



Ferdowsi  
University of  
Mashhad

# Journal of Ferdowsi Civil Engineering

Page Journal: [civil-ferdowsi.um.ac.ir](http://civil-ferdowsi.um.ac.ir)



## Numerical Investigation of the Seismic Behavior of Self-Centering Post-Tensioned Concrete Wall System with Friction-Based Damper\*

Research Article

Sina Heyrani Moghaddam<sup>1</sup>, Ahmad Shoostari<sup>2</sup>

DOI: [10.22067/jfeci.2022.71012.1044](https://doi.org/10.22067/jfeci.2022.71012.1044)

### 1. Introduction

Buildings designed based on common regulations usually have a permanent displacement at the end of severe earthquakes, and this residual drift causes economic costs and safety risks for residents. In recent years, researchers have proposed a novel system that can return to its original position after an earthquake and minimize damages to the structure. Therefore, using self-centering systems as a seismic force-resisting system fulfills this purpose by providing the restoring force. One of the self-centering systems is the post-tensioned (PT) concrete wall, in which vertical post-tensioned cables provide the desired restoring force.

### 2. Method

In this research, the proposed system of post-tensioned concrete wall with friction-based damper (FBD), post-tensioned concrete wall system with energy dissipators (ED) bars, and concrete shear wall system are modeled in OpenSees software as three-, six-, and ten-story frames. The mentioned models are subjected to cyclic loading and time history analysis. This research aims to investigate the impact of the friction-based damper on the behavior of the post-tensioned concrete wall system and compare the seismic parameters of this system with the post-tensioned concrete wall system with ED bars and concrete shear wall system.

### 3. Studied Models

The loading of the studied buildings was based on residential use and according to the ASCE7 code. Moreover, the design of beam and column sections was done according to the AISC code. The seismic design of structures (design of concrete shear wall as a seismic force-resisting system) has been done based on the seismic design category of D. Moreover, the height of stories in all buildings is 4 meters.

To compare the behavior of the three mentioned systems, frame B of the buildings was modeled in

OpenSees software. The post-tensioned cables and ED bars were placed in the cross-section of the PT concrete wall based on the recommended range of Yang and Lu's research. There were steel columns on both sides of the PT concrete wall system with FBD, and four friction-based dampers were used in each story between the concrete wall and the columns. In this system, compared to the PT concrete wall system with ED bars, the ED bars at the foot of the wall have been removed. It is worth mentioning that in the two systems, the wall is connected to the foundation in such a way that the wall has a rocking motion under the effect of lateral loads.

Table 1 shows the characteristics of the examined walls in the studied three-, six-, and ten-story frames and Table 2 specifies the area of the cables and ED bars of the PT concrete wall system with ED bars. Moreover, to make a better comparison of the seismic behavior between the three mentioned systems, the thickness and general rebars of the concrete walls, the strength of concrete, and the specifications of the frames were considered the same. Also, the ED bars are removed in the PT concrete wall system with FBD, and the friction dampers on both sides of the wall at 1-meter intervals (along the height wall) absorbed energy are used. The friction dampers used in this study are the L29 damper of Dal Lago et al.'s research. According to Figure 1, this damper consists of two steel angle sections and 2- and 5-mm steel plates.

### 4. Results and discussion

In this study, the seismic behavior of the PT concrete wall system with FBD was compared with PT concrete wall system with ED bars and conventional concrete shear wall system. For this purpose, the three mentioned systems were modeled as three-, six-, and ten-story frames in OpenSees software and were subjected to cyclic loading and response history analysis. Seven far-fault earthquake records from the FEMA-P695 code have been used to perform response history analysis.

\*Manuscript received: 16 June 2021, Revised, 23 January 2022, Accepted, 23 July 2022.

<sup>1</sup> PhD of Structural Engineering, Department of Civil Engineering, Engineering Faculty, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran.

<sup>2</sup> Corresponding author. Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Engineering Faculty, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran. **Email:** [ashoosht@um.ac.ir](mailto:ashoosht@um.ac.ir)

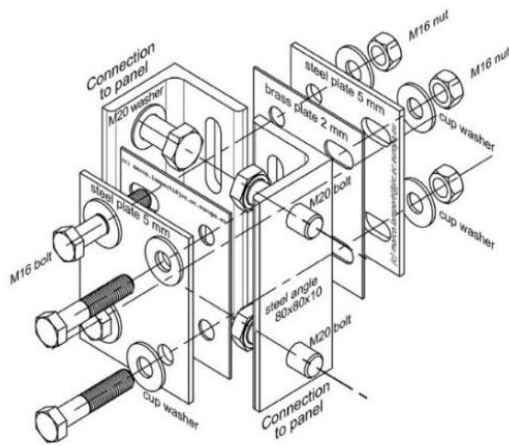


Figure 1. The friction-based damper

Table 1. The characteristics of the concrete walls

Model	Story	General Rebars	Wall Thickness (cm)	Concrete Strength (MPa)
3-story	2,3	$\phi 12@30$	25	20
	1	$\phi 16@30$		
6-story	6	$\phi 12@30$	35	30
	5	$\phi 16@30$		
	3,4	$\phi 22@30$		
	2	$\phi 25@30$		
	1	$\phi 28@30$		
10-story	10	$\phi 12@30$	45	45
	9	$\phi 16@30$		
	7,8	$\phi 22@30$		
	6	$\phi 25@30$		
	4,5	$\phi 28@30$		
	1,2,3	$\phi 32@30$		

Table 2. The total area of the cables and ED bars of the PT concrete wall with ED bars

Model	Cable Area (cm <sup>2</sup> )	ED Bars Area (cm <sup>2</sup> )
3-story	8	49.2
6-story	16	98.4
10-story	30	172.2

Based on the obtained results, unlike the other two systems, the PT concrete wall system with FBD had a lower resistance loss in the loading cycles. Moreover, the PT concrete wall systems with FBD and PT concrete wall systems with ED bars had self-centering behavior, and their residual drift after each loading cycles was almost equal to zero.

According to the responses from the PT concrete wall system with FBD for three-, six-, and ten-story buildings, the energy absorption coefficients in the total applied loading cycles were 4.89, 4.12, and 5.10, respectively. These values were 3.56, 2.94, and 2.53 for the PT concrete wall system with ED bars, respectively, and were 4.26, 4.10, and 2.97 for the concrete shear wall system, respectively. These values show that the PT concrete wall system with FBD has a higher total energy absorption than the other two systems. Moreover, the concrete shear wall system has more energy absorption compared to the PT

concrete wall system with ED bars in all three studied buildings.

Based on the responses of the maximum drift average of each story caused by seven far-fault earthquake records in three-story buildings, the variation range of this value for the PT concrete wall system with FBD is from 0.87 to 0.90 percent, while this range for PT concrete wall system with ED bars and the concrete shear wall system is 1.01 to 1.14 percent and 0.84 to 1.18 percent, respectively. For the six-story building, this range for the PT concrete wall system with FBD is from 0.94 to 1.06 percent, for the PT concrete wall system with ED bars is from 0.99 to 1.30 percent, and for the concrete shear wall system is from 0.44 to 1.33 percent. Moreover, in the ten-story building, for PT concrete wall systems with FBD, post-tensioned concrete wall system with ED bars, and concrete shear wall system, the average of maximum drift varies from 0.63 to 0.91, from 0.67 to 1.33, and from 0.41 to 1.30 percent, respectively. The average values of the maximum base shear obtained from seven earthquake records, and as a result, the maximum acceleration in three-, six-, and ten-story buildings with PT concrete wall system with FBD are less than the other two systems.

After the occurrence of an earthquake, in the PT concrete wall system with FBD, compared to the PT concrete wall system with ED bars and concrete shear wall system, it is possible to replace the damaged dampers and reuse this system with the lowest repair cost.



## بررسی عددی رفتار لرزهای سیستم دیوار بتنی پس کشیده مرکزگرا دارای میراگر اصطکاکی\*

مقاله پژوهشی

DOI: 10.22067/jfpei.2022.71012.1044

احمد شوشتري<sup>۲</sup>

سینا حیرانی مقدم<sup>۱</sup>

**چکیده** طراحی لرزهای سازه‌ها باید به نحوی صورت گیرد که هزینه‌های تعمیر سازه پس از وقوع زلزله به حداقل برسند. سیستم‌های مرکزگرا هم‌چون دیوار بتنی پس‌کشیده این هدف را تأمین می‌کنند. در این پژوهش برای مقایسه رفتار لرزهای سیستم پیشنهادی دیوار بتنی پس‌کشیده دارای میراگر اصطکاکی با سیستم دیوار بتنی پس‌کشیده دارای میلگردهای مستهلک‌کننده و دیوار برشی بتنی معمولی، سه سیستم مذکور در ساختمان‌های سه، شش و ده طبقه با استفاده از نرم‌افزار *OpenSees* تحت اثر بارگذاری چرخه‌ای و تحلیل تاریخچه‌زمانی قرار می‌گیرند. ضریب جذب انرژی در مجموع چرخه‌های بارگذاری اعمالی در دیوار بتنی پس‌کشیده دارای میراگر اصطکاکی برای سازه‌های سه، شش و ده طبقه به ترتیب ۱/۳۷، ۱/۴۰ و ۲/۰۲ برابر دیوار بتنی پس‌کشیده دارای میلگردهای مستهلک‌کننده و ۱/۱۵، ۱/۰۵ و ۱/۷۲ برابر دیوار برشی بتنی معمولی است. تحت اثر هفت رکورد زلزله اعمالی میانگین جابه‌جایی جانبی نسبی حداکثر طبقات پایین در سیستم دیوار برشی بتنی معمولی کمتر از دو سیستم دیگر و میانگین جابه‌جایی جانبی نسبی حداکثر در طبقات بالا در سیستم دیوار بتنی پس‌کشیده دارای میراگر اصطکاکی کمتر از سایر سیستم‌ها است.

**واژه‌های کلیدی** دیوار بتنی پس‌کشیده مرکزگرا، میراگر اصطکاکی، میلگردهای مستهلک‌کننده، بارگذاری چرخه‌ای، تحلیل تاریخچه‌زمانی.

## Numerical Investigation of the Seismic Behavior of Self-centering Post-tensioned Concrete Wall System with Friction-based Damper

Sina Heyrani Moghaddam

Ahmad Shooshtari

**Abstract** The seismic design of buildings ought to be done to decrease the expenses of building repairing after an earthquake. Self-centering systems such as the post-tensioned concrete wall can provide this purpose. In this study, to evaluate the seismic behavior of the post-tensioned concrete wall with friction-based damper (FBD), the proposed system, the post-tensioned concrete wall with energy dissipator (ED) bars, and the concrete shear wall are subjected to the cyclic and nonlinear response history analyses at three, six, and ten-story buildings using *OpenSees* software. Based on the cyclic analysis, the total energy dissipation coefficients for the post-tensioned concrete wall with FBD in three, six, and ten-story buildings are respectively 1.37, 1.40, and 2.02 times of that obtained for the post-tensioned concrete wall with energy dissipator bars system, and are respectively 1.15, 1.05, and 1.72 times of that achieved for the concrete shear wall system. According to the results of the applied seven earthquake records, the average of the maximum drift in the concrete shear wall system is less than the other systems in the lower floors, and the average of the maximum drift in the upper floors in the post-tensioned concrete wall with FBD is less than the other systems.

**Keywords** Self-centering post-tensioned concrete wall, Friction-based damper, Energy dissipators bars, Cyclic loading, Nonlinear response history analysis.

\* تاریخ دریافت مقاله ۱۴۰۰/۳/۲۶ و تاریخ پذیرش آن ۱۴۰۱/۵/۱ می‌باشد.

(۱) دکتری، گروه مهندسی عمران - گرایش سازه، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد

(۲) نویسنده مسئول، استادیار، گروه مهندسی عمران - گرایش سازه، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد

## مقدمه

ساختمان‌هایی که بر اساس آیین‌نامه‌های رایج طراحی می‌شوند، معمولاً دارای تغییر مکان دائمی در انتهای زلزله‌های شدید می‌باشند که این جابه‌جایی نسبی باقی‌مانده باعث ایجاد هزینه‌های اقتصادی و خطرات ایمنی برای ساکنان می‌شود. در سال‌های اخیر محققان و پژوهشگران سیستم نوینی را پیشنهاد کردند که قادر است پس از وقوع زمین‌لرزه به موقعیت اولیه خود بازگشته و خسارت‌های وارده به سازه را به حداقل برساند. از این رو استفاده از سیستم‌های مرکزگرا به‌عنوان سیستم باربر جانبی که با فراهم کردن نیروی بازگرداننده باعث بازگشت سازه به وضعیت اولیه آن می‌شود، این هدف را تأمین می‌کند. یکی از سیستم‌های کاربردی مرکزگرا، دیوار بتنی پس‌کشیده می‌باشد که در این سیستم کابل‌های پس‌کشیده قائم نیروی بازگرداننده موردنظر را فراهم می‌کند.

اولین بار در سال ۱۹۹۳ پرستلی و تاوو [1] استفاده از سیستم قاب خمشی بتنی پیش ساخته‌ی مرکزگرایی را که اتصالات آن کابل‌هایی پیش‌تینده بود، پیشنهاد کردند. استانتون و همکاران [2] نیز یک سیستم دوگانه را معرفی کردند که آرما توره‌های فولاد نرمه با کابل‌هایی غیرچسبنده در اتصالات بحرانی ترکیب شده بود. علت استفاده از آرما توره‌های فولاد نرمه، استهلاک انرژی چرخه‌ای سیستم بود. استانتون و ناکاکی یک سیستم دیوار پیش‌تینده‌ی پیش‌ساخته را معرفی کردند که در آن پانل‌های دیوار به‌صورت جداگانه در کنار یکدیگر قرار داشتند تا اجازه‌ی حرکت گهواره‌ای به هر کدام از پانل‌ها داده شود. در این سیستم، وزن هر پانل نیروی لازم مرکزگرایی را فراهم می‌کرد. هم‌چنین در این سیستم در صورتی که وزن دیوارها برای برگشت به نقطه اولیه کافی نباشد، استفاده از کابل‌های پس‌کشیده که دیوارها را به پی متصل می‌کند پیشنهاد شده‌است. از سویی دیگر متصل‌کننده‌های برشی شکل‌پذیر در بین دیوارها برای استهلاک انرژی در این سیستم پیشنهاد شده‌است [3]. رستروپو [4] بر اساس سیستم پیشنهادی استانتون و ناکاکی سیستم دیوار طره‌ای بتنی پیش‌تینده دارای کابل‌های پس‌کشیده و میلگردهای نرمه برای جذب انرژی را پیشنهاد داد. ویژگی اصلی این سیستم ظرفیت جابه‌جایی جانبی بالا و کمتر بودن خسارت سازه‌ای بود. در سال ۲۰۰۷ رفتار مرکزگرایی دیوار بتنی پیش‌ساخته دارای کابل غیرچسبنده توسط ارکمن و اسکولتز مورد بررسی قرار گرفت.

نتیجه‌ی این پژوهش نشان می‌دهد که نحوه‌ی توزیع کابل‌های پس‌کشیده در دیوار اثر ناچیزی بر رفتار چرخه‌ای این سیستم دارد ولی آرایش این کابل‌ها بر سختی جانبی و ظرفیت جذب انرژی دیوارها تأثیرگذار می‌باشد [5]. هم‌چنین بر اساس مدل تحلیلی ارائه شده توسط این دو محقق، قراردادن کابل‌های پس‌کشیده در انتهای دیوار باعث کاهش جابه‌جایی نسبی دیوار تحت اثر بارهای جانبی می‌شود [6].

خان‌محمدی و حیدری [7] با استفاده از نرم‌افزار OpenSees چهار ساختمان هشت، دوازده، شانزده و بیست طبقه دارای سیستم دیوار بتنی مرکزگرا را نسبت به کردند که در آن قطعات مختلف دیوار بتنی در ارتفاع با استفاده از میلگردهای فولادی نرمه به یکدیگر متصل می‌شوند. در این مقاله مدل‌های مورد بررسی تحت اثر تحلیل تاریخچه‌ی پاسخ قرار گرفت که با بررسی پاسخ‌ها مشخص گردید که قرار دادن کابل پس‌کشیده در قسمت میانی و میلگردهای فولادی نرمه در موقعیت ۱۰ درصدی طول دیوار نسبت به انتهای آن، مؤثرترین محل است و این چیدمان باعث ثابت ماندن شتاب افقی در ارتفاع دیوار تحت اثر بارهای جانبی می‌شود. هم‌چنین بررسی منحنی‌های چرخه‌ای نشان می‌دهد با افزایش قطعات دیوار در ارتفاع نسبت به حالتی که دیوار به‌صورت یک سره اجرا شود، درصد جذب انرژی افزایش می‌یابد. شاه‌پوری و تسنیمی به تحلیل غیرخطی یک نمونه دیوار برشی ترکیبی بتن مسلح پیش‌ساخته دارای بازشو در نرم افزار اجزای محدود پرداختند [8]. گنو و همکاران [9] استفاده از غلاف‌های فولادی در دو پاشنه دیوار بتنی پس‌کشیده برای جلوگیری از خرد شدن بتن در این نواحی را پیشنهاد دادند. هم‌چنین در سیستم پیشنهادی گنو و همکاران ستون‌هایی فولادی به همراه میراگرهای فلزی برای جذب بیشتر انرژی مورد استفاده قرار گرفته است.

در سال ۲۰۱۶ یک سیستم دیوار بتنی مرکزگرا شامل دیوار پیش‌ساخته به‌همراه ستون‌های انتهایی توسط هنری و همکاران مورد بررسی قرار گرفت. در این مدل دیوار بتنی با استفاده از تعدادی قطعات فلزی O شکل به ستون‌های اطراف دیوار متصل شده و به دیوار اجازه بلند شدن از پی داده می‌شود. نتایج این کار پژوهشی نشان می‌دهد که افزایش تعداد اتصالات O شکل و کاهش نیروی پیش‌تندگی کابل باعث افزایش جذب انرژی و کاهش خرابی پای دیوار می‌شود. هم‌چنین محدود کردن نیروی

کمتر و شکل پذیری بالاتری نسبت به سیستم بتنی پس کشیده مرکزگرا دارای میلگردهای مستهلک کننده دارد. در این پژوهش رفتار لرزه‌ای مدل عددی سیستم پیشنهادی دیوار بتنی پس کشیده دارای میراگر اصطکاکی با سیستم دیوار بتنی پس کشیده دارای میلگردهای مستهلک کننده و دیوار برشی بتنی معمولی، به صورت ساختمان‌های سه، شش و ده طبقه با استفاده از نرم افزار OpenSees مورد مقایسه قرار می‌گیرد. بدین منظور مدل‌های عددی مورد نظر تحت اثر بارگذاری چرخه‌ای و تحلیل تاریخچه زمانی قرار می‌گیرند.

### روش تحقیق

در این پژوهش سیستم پیشنهادی دیوار بتنی پس کشیده مرکزگرا دارای میراگر اصطکاکی، سیستم دیوار بتنی پس کشیده مرکزگرا دارای میلگردهای مستهلک کننده و دیوار برشی بتنی معمولی به صورت قاب‌های سه، شش و ده طبقه نسبت به شده است. مدل‌های مذکور تحت اثر بارگذاری چرخه‌ای و تحلیل تاریخچه زمانی قرار گرفته است. هدف از انجام این پژوهش بررسی اثر میراگر اصطکاکی بر رفتار سیستم دیوار بتنی پس کشیده مرکزگرا و مقایسه پارامترهای لرزه‌ای این سیستم با سیستم‌های دیوار بتنی پس کشیده مرکزگرا دارای میلگردهای مستهلک کننده و دیوار برشی بتنی معمولی می‌باشد. در ادامه به معرفی مدل‌های مورد بررسی پرداخته می‌شود.

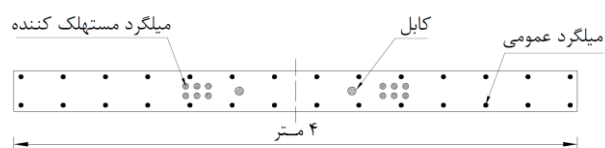
### معرفی مدل‌ها

برای بررسی رفتار لرزه‌ای سیستم پیشنهادی دیوار بتنی پس کشیده مرکزگرا دارای میراگر اصطکاکی (Friction-based dissipative devices)، سیستم مذکور با سیستم دیوار بتنی پس کشیده مرکزگرا دارای میلگردهای مستهلک کننده (Energy dissipators bars) و سیستم دیوار برشی بتنی معمولی، به عنوان سیستم‌های برابر جانبی به همراه قاب ساده فولادی به صورت ساختمان‌های سه، شش و ده طبقه مورد مقایسه قرار می‌گیرند. در ادامه مشخصات این سازه‌ها و نحوه نسبت به آن‌ها بیان می‌شود.

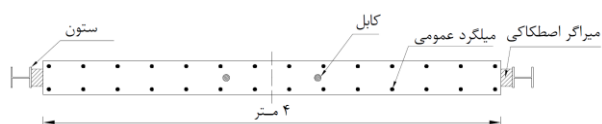
**مشخصات سازه‌های مورد بررسی.** بارگذاری سازه‌های مورد بررسی بر اساس کاربری مسکونی و مطابق آیین‌نامه ASCE7 [21] و طراحی مقاطع تیر و ستون مطابق آیین‌نامه AISC [22]

محوری دیوار به کمتر از ۱۰ درصد ظرفیت محوری دیوار باعث بهبود رفتار دیوار و کاهش خسارت آن می‌شود [10]. در سال ۲۰۱۷ پژوهشی بر روی دیوار بتنی مرکزگرای دارای میراگر اصطکاکی توسط گنو و همکاران صورت گرفت. بر اساس تحلیل‌های دینامیکی صورت گرفته، سیستم پیشنهادی عملکرد لرزه‌ای بهتری نسبت به دیوار بتنی مرکزگرای ترکیبی داشته و ظرفیت تغییر شکل بالاتر و جابه‌جایی جانبی نسبی پسماند کمتری دارد [11]. شاه‌پوری و تسنیمی [12] دو نمونه دیوار برشی پیش ساخته‌ی ترکیبی مرکزگرا رو مورد آزمایش قرار دادند و نتایج آزمایشگاهی رو با مدل‌های اجزا محدود مورد مقایسه قرار دادند که نتایج به دست آمده از مدل‌های عددی، تطبیق بسیار خوبی با نتایج آزمایشگاهی داشته است. وانگ و ژو دیوارهای بتنی دارای میله‌های آلیاژی حافظه دار شکلی را مورد بررسی قرار دادند. بر اساس این مطالعه، دیوارهای بتنی دارای میله‌های SMA دارای خواص سیستم مرکزگرا و دارای ظرفیت جذب انرژی مناسبی هستند [13]. گنو و همکاران [14] در سال ۲۰۱۸ دیوار بتنی پس کشیده دارای میراگرهای اصطکاکی در میانه دیوار را مورد آزمایش و بررسی قرار دادند. آن‌ها همچنین برای جلوگیری از خرد شدن بتن پای دیوار از غلاف‌های فولادی استفاده نمودند. همچنین میراگر فولادی S شکل پیشنهاد و مورد مطالعه عددی و آزمایشگاهی قرار گرفت. نتایج این پژوهش نشان می‌دهد رفتار چرخه‌ای این میراگرها پایدار و جذب انرژی مناسبی دارند [15]. شیرین کام و رزاقی [16] نیز میراگر قوطی شکل را مورد بررسی قرار دادند. نتایج پژوهش شکل پذیری بالای نمونه‌های مورد بررسی را در کشش و فشار نشان می‌دهد. ژیاوو و همکاران [17] دیوار برشی مرکزگرا دارای دیسک‌های فنری در پای دیوار بتنی را پیشنهاد دادند. سیستم پیشنهادی باعث کاهش خسارت به دیوار برشی بتنی و کاهش جابه‌جایی نسبی باقی مانده می‌شود. دوو و همکاران [19] میراگر اصطکاکی در پای دیوار بتنی مرکزگرا را مورد بررسی قرار دادند. در این پژوهش تأثیر عواملی همچون ضخامت ورق اتصال میراگر، قطر بولت‌های میراگر و مقدار نیروی اصطکاک میراگر بر عملکرد لرزه‌ای سیستم مورد بررسی قرار گرفت. در پژوهش صورت گرفته توسط حیرانی مقدم و شوشتری [20] رفتار غیرخطی مدل عددی دیوار بتنی پس کشیده مرکزگرا دارای میراگر تسلیمی شکاف دار مورد بررسی قرار گرفت. بر اساس نتایج این مطالعه سیستم مورد نظر افت مقاومت

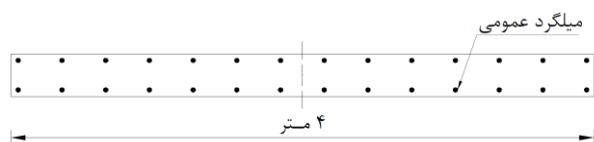
گهواره‌ای می‌باشد. سطح مقطع دیوار بتنی معمولی نیز مطابق شکل (۴) می‌باشد.



شکل ۲ سطح مقطع دیوار بتنی پس‌کشیده مرکزگرا دارای میلگردهای مستهلک‌کننده

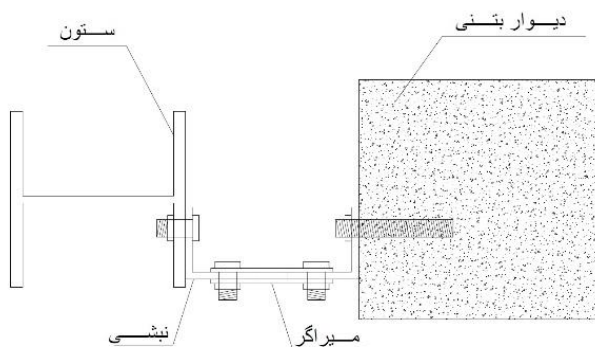


شکل ۳ سطح مقطع دیوار بتنی پس‌کشیده مرکزگرا دارای میراگر اصطکاکی



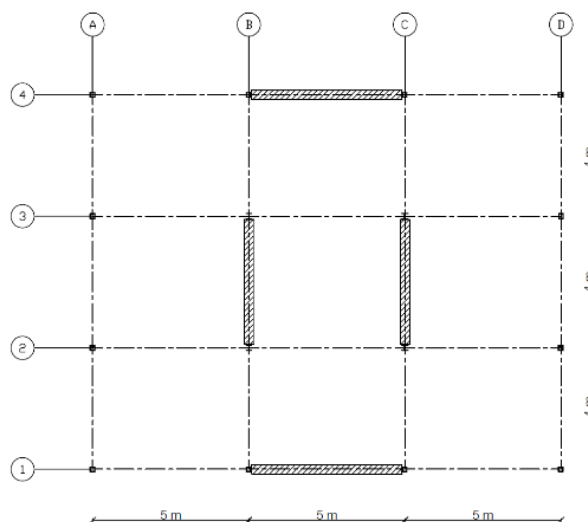
شکل ۴ سطح مقطع دیوار برشی بتنی

کابل‌های دیوار بتنی پس‌کشیده درون داکت‌هایی با قطر بزرگتر از قطر کابل که درون دیوار تعبیه شده‌است قرار می‌گیرد. ابتدا و انتهای کابل در فونداسیون و تراز بالای دیوار مهار می‌شود. هم‌چنین میلگردهای دیوار به درون فونداسیون متصل نمی‌باشد و بتن‌ریزی دیوار مجزا از فونداسیون صورت می‌گیرد تا امکان بلند شدن دیوار در برابر بارهای جانبی فراهم گردد. در شکل (۵) نحوه اتصال میراگر اصطکاکی در سیستم پیشنهادی نمایش داده می‌شود.



شکل ۵ نحوه اتصال میراگر اصطکاکی در سیستم پیشنهادی

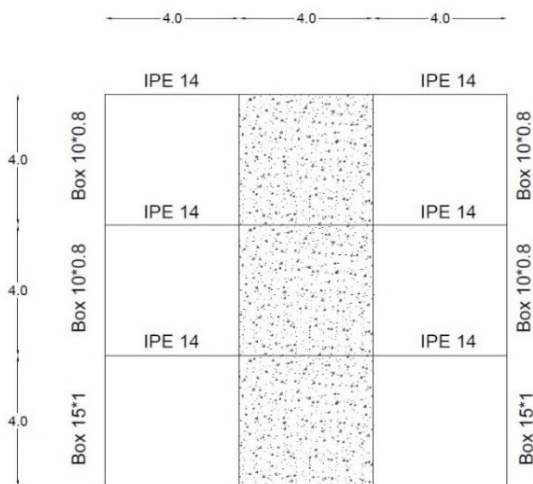
صورت گرفته‌است. هم‌چنین طراحی لرزه‌ای سازه‌ها (طراحی دیوار برشی به‌عنوان سیستم باربر جانبی) بر اساس گروه طراحی لرزه‌ای D انجام شده‌است [21]. پلان ساختمان‌های مورد بررسی مطابق شکل (۱) می‌باشد. ارتفاع طبقات در کلیه سازه‌ها ۴ متر است. هم‌چنین برای طراحی دیوار برشی پس‌کشیده مرکزگرا و محاسبه سطح مقطع کابل‌ها و میلگردهای مستهلک‌کننده از روش معرفی شده در پژوهش یانگ و لو [23] استفاده شده‌است.



شکل ۱ پلان سازه‌های مورد بررسی

برای مقایسه رفتار سه نوع سیستم مذکور قاب B در نرم‌افزار OpenSees [24] نسبت به شده‌است. موقعیت قرارگیری کابل‌ها، میلگردهای مستهلک‌کننده پای دیوار و میلگردهای عمومی دیوار بتنی پس‌کشیده مرکزگرا دارای میلگردهای مستهلک‌کننده نیز در شکل (۲) نمایش داده شده‌است. کابل‌ها و میلگردهای مستهلک‌کننده در مقطع دیوار بتنی پس‌کشیده در محدوده توصیه شده یانگ و لو [23] قرار داده شده‌است. سطح مقطع دیوار بتنی پس‌کشیده مرکزگرا دارای میراگر اصطکاکی مشابه شکل (۳) بوده که در دو سمت دیوار ستون فولادی قرار دارد و در هر طبقه میان دیوار بتنی پس‌کشیده و ستون‌ها از چهار عدد میراگر اصطکاکی در فواصل مساوی با یکدیگر استفاده می‌شود. در این سیستم نسبت به سیستم دیوار بتنی پس‌کشیده مرکزگرا دارای میلگردهای مستهلک‌کننده، میلگردهای مستهلک‌کننده در پای دیوار حذف شده‌است. شایان ذکر است در این دو سیستم اتصال دیوار به پی به نحوی می‌باشد که دیوار تحت اثر بارهای جانبی دارای حرکت

در قاب‌های سه، شش و ده طبقه مشخصات دیوارهای مورد بررسی هم‌چون مقاومت بتن، ضخامت دیوار و میلگردهای عمومی دیوار در جدول (۱) و مشخصات تیر و ستون قاب‌های ساده مجاور دیوار در جدول (۲) بیان شده‌است. هم‌چنین در جدول (۳) سطح مقطع کابل‌ها و میلگردهای مستهلک‌کننده دیوار بتنی پس‌کشیده مرکزگرا دارای میلگردهای مستهلک‌کننده مشخص شده‌است. ذکر این نکته ضروری است، برای انجام مقایسه بهتر رفتار لرزه‌ای میان سه سیستم مذکور، ضخامت و میلگردهای عمومی دیوار، مقاومت بتن و مشخصات قاب‌ها در این سه سیستم یکسان در نظر گرفته شده‌است. قاب سه طبقه دارای دیوار برشی بتنی به‌عنوان نمونه در شکل (۶) نمایش داده شده‌است.



شکل ۶ قاب سه طبقه دارای دیوار برشی بتنی

شایان ذکر است سطح مقطع کابل‌ها در دیوارهای بتنی پس‌کشیده مرکزگرا دارای میراگر اصطکاکی مطابق مشخصات جدول (۳) است که در این سیستم میلگردهای مستهلک‌کننده حذف و برای جذب انرژی از میراگرهای اصطکاکی در دو سمت دیوار در فواصل ۱ متری (در راستای ارتفاع دیوار) استفاده شده‌است. میراگرهای اصطکاکی مورد استفاده در این مطالعه میراگر شماره L29 پژوهش دال‌لاگو و همکاران [25] می‌باشد. این میراگر مطابق شکل (۷) از دو نبشی فولادی و صفحات ۲ و ۵ میلی‌متری فولادی تشکیل شده‌است. رفتار چرخه‌ای این میراگر در شکل (۸) نمایش داده شده‌است.

جدول ۱ مشخصات دیوارها و آرماتورگذاری آن

مدل	شماره طبقه	میلگرد عمومی	ضخامت دیوار (متر)	مقاومت بتن دیوار (مگاپاسکال)
سه طبقه	۲،۳	$\phi 12@30$	۰،۲۵	۲۰
	۱	$\phi 16@30$		
شش طبقه	۶	$\phi 12@30$	۰،۳۵	۳۰
	۵	$\phi 16@30$		
	۳،۴	$\phi 22@30$		
	۲	$\phi 25@30$		
ده طبقه	۱۰	$\phi 12@30$	۰،۴۵	۴۵
	۹	$\phi 16@30$		
	۷،۸	$\phi 22@30$		
	۶	$\phi 25@30$		
	۴،۵	$\phi 28@30$		
	۱،۲،۳	$\phi 32@30$		

جدول ۲ مشخصات ستون‌ها و تیرهای قاب‌های مجاور

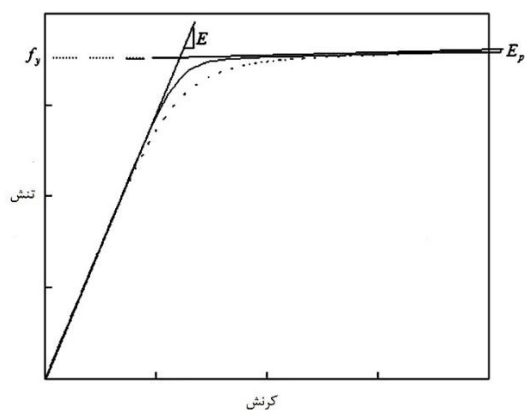
مدل	شماره طبقه	مقطع ستون	مقطع تیر
سه طبقه	۲،۳	Box 10×0.8	IPE 14
	۱	Box 15×1	
شش طبقه	۵،۶	Box 10×0.8	IPE 14
	۴	Box 15×1	
	۳	Box 25×1.5	
	۱،۲	Box 30×2	
ده طبقه	۹،۱۰	Box 10×0.8	IPE 14
	۸	Box 15×1	
	۷	Box 20×1	
	۶	Box 25×1.5	
	۵	Box 30×2	
	۴	Box 35×2.5	
	۳	Box 40×3	
	۱،۲	Box 45×3.5	

جدول ۳ سطح مقطع مجموع کابل‌ها و میلگردهای مستهلک‌کننده دیوار پس‌کشیده دارای میلگردهای مستهلک‌کننده

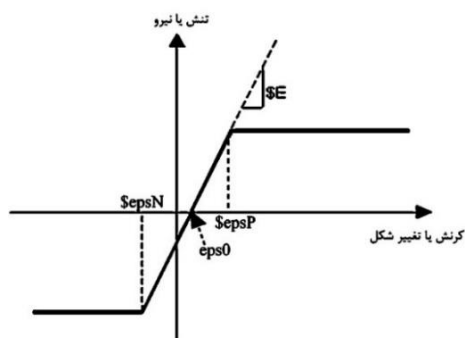
مدل	مساحت کابل (سانتی متر مربع)	مساحت میلگردهای مستهلک‌کننده (سانتی متر مربع)
سه طبقه	۸	۴۹/۲
شش طبقه	۱۶	۹۸/۴
ده طبقه	۳۰	۱۷۲/۲

(InitStrainMaterial) به مصالح الاستوپلاستیک کامل افزوده شده‌است.

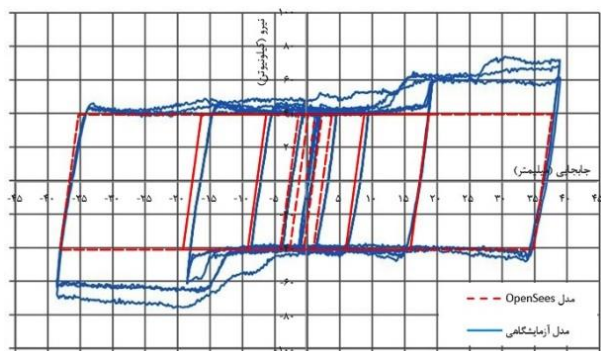
نسبت به رفتار چرخه‌ای میراگر اصطکاکی پژوهش دال لاگو و همکاران [25] نیز با استفاده از مصالح Steel01 و تعریف المان twoNodeLink در نرم‌افزار OpenSees مطابق شکل (۱۱) انجام شده‌است. هم‌چنین برای در نظر گرفتن شکست میراگر در جابه‌جایی نسبی بالاتر از ۴۰ میلی‌متر مصالح MinMax به رفتار میراگر فوق‌الذکر افزوده شده‌است.



شکل ۹ مصالح Steel02 در نرم‌افزار OpenSees [۲۴]

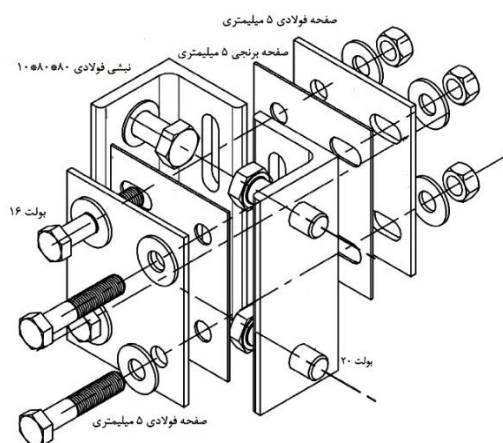


شکل ۱۰ مصالح uniaxialMaterialElasticPP در نرم‌افزار OpenSees [24]

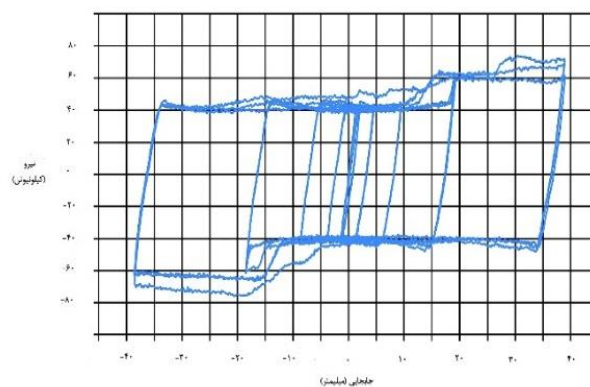


شکل ۱۱ نسبت به رفتار چرخه‌ای میراگر اصطکاکی پژوهش دال لاگو و همکاران [24] در نرم‌افزار OpenSees

مشخصات مدل‌های OpenSees در این مطالعه برای نسبت به سه سیستم مذکور به صورت قاب‌های سه، شش و ده طبقه از نرم‌افزار OpenSees استفاده شده‌است [24]. در این مدل‌ها المان ShellINLTKGQ برای نسبت به دیوار بتنی بکار رفته‌است. هم‌چنین برای نسبت به کابل‌ها و میلگردهای مستهلک‌کننده از المان corotTruss و نسبت به تیرها و ستون‌ها از المان nonlinearBeamColumn استفاده شده‌است.



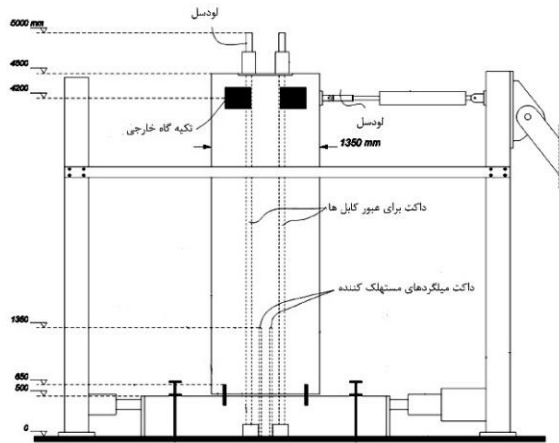
شکل ۷ میراگر اصطکاکی پژوهش دال لاگو و همکاران [۲۵]



شکل ۸ رفتار چرخه‌ای میراگر اصطکاکی پژوهش دال لاگو و همکاران [25]

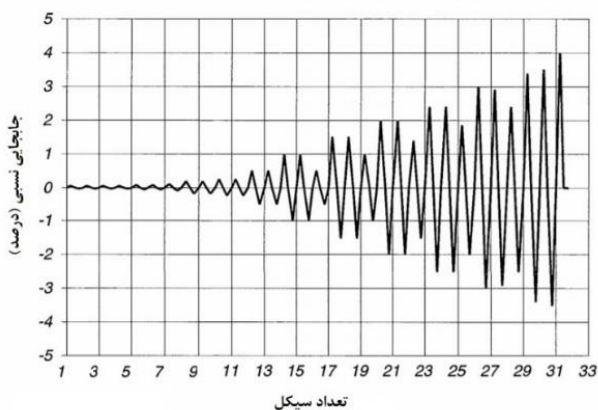
در مدل‌های مورد بررسی، رفتار مصالح بتنی با استفاده از مصالح PlaneStressUserMaterial به همراه PlateFromPlaneStress معرفی شده در تحقیق لو و همکاران در نظر گرفته شده‌است [26]. هم‌چنین مصالح Steel02 برای نسبت به رفتار فولاد تیر، ستون و میلگردهای موجود در دیوار استفاده شده‌است (شکل ۹). برای نسبت به رفتار کابل درون دیوار نیز از مصالح الاستوپلاستیک کامل (uniaxialMaterialElasticPP) استفاده شده‌است که تنها رفتار کششی آن در نظر گرفته شده‌است (شکل ۱۰). هم‌چنین برای در نظر گرفتن تنش اولیه کابل، مصالح کرنش اولیه





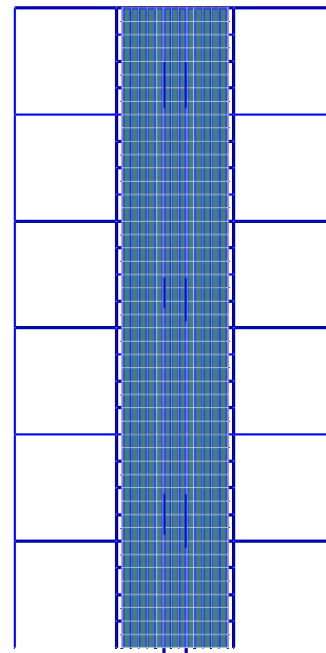
شکل ۱۳. برپایی آزمایش رستریو و رحمان [27]

برای نسبت به دیوار بتنی پس کشیده مرکزگرا در نرم-افزار OpenSees از مصالح بتنی `PlaneStressUserMaterial` به همراه `PlateFromPlaneStress` مطابق با مشخصات معرفی شده در آزمایش استفاده شده است. المان پوسته استفاده شده در نسبت به دیوار نیز از نوع `ShellNLDKGQ` می باشد. هم چنین مصالح `Steel02` به عنوان مصالح فولادی میلگردهای طولی و میلگردهای مستهلک کننده بکار رفته در دیوار بتنی پس کشیده در نظر گرفته شده است. برای نسبت به کابل درون دیوار از مصالح الاستوپلاستیک کامل (`uniaxialMaterialElasticPP`) به همراه مصالح کرنش اولیه (`InitStrainMaterial`) استفاده شده است. هم چنین برای لحاظ کردن رفتار گهواره ای دیوار از المان های `zeroLength` در زیر دیوار استفاده شده است. پس از نسبت به دیوار بتنی پس کشیده مرکزگرا مورد نظر، بارگذاری رفت و برگشتی معرفی شده در گزارش رستریو و رحمان [28] مطابق شکل (۱۴) به دیوار اعمال شده است.



شکل ۱۴. بارگذاری اعمالی پژوهش رستریو و رحمان [۲۸]

در ادامه به عنوان نمونه مدل عددی ساختمان ۶ طبقه با سیستم دیوار بتنی پس کشیده مرکزگرا دارای میراگر اصطکاکی در نرم افزار OpenSees در شکل (۱۲) نمایش داده شده است. در مدل های عددی مربوط به سیستم دیوار بتنی پس کشیده، برای ایجاد رفتار مرکزگرا، المان های کابل درون دیوار در پای دیوار به صورت گیردار در نظر گرفته شده است. هم چنین اجازه بلند شدن از تکیه گاه و ایجاد حرکت گهواره ای به المان دیوار داده شده است.



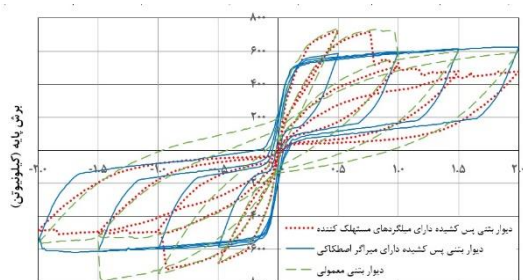
شکل ۱۲. مدل عددی ساختمان ۶ طبقه با سیستم دیوار بتنی پس کشیده مرکزگرا دارای میراگر اصطکاکی

### صحت سنجی

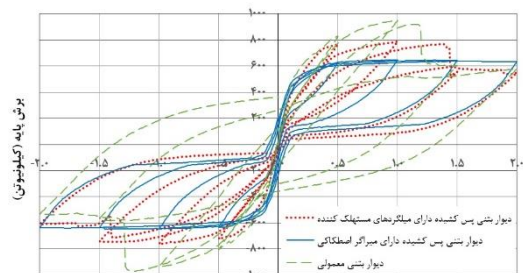
برای بررسی صحت نسبت به دیوار بتنی پس کشیده مرکزگرا در نرم افزار OpenSees از نتایج آزمایش دیوار شماره سه پژوهش رستریو و رحمان استفاده شده است [27]. دیوار مورد مطالعه دارای طول ۱۳۵۰ میلی متر، ارتفاع ۴۰۰۰ میلی متر و ضخامت ۱۲۵ میلی متر می باشد. هم چنین مقاومت بتن مورد استفاده برابر با ۳۱ مگاپاسکال، تنش کششی حداکثر کابل ها ۱۸۳۶ مگاپاسکال، تنش جاری شدن میلگردهای فولادی دیوار ۴۳۰ مگاپاسکال و تنش جاری شدن میلگردهای مستهلک کننده ۶۶۰ مگاپاسکال است.

مستهلک‌کننده، دیوار بتنی پس‌کشیده مرکزگرا دارای میراگر اصطکاکی و دیوار بتنی معمولی تحت اثر بارگذاری چرخه‌ای و تحلیل تاریخچه‌زمانی قرار می‌گیرند.

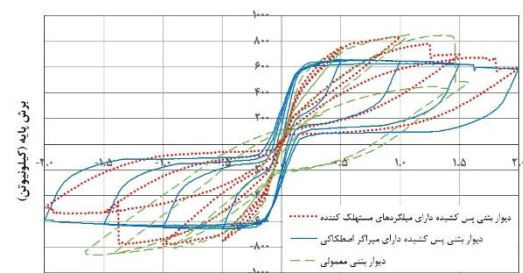
در ابتدا سازه‌های مورد بررسی تحت اثر بارگذاری چرخه‌ای برای جابه‌جایی‌های بام معادل ۰/۵، ۱، ۱/۵ و ۲ درصد ارتفاع سازه قرار می‌گیرند. در شکل (۱۷) پاسخ برش پایه کل در برابر جابه‌جایی نسبی بام به‌دست آمده برای سازه‌های سه، شش و ده طبقه نمایش داده می‌شود.



شکل ۱۵ (الف) سازه سه طبقه



شکل ۱۶ (ب) سازه شش طبقه

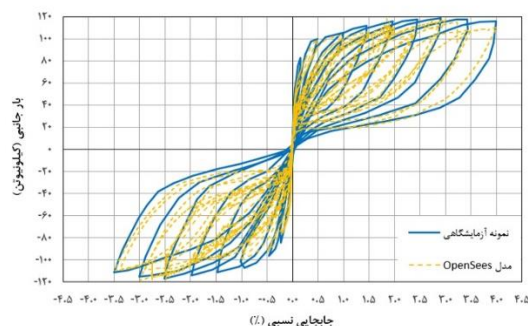


شکل ۱۷ (پ) سازه ده طبقه

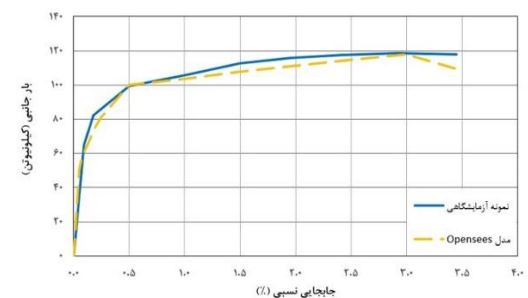
شکل ۱۷ برش پایه در برابر جابه‌جایی نسبی بام در مدل‌های مورد بررسی تحت اثر بارگذاری چرخه‌ای

مقدار مقاومت نهایی سیستم دیوار بتنی پس‌کشیده مرکزگرا دارای میلگردهای مستهلک‌کننده و دیوار برشی بتنی معمولی در دو چرخه اول نسبت به سیستم دیوار بتنی پس‌کشیده مرکزگرا

در ادامه نمودار برش پایه در مقابل جابه‌جایی نسبی دیوار بتنی مرکزگرا آزمایش شده تحت اثر بارگذاری رفت و برگشتی با نتایج مدل OpenSees مورد مقایسه قرار می‌گیرد (شکل ۱۵). همچنین در شکل (۱۶) نمودار مقادیر حداکثر برش پایه و جابه‌جایی جانبی نسبی تحت اثر بارگذاری رفت و برگشتی دیوار بتنی مرکزگرا مورد آزمایش و مدل OpenSees نمایش داده شده است.



شکل ۱۸ مقادیر حداکثر برش پایه در مقابل جابه‌جایی نسبی نمونه آزمایشگاهی و مدل عددی

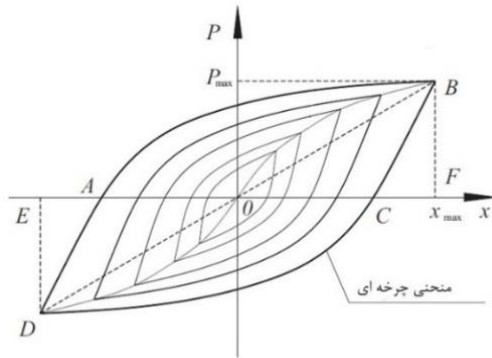


شکل ۱۹ مقادیر حداکثر برش پایه در مقابل جابه‌جایی نسبی نمونه آزمایشگاهی و مدل عددی

همچنین مقادیر انرژی جذب شده نمونه آزمایشگاهی و مدل عددی به ترتیب برابر با ۸۳۳۵ و ۷۴۷۸ کیلوژول می‌باشد. به عبارت دیگر مقدار انرژی جذب شده مدل OpenSees ۸۹ درصد نمونه آزمایشگاهی است. بررسی نتایج به‌دست آمده از نمودارها و مقادیر فوق، دقت قابل قبول نسبت به دیوار بتنی پس‌کشیده مرکزگرا در نرم‌افزار OpenSees را نشان می‌دهد.

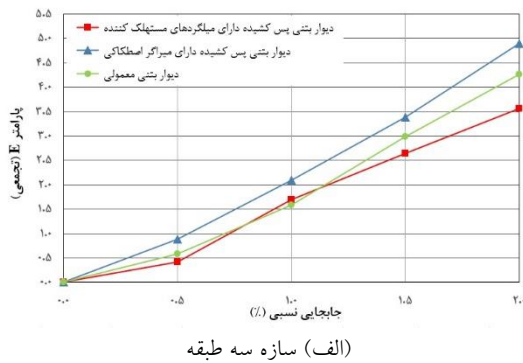
## بررسی نتایج

در این پژوهش مدل‌های معرفی شده سه، شش و ده طبقه سیستم دیوار بتنی پس‌کشیده مرکزگرا دارای میلگردهای

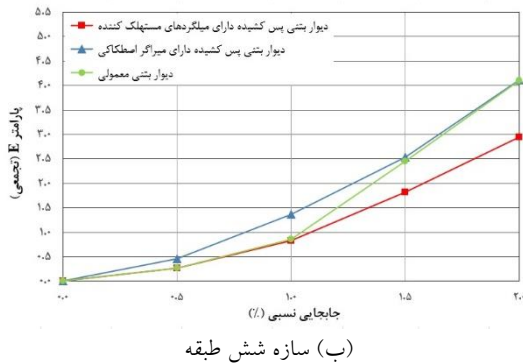


شکل ۱۸ منحنی‌های چرخه‌ای [29]

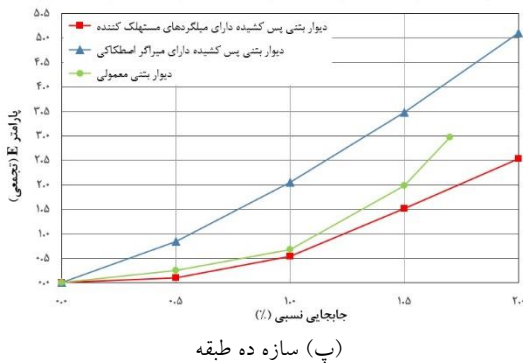
در ادامه برای مقایسه استهلاک انرژی در بارگذاری‌های چرخه‌ای مقادیر ضریب جذب انرژی به دست آمده برای مدل‌های مورد بررسی به صورت تجمعی برای جابه‌جایی‌های جانبی نسبی ۰/۵، ۱، ۱/۵ و ۲ درصد نمایش داده می‌شود.



(الف) سازه سه طبقه



(ب) سازه شش طبقه



(پ) سازه ده طبقه

شکل ۱۹ مقادیر ضریب جذب انرژی مدل‌های مورد بررسی به صورت تجمعی

دارای میراگر اصطکاکی بیشتر بوده، در حالی که در چرخه‌های بعدی این مقدار در سیستم دیوار بتنی پس کشیده مرکزگرا دارای میراگر اصطکاکی نسبت به دو سیستم دیگر بیشتر است. بر اساس نمودارهای فوق، سیستم دیوار بتنی پس کشیده مرکزگرا دارای میلگردهای مستهلک کننده و دیوار بتنی معمولی پس از حدود جابه‌جایی جانبی نسبی ۱ درصد دچار افت مقاومت می‌شوند. همچنین مقاومت نهایی متناسب با ۲ درصد جابه‌جایی نسبی در سیستم دیوار بتنی پس کشیده مرکزگرا دارای میراگر اصطکاکی از دو سیستم دیگر بیشتر است. در ادامه در جدول (۴) مقادیر جابه‌جایی نسبی باقی مانده نمونه‌های عددی مورد مطالعه در انتهای بارگذاری چرخه‌ای اعمالی نشان داده می‌شود.

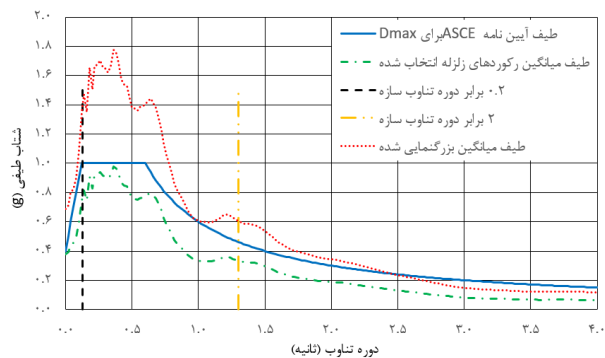
جدول ۴ جابه‌جایی نسبی باقی مانده نمونه‌های عددی تحت اثر بارگذاری

چرخه‌ای			
سیستم مورد مطالعه	سه طبقه	شش طبقه	ده طبقه
دیوار پس کشیده مرکزگرا دارای میلگردهای مستهلک کننده	۰/۰۴	۰/۰۳	۰/۰۳
دیوار پس کشیده مرکزگرا دارای میراگر اصطکاکی	۰/۱۸	۰/۰۸	۰/۱۱
دیوار برشی بتنی معمولی	۰،۹۷	۱/۳۷	۰/۳۳

بر اساس نتایج فوق سیستم دیوار بتنی پس کشیده دارای میلگردهای مستهلک کننده و دیوار بتنی پس کشیده مرکزگرا دارای میراگر اصطکاکی دارای رفتار مرکزگرا بوده و جابه‌جایی نسبی کمتری نسبت به سیستم دیوار برشی بتنی دارند. برای بررسی مقدار انرژی جذب شده در بارگذاری‌های چرخه‌ای اعمال شده نیز از ضریب جذب انرژی (E) معرفی شده در پژوهش لو و همکاران [۲۹] مطابق رابطه (۱) استفاده می‌شود.

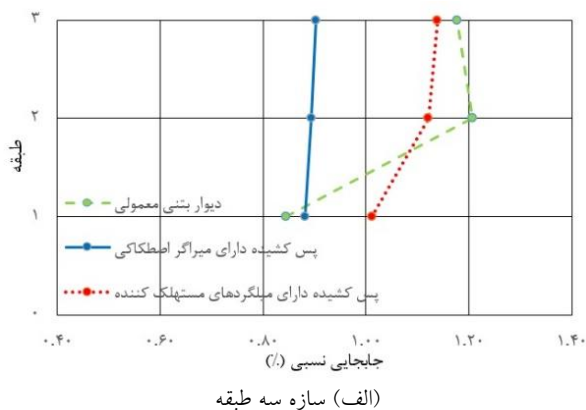
$$E = \frac{S_{ABC} + S_{CDA}}{S_{OBF} + S_{ODE}} \quad (1)$$

در این رابطه مطابق شکل (۱۸)  $S_{ABC}$  و  $S_{CDA}$  مساحت محصور بین منحنی‌های چرخه‌ای با محور x و  $S_{ODE}$  و  $S_{OBF}$  مساحت مثلث‌های ODE و OBF است.



شکل ۲۰ طیف آیین نامه ASCE برای شرایط خاک D در برابر طیف میانگین زلزله انتخاب شده و طیف میانگین بزرگنمایی شده برای سازه شش طبقه

سپس برای سازه‌های سه، شش و ده طبقه با توجه به دوره تناوب اصلی سازه، طیف میانگین رکوردهای زلزله به نحوی مقیاس می‌شود که طیف میانگین در بازه ۰/۲ تا ۲ برابر دوره تناوب اصلی سازه بالاتر از طیف آیین‌نامه قرار گیرد. حال با داشتن این ضریب برای سازه‌های سه، شش و ده طبقه رکوردهای زلزله مقیاس شده به سازه‌ها اعمال می‌شوند [21]. با توجه به این نکته ضرایب بزرگنمایی رکوردهای زلزله برای سازه‌های سه طبقه، شش طبقه و ده طبقه به ترتیب برابر با ۱،۶۱، ۱،۸۱ و ۱،۸۱ به‌دست آمده‌است. پس از اعمال این رکوردها به سازه‌های سه، شش و ده طبقه، جابه‌جایی نسبی حداکثر هر طبقه ثبت می‌شود. میانگین مقادیر به‌دست آمده برای هفت رکورد زلزله برای سه سیستم دیوار بتنی پس‌کشیده مرکزگرا دارای میلگردهای مستهلک‌کننده، دیوار بتنی پس‌کشیده مرکزگرا دارای میراگر اصطکاکی و دیوار برشی بتنی معمولی در شکل (۲۱) نشان داده شده‌است.



(الف) سازه سه طبقه

مطابق نتایج به‌دست آمده ضریب جذب انرژی تجمعی در چرخه‌های اول و دوم سیستم دیوار بتنی پس‌کشیده مرکزگرا دارای میراگر اصطکاکی در سازه‌های سه، شش و ده طبقه دارای مقادیر بالاتری نسبت به دو سیستم دیگر می‌باشد. در سازه شش طبقه در چرخه سوم و چهارم مقدار ضریب جذب انرژی تجمعی در سیستم‌های دیوار بتنی پس‌کشیده مرکزگرا دارای میراگر اصطکاکی و دیوار برشی بتنی معمولی تقریباً مساوی ولی بیشتر از ضریب جذب انرژی در سیستم دیوار بتنی پس‌کشیده مرکزگرا دارای میلگردهای مستهلک‌کننده می‌باشد. در سازه سه و ده طبقه ضریب جذب انرژی تجمعی در چرخه‌های سوم و چهارم سیستم دیوار بتنی پس‌کشیده مرکزگرا دارای میراگر اصطکاکی مقادیر بالاتری نسبت به دیوار برشی بتنی معمولی و سیستم دیوار برشی بتنی معمولی دارای مقادیر بیشتری نسبت به سیستم دیوار بتنی پس‌کشیده مرکزگرا دارای میلگردهای مستهلک‌کننده می‌باشد. در ادامه به بررسی نتایج سازه‌های نسبت به شده تحت اثر تحلیل تاریخچه پاسخ می‌پردازیم. برای انجام این تحلیل از هفت رکورد معرفی شده در جدول (۵) استفاده شده‌است. رکوردهای زلزله از نوع دور از گسل و شرایط خاک D از آیین‌نامه FEMA-P695 انتخاب شده‌است [30].

جدول ۵ مشخصات رکوردهای زلزله انتخاب شده دور از گسل و شرایط

خاک D [30]

رکورد زلزله	ایستگاه رکورد	بزرگا	سال	PGA حداکثر (g)	PGV حداکثر (cm/s)
Northridge	Canyon Country	۶/۷	۱۹۹۴	۰/۴۸	۴۵
Imperial Valley	Elcentro Array	۶/۵	۱۹۷۹	۰/۳۸	۴۲
Kobe	Nishi-Akashi	۶/۹	۱۹۹۵	۰/۵۱	۳۷
Kocaeli	Duzce	۷/۵	۱۹۹۹	۰/۳۶	۵۹
LomaPrieta	Capitola	۶/۹	۱۹۸۹	۰/۵۳	۳۵
SuperStitions Hills	El Centro Imp. Co.	۶/۵	۱۹۸۷	۰/۳۶	۴۶
SanFernando	LA Hollywood	۶/۶	۱۹۷۱	۰/۲۱	۱۹

برای مقیاس کردن رکوردهای زلزله انتخاب شده ابتدا طیف آیین‌نامه ASCE برای شرایط لرزه‌ای  $D_{max}$  رسم می‌شود. سپس طیف رکوردهای زلزله انتخاب شده را بدست آورده و میانگین آن‌ها مطابق شکل (۲۰) نمایش داده می‌شود.

جانبی نسبی حداکثر کمتری نسبت به سیستم دیوار بتنی پس- کشیده دارای میلگردهای مستهلک کننده و دیوار برشی بتنی معمولی دارد. در ادامه در جدول (۶) مقادیر میانگین برش پایه حداکثر تحت اثر هفت رکورد زلزله اعمالی برای سیستم های مختلف نمایش داده می شود.

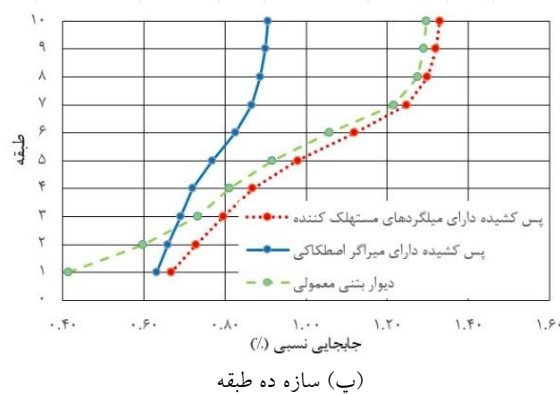
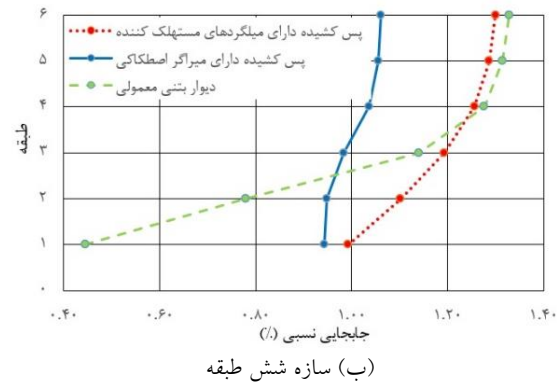
جدول ۶ مقادیر میانگین برش پایه حداکثر سازه های نسبت به شده تحت اثر زلزله های اعمالی

میانگین برش پایه حداکثر (کیلو نیوتن)			سیستم نسبت به شده
ده طبقه	شش طبقه	سه طبقه	
۲۷۲۸/۸۳	۱۷۰۷/۵۹	۸۴۵/۹۹	دیوار بتنی پس کشیده دارای میلگردهای مستهلک کننده
۲۲۰۸/۶۷	۱۶۷۹/۳۷	۸۳۱/۲۱	دیوار بتنی پس کشیده دارای میراگر اصطکاکی
۲۴۲۹/۸۹	۱۸۰۱/۰۱	۸۷۲/۵۵	دیوار بتنی معمولی

مطابق نتایج جدول بالا مقادیر میانگین برش پایه حداکثر در سازه های سه، شش و ده طبقه دارای سیستم دیوار بتنی پس کشیده دارای میراگر اصطکاکی کمتر از سایر سیستم ها می باشد. همچنین برش پایه میانگین دیوار بتنی پس کشیده دارای میلگردهای مستهلک کننده در سازه های سه و شش طبقه کمتر از سیستم دیوار بتنی معمولی و در سازه ده طبقه بیشتر از سیستم دیوار بتنی معمولی است. با توجه به یکسان بودن جرم طبقات در مدل های مورد بررسی، شتاب میانگین در طبقات سازه های دارای سیستم دیوار بتنی پس کشیده دارای میراگر اصطکاکی نسبت به سایر سیستم های کمتر می باشد.

### نتیجه گیری

در این مطالعه رفتار لرزه ای سیستم دیوار بتنی پس کشیده مرکزگرا دارای میراگر اصطکاکی با دو سیستم دیوار بتنی پس کشیده مرکزگرا دارای میلگردهای مستهلک کننده و دیوار برشی بتنی معمولی مقایسه شده است. برای این منظور سه سیستم مذکور به صورت قاب های سه، شش و ده طبقه در نرم افزار OpenSees نسبت به شدند و تحت اثر بارگذاری چرخه ای و تحلیل تاریخچه پاسخ قرار گرفتند.



شکل ۲۱ میانگین جابه جایی جانبی نسبی حداکثر طبقات تحت اثر زلزله های اعمالی در سازه های نسبت به شده

مطابق نتایج به دست آمده در سازه سه طبقه مقدار میانگین جابه جایی جانبی نسبی حداکثر سیستم دیوار بتنی پس کشیده دارای میراگر اصطکاکی و دیوار برشی بتنی معمولی در طبقه اول تقریباً برابر (۰/۸۵ درصد) و کمتر از سیستم دیوار بتنی پس کشیده دارای میلگردهای مستهلک کننده می باشد. در طبقات دوم و سوم این مقدار برای دیوار برشی بتنی معمولی و سیستم دیوار بتنی پس کشیده دارای میلگردهای مستهلک کننده با یکدیگر تقریباً مساوی (بین ۱/۱ تا ۱/۲ درصد) ولی بیشتر از سیستم دیوار بتنی پس کشیده دارای میراگر اصطکاکی است.

در سازه شش طبقه مقدار میانگین جابه جایی جانبی نسبی حداکثر در طبقات پایین (اول و دوم) برای سیستم دیوار برشی بتنی معمولی کمتر از دو سیستم دیگر بوده، در حالی که در طبقات بالاتر (سوم تا ششم) سیستم دیوار بتنی پس کشیده دارای میراگر اصطکاکی مقادیر کمتری نسبت به دو سیستم دیگر دارد.

در سازه ده طبقه نیز در طبقات اول و دوم در سیستم دیوار برشی بتنی معمولی مقدار میانگین جابه جایی جانبی نسبی حداکثر کمتر از دو سیستم دیگر است. از طبقه سوم تا دهم سیستم دیوار بتنی پس کشیده دارای میراگر اصطکاکی مقادیر میانگین جابه جایی

بازه تغییرات این مقدار برای سیستم دیوار بتنی پس‌کشیده دارای میراگر اصطکاکی از ۰/۸۷ تا ۰/۹۰ درصد بوده، در حالی که این بازه برای سیستم‌های دیوار بتنی پس‌کشیده دارای میلگردهای مستهلک‌کننده و دیوار برشی بتنی به ترتیب ۱/۰۱ تا ۱/۱۴ درصد و ۰/۸۴ تا ۱/۱۸ درصد است. برای سازه شش طبقه سیستم دیوار بتنی پس‌کشیده دارای میراگر اصطکاکی این بازه از ۰/۹۴ تا ۱/۰۶ درصد، سیستم دیوار بتنی پس‌کشیده دارای میلگردهای مستهلک‌کننده از ۰/۹۹ تا ۱/۳۰ درصد و سیستم دیوار برشی بتنی از ۰/۴۴ تا ۱/۳۳ درصد می‌باشد. هم‌چنین در سازه ده طبقه برای سه سیستم دیوار بتنی پس‌کشیده دارای میراگر اصطکاکی، سیستم دیوار بتنی پس‌کشیده دارای میلگردهای مستهلک‌کننده و سیستم دیوار برشی بتنی بازه تغییرات میانگین جابه‌جایی جانبی نسبی حداکثر طبقات به ترتیب از ۰/۶۳ تا ۰/۹۱، از ۰/۶۷ تا ۱/۳۳ و از ۰/۴۱ تا ۱/۳۰ درصد است. هم‌چنین مقادیر میانگین برش پایه حداکثر ناشی از هفت رکورد زلزله دور از گسل و در نتیجه شتاب حداکثر اعمالی در سازه‌های سه، شش و ده طبقه دارای سیستم دیوار بتنی پس‌کشیده دارای میراگر اصطکاکی کمتر از دو سیستم دیگر می‌باشد.

پس از وقوع زلزله، در سیستم دیوار بتنی پس‌کشیده دارای میراگر اصطکاکی نسبت به سیستم دیوار بتنی پس‌کشیده دارای میلگردهای مستهلک‌کننده و سیستم دیوار برشی بتنی، امکان تعویض میراگرهای آسیب‌دیده و استفاده مجدد از این سیستم با کمترین هزینه تعمیر می‌باشد.

بر اساس نتایج حاصله سیستم دیوار بتنی پس‌کشیده مرکزگرا دارای میراگر اصطکاکی برخلاف دو سیستم دیگر دارای افت مقاومت کمتری در چرخه‌های مختلف بارگذاری چرخه‌ای بوده و مقاومت متناسب با دو درصد جابه‌جایی جانبی نسبی آن از دو سیستم دیگر بیشتر می‌باشد. هم‌چنین سیستم‌های دیوار بتنی پس‌کشیده دارای میراگر اصطکاکی و سیستم دیوار بتنی پس‌کشیده دارای میلگردهای مستهلک‌کننده دارای رفتار مرکزگرا بوده و جابه‌جایی جانبی نسبی باقی‌مانده‌ی آن‌ها پس از هر چرخه بارگذاری تقریباً برابر با صفر است.

مطابق نتایج به‌دست آمده از سیستم دیوار بتنی پس‌کشیده مرکزگرا دارای میراگر اصطکاکی برای سازه‌های سه، شش و ده طبقه مقدار ضریب جذب انرژی در مجموع چرخه‌های اعمالی به ترتیب برابر با ۴/۸۹، ۴/۱۲ و ۵/۱۰ می‌باشد. این مقادیر برای سیستم دیوار بتنی پس‌کشیده مرکزگرا دارای میلگردهای مستهلک‌کننده به ترتیب برابر با ۳/۵۶، ۲/۹۴ و ۲/۵۳ و برای سیستم دیوار برشی بتنی معمولی به ترتیب برابر با ۴/۲۶، ۴/۱۰ و ۲/۹۷ است. این مقادیر نشان می‌دهد سیستم دیوار بتنی پس‌کشیده دارای میراگر اصطکاکی در مجموع جذب انرژی بالاتری نسبت به دو سیستم دیگر دارد. هم‌چنین سیستم دیوار برشی بتنی نیز نسبت به سیستم دیوار بتنی پس‌کشیده دارای میلگردهای مستهلک‌کننده جذب انرژی بیشتری در هر سه سازه سه، شش و ده طبقه دارد.

بر اساس نتایج میانگین جابه‌جایی جانبی نسبی حداکثر طبقات ناشی از هفت رکورد زلزله دور از گسل در سازه سه طبقه

## مراجع

1. Priestley, M.J.N. and Tao, J.R.T., "Seismic Response of Precast Prestressed Concrete Frames with Partially Debonded Tendons", *PCI Journal*, Vol. 38(1), pp. 58-69, (1993).
2. Stanton, J., Stone, W. and Cheok, G.S., "A Hybrid Reinforced Precast Frame for Seismic Regions", *PCI Journal*, Vol. 42(2), pp. 20-32, (1997).
3. Stanton, J.F. and Nakaki, S.D., "Design Guidelines for Precast Concrete Structural Systems", *PRESSS Report No. 01/03-09*, (2002).
4. Restrepo, J.I., "New Generation of Earthquake Resisting Systems", *Proceeding of The first FIB Congress, Federation International du Béton*, Osaka-Japan, P. E-268, (2002).
5. Erkmen, B. and Schultz, A. E., "Self-centering behavior of unbonded precast concrete shear walls", *Earthquake Resistant Engineering Structures VI*, Vol. 93, pp. 185-194, (2007).

6. Erkmen, B. and Schultz, A. E., "Self-Centering Behavior of Unbonded Post-Tensioned Precast Concrete Shear Walls", *Journal of Earthquake Engineering*, Vol. 13(7), pp. 1047-1064, (2009).
7. Khanmohammadi, M. and Heydari, S., "Seismic behavior improvement of reinforced concrete shear wall buildings using multiple rocking systems", *Engineering Structures*, Vol. 100, pp. 577–589, (2015).
8. Shahpouri, F. and Tasnimi, A., "Numerical analysis of prefabricated reinforced concrete shear wall with self-centering system", *10<sup>th</sup> international congress on civil engineering, University of tabriz*, (2015) (in persian).
9. Guo, T., Zhang, G. and Chen, Ch., "Experimental Study on Self-Centering Concrete Wall with Distributed Friction Devices", *Journal of Earthquake Engineering*, Vol. 18(2), pp. 214-230, (2014).
10. Henry, R.S., Sritharan, S. and Ingham, J. M., "Finite element analysis of the PreWEC self-centering concrete wall system", *Engineering Structures*, Vol. 115, pp. 28–41, (2016).
11. Guo, T., Xu, Zh., Song, L., Wang, L. and Zhang, Zh., "Seismic Resilience Upgrade of RC Frame Building Using Self-Centering Concrete Walls with Distributed Friction Devices", *Journal of Structural Engineering*, Vol. 143(12), pp. 1–11, (2017).
12. Shahpouri, F. and Tasnimi, A., " Nonlinear numerical analysis of RC precast shear walls with self-centering system", *Sharif Journal of Civil Engineering*, Vol. 34.2, pp. 13–24, (2018) (In Persian).
13. Wang, B. and Zhu, S., "Seismic behavior of self-centering reinforced concrete wall enabled by superelastic shape memory alloy bars", *Bulletin of Earthquake Engineering*, Vol. 16(1), pp. 479–502, (2018).
14. Guo, T., Wang, L., Xu, Zh. and Hao, Y., "Experimental and numerical investigation of jointed self-centering concrete walls with friction connectors", *Engineering Structures*, Vol. 161, pp. 192–206, (2018).
15. Zhai, Zh., Guo, W., Yu, Zh., He, Ch. and Zeng, Zh., "Experimental and numerical study of S-shaped steel plate damper for seismic resilient application", *Engineering Structures*, Vol. 221, pp. 1–17, (2020).
16. Shirinkam, MR. and Razzaghi, J., "Experimental and analytical investigation on the behavior of metallic Box- Shaped Dampers (BSD)", *Structures*, Vol. 23, pp. 766–778, (2020).
17. Xiao, Sh., Xu, L. and Li, Zh., "Development and experimental verification of self-centering shear walls with disc spring devices", *Engineering Structures*, Vol. 213, pp. 1–14, (2020).
18. Xiao, Sh., Xu, L. and Li, Zh., "Design and experimental verification of disc spring devices in self-centering reinforced concrete shear walls", *Structural Control and Health Monitoring*, Vol. 27(7), pp. 1–19, (2020).
19. Du, X., Wang, Zh., Liu, H. and Liu, M., "Research on seismic behavior of precast self-centering concrete walls with dry slip-friction connectors", *Journal of Building Engineering*, Vol. 42, (2021).
20. Heyrani Moghaddam, S. and Shoostari, A., "Nonlinear static and dynamic behaviors assessment of self-centering post-tensioned concrete wall with multiple-slit device", *Journal of Building Engineering*, Vol. 43, (2021).
21. American Society of Civil Engineers (ASCE), "Minimum design loads for buildings and other structures", *ASCE 07*, Reston, VA.
22. American Institute of Steel Construction (AISC), "Specification for Structural Steel Buildings", *AISC 360*.
23. Yang, B. and Lu, X., "Displacement-Based Seismic Design Approach for Prestressed Precast Concrete Shear Walls and its Application", *Journal of Earthquake Engineering*, Vol. 22(10), pp. 1836-1860, (2017).

24. McKenna, F., Fenves, G. and Scott, M., "Open system for earthquake engineering simulation", Berkeley, CA: University of California, <http://opensees.berkeley.edu.>, (2000)
25. Dal Lago, B., Biondini, F. and Toniolo, G., "Friction-based dissipative devices for precast concrete panels", *Engineering Structures*, Vol. 147, pp. 356–371, (2017).
26. Lu, X., Xie, L., Guan, H., Huang, Y. and Lu, X., "A shear wall element for nonlinear seismic analysis of super-tall buildings using OpenSees", *Griffith School of Engineering*, (2015).
27. Restrepo, J. and Rahman, A., "Seismic Performance of Self-Centering Structural Walls Incorporating Energy Dissipators", *Journal of Structural Engineering, ASCE*, Vol. 133(11) pp. 1560-1570, (2007).
28. Rahman, A. and Restrepo, J., "Earthquake Resistant Precast Concrete Buildings: Seismic Performance of Cantilever Walls Prestressed using Unbonded Tendons", *Research Report, University of Canterbury Christchurch*, New Zealand, (2000).
29. Lu, J., Yu, Sh., Xia, J., Qiao, X. and Tang, Y., "Experimental study on the hysteretic behavior of steel plate shear wall with unequal length slits", *Journal of Constructional Steel Research*, Vol. 147, pp. 477–487, (2018).
30. Applied Technology Council "Quantification of Building Seismic Performance Factors - FEMA P695", *Federal Emergency Management Agency (FEMA)*, (2009).