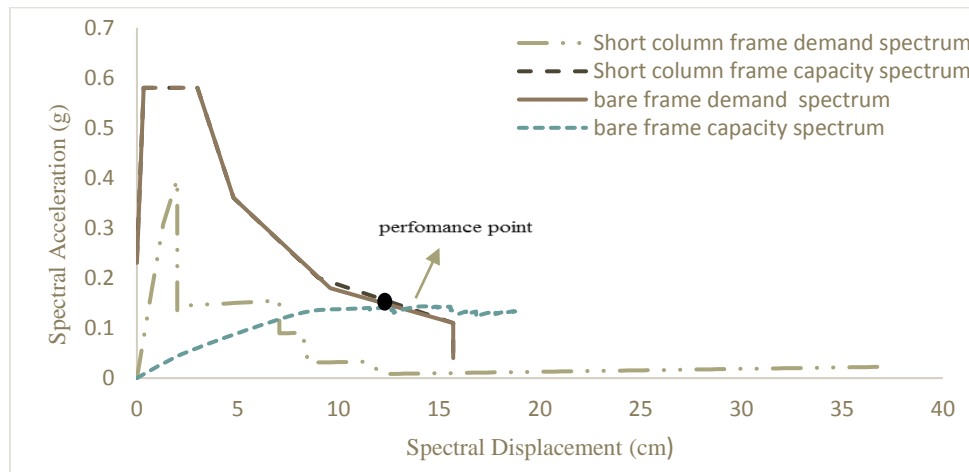
$$S_{di} = \frac{\Delta_{roof}}{PF_1 \times \phi_{1roof}} \quad (6)$$

$PF_1$ : ضریب مشارکت مودال برای مود اول       $\alpha_1$ : ضریب جرم مودال برای مود اول

$\phi_{i1}$ : دامنه مود اول در تراز  $i$ ام       $w_i/g$ : جرم مربوط به تراز  $i$ ام

$\Delta_{roof}$ : تغییر مکان بام بار مرده ساختمان + بارهای زنده بر حسب کاربری

$V$ : برش پایه سازه       $\phi_{roof}$ : دامنه شکل مود در تراز بام سازه



شکل ۱۱- طیف ظرفیت همراه با طیف نیاز برای قاب دو بعدی با و بدون دیوار بر اساس استاندارد یوروکد ۲۰۰۴



## ۶- جمع بندی و نتایج

در این مقاله اثر وجود دیوار پرکننده و پدیده‌ی ستون کوتاه بررسی شد. با توجه به نتایج ارائه شده از سازه ۴ طبقه ۳ دهانه بتنی، دیده می‌شود که با اضافه کردن دیوار پرکننده شیب ناحیه‌ی الاستیک منحنی پوش‌آور و مقاومت سازه افزایش می‌یابد و با اعمال نیروی جانبی طول مؤثر ستون کوتاه کاهش می‌یابد. و با کوتاه شدن ستون‌ها مکانیزم شکست از مود خمشی به مود برشی انتقال می‌یابد. بنابراین با افزایش سختی سهم ستون کوتاه از نیروی برشی نیز افزایش می‌یابد و با افزایش گام به گام بار جانبی، سهم نیروی جانبی از ظرفیت برشی ستون موجود تجاوز می‌کند و ستون کوتاه دچار شکست ترد برشی می‌شود و می‌شکند. که مشاهده شد نیروی برشی بیشینه وارده به ستون به دلیل حضور دیوار پرکننده، حدود ۵۰ درصد نسبت به قاب بدون دیوار پرکننده افزایش خواهد داشت، هم‌چنین مقدار اختلاف سختی در قاب با و بدون دیوار پرکننده حدود ۷۰ درصد می‌باشد با توجه به نتایج حاصل از تحلیل غیرخطی قاب‌ها، در ساختمان‌هایی که ستون کوتاه محتمل است، ستون کوتاه پس از ورود به ناحیه‌ی غیرخطی دچار آسیب‌دیدگی زود هنگام می‌شود و ظرفیت خود را در برابر نیروی جانبی از دست می‌دهد. با پیش‌بینی این رخداد و طراحی مناسب می‌توان از آسیب‌های غیرقابل جبران جلوگیری کرد. نکته مهم در این قسمت، افزایش نیروی برشی در ناحیه اندرکنشی قاب و پرکننده است. بنابراین با افزایش مقاومت ستون در ناحیه کنج‌های فشاری با تأمین درصد مناسب و فواصل مناسب برای میلگردهای عرضی می‌توان از وقوع این نوع گسیختگی تا حدودی جلوگیری کرد.

## ۷- مراجع

- [۵] تابش‌پور، م ر، ۱۳۹۲، قاب پرشده با دیوار آجری، فکد ایساتیس، ص ۱۱۵-۱۳۱.
- [۶] تابش‌پور، م ر، کریمی، ک، ۱۳۹۸، شکست برشی قاب بتنی در اندرکنش با دیوار پرکننده آجری، فصل‌نامه علوم و مهندسی زلزله، ص ۱۳۳-۱۴۳.
- [۷] تابش‌پور، م ر، کریمی، ک، آزاد، الف، کلات‌جاری، ر، ۱۳۹۰، بررسی بین اندرکنش قاب بتنی و دیوار پرکننده آجری، ششمین کنگره ملی مهندسی ایران، دانشگاه سمنان، سمنان.
- [۸] تابش‌پور، م ر، کریمی، ک، ۲۰۱۹، شکست برشی قاب بتنی در اندرکنش با دیوار پرکننده آجری، فصل‌نامه علوم و مهندسی زلزله، شماره ۶، ص ۱۳۳-۱۴۳.
- [۹] کریمی، ک، ۱۳۹۰، بررسی الزامات تعیین ضریب رفتار سازه‌های بتنی با دیوارهای پرکننده آجری، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود.
- [۱۰] موسوی، الف، ۱۳۹۰، بررسی ستون‌های بتنی کوتاه در طراحی و بهسازی لرزه‌ای، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه تفرش، تفرش.
- [11] Moretti ML, Tassios TP. Behavior and ductility of reinforced concrete short columns using global truss model, *ACI Structural Journal*. 2006; 103(3): 319.
- [12] Vahidi EK, Malekabadi MM. Conceptual investigation of short columns and masonry infill frames effect in the earthquakes. *International Journal of Civil and Environmental Engineering*. 2009; 3(11): 472-477.
- [13] Wang P, Shi QX, Wang QW, Tao Y. Experimental behavior and shear bearing capacity calculation of RC columns with a vertical splitting failure. *Earthq. Struct*. 2015; 9(6): 1233-1250.
- [14] Ramin K, Mehrabpour F. Study of short column behavior originated from the level difference on sloping lots during earthquake (special case: Reinforced concrete buildings). *Open Journal of Civil Engineering*. 2014.
- [15] Doğan G, Arslan M. Failure modes of RC columns under loading. *Int. J. Sci. Eng. Res*; 2016; 1279-1300.
- [16] Yuen YP, Kuang J. Nonlinear seismic responses and lateral force transfer mechanisms of RC frames with different infill configurations. *Engineering Structures*. 2015; 125-140.
- [۱] کمیته دائمی بازنگری آیین‌نامه طراحی ساختمان‌ها در برابر زلزله، آیین‌نامه طراحی ساختمان‌ها در برابر زلزله، استاندارد ۲۸۰۰ ویرایش چهارم، تهران، مرکز تحقیقات ساختمانو مسکن، ۱۳۹۸، چاپ اول.
- [2] Guevara LT, Garcia LE. The captive-and short-column effects, *Earthquake Spectra*. 2005; 21(1):14.
- [۳] تابش‌پور، م ر، آزاد، ا، گل افشانی، ع، ۱۳۸۹، تحلیل استاتیکی غیرخطی ساختمان فولادی با چیدمان نامنظم دیوار پرکننده، سومین همایش ملی مقاوم سازی و مدیریت شهری، تهران.
- [4] ATC-40. Seismic evaluation and retrofit of concrete buildings, Council AT;1996; California.

[۱۷] نوری فرد، الف، تابش پور، م ر، ۱۳۹۵، مروری تحلیلی و مقایسه‌ای بر روش‌های تعیین سختی طبقات، فصل‌نامه آنالیز سازه - زلزله، دوره ۱۳، شماره ۱.

[18] Pradeep S. Behavior of reinforced concrete frame with short column effect under lateral cyclic loading. Asian Journal of Civil Engineering (BHRC). 2017; 18(6): 879-891.

[19] Zhou X, Kou X, Peng Q, Cui J. Influence of infill wall configuration on failure modes of rc frames. Shock and Vibration. 2018.

[20] Wararuksajja W, Srechai J, Leelataviwat S, Sungkamongkol T, Limkatanyu S. Seismic design method for preventing column shear failure in reinforced concrete frames with infill walls. Journal of Building Engineering. 2021.

[۲۱] سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی کشور. دستورالعمل بهسازی لرزه‌ای ساختمان‌های موجود نشریه شماره ۱۳۹۲، ۳۶۰، انتشارات سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی کشور.

[22] P.f.t.B.I. Authority. New Zealand assessment code, Assessment and Improvement of the Structural Performance of Buildings in Earthquak. 2002.

[۲۳] وزارت راه و شهرسازی معاونت مسکن و ساختمان، مقررات ملی ساختمان ایران مبحث ششم بارهای وارد بر ساختمان‌ها، ویرایش چهارم، تهران، ۱۳۹۲، چاپ اول.