

Optimal locating of Energy Dissipations Effect in Self-Centering Base-Rocking Concrete Shear Walls to Reduce the Higher Modes Effects

Esmaeil Mohammadi Dehcheshmeh

Postdoctoral Researcher, Structural Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran

Vahid Broujerdian*

Associate Professor, Structural Engineering, School of Civil Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran.

Research paper

Abstract

In this research, the placement of energy dissipaters at the base of self-centering base-rocking walls has been investigated. For this purpose, structures with 4-, 8-, 12-, 16- and 20-floors were investigated. The nonlinear dynamic behavior of these structures was investigated subjected to 22 Far-Field (FF), 14 Near-Field without Pulse (NF-non Pulselike), and 14 Near-Field with Pulse (NF-Pulselike) seismic ground-motions. The models have been analyzed in two dimensions via OpenSees software. The considered seismic ground-motions are scaled and applied to the structure at DBE and MCE levels. The results showed that changing the location of energy absorbers can be effective in the value of the moment and shear demands of walls as well as the response of residual drift and roof acceleration. By increasing the distance of the energy dissipaters from the middle of the section wall, the moment and shear demands could be reduced about 14% and 13% at the DBE level, and about 19% and 17% at the MCE level, respectively. Furthermore, the reduction values of the moment and shear demands of the structures under NF-Pulselike and DBE or MCE levels have been observed more than other seismic ground-motions. Finally, increasing the distance of the energy absorbers from the middle of the wall, the accelerations of the roof decrease.

Keyword: *Self-Centering System, Energy Dissipation, Base-Rocking Wall, Higher Mode Effects, Residual Drift.*

****Corresponding Author:*** *Vahid Broujerdian*

Mohammadi Dehcheshmeh, E., Broujerdian, V. Optimal locating of Energy Dissipations Effect in Self-Centering Base-Rocking Concrete Shear walls to Reduce the Higher Modes Effects. Journal of Concrete Structures and Materials, 2022; 7(2): 188-205. <https://doi.org/10.30478/jcsm.2023.363934.1294>

2538-5828/ © 2021 The Authors. Published by Iranian Concrete Society

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

مکان‌یابی بهینه محل جاذب‌های انرژی دیوارهای بتنی پایه-گهواره‌ای مرکزگرا به منظور کاهش اثرات مودهای بالاتر

اسماعیل محمدی ده‌چشمه

محقق پسادکتری، مهندسی سازه، دانشگاه علم و صنعت ایران

وحید بروجردیان

دانشیار، مهندسی سازه، دانشگاه علم و صنعت ایران

broujerdian@just.ac.ir

(نویسنده مسئول)

نوع مقاله: مقاله پژوهشی

چکیده:

در این تحقیق به بررسی فاصله قرارگیری جاذب‌های انرژی از میانه دیوار در پایه دیوارهای پایه-گهواره‌ای مرکزگرا پرداخته شده است. برای این منظور سازه‌های با تعداد طبقات ۴، ۸، ۱۲، ۱۶ و ۲۰ طبقه مورد بررسی قرار گرفته شد. رفتار دینامیکی غیرخطی این سازه‌ها تحت ۲۲ رکورد لرزه‌ای دور ازگسل، ۱۴ رکورد لرزه‌ای نزدیک گسل بدون پالس و ۱۴ رکورد نزدیک گسل دارای پالس مورد بررسی قرار گرفت. مدل‌ها به صورت دوبعدی در نرم‌افزار *OpenSees* مورد بررسی قرار گرفته است. رکوردهای موردنظر در دو سطح *DBE* و *MCE* مقیاس شده و به سازه اعمال می‌شوند. نتایج نشان داد که تغییر محل جاذب‌های انرژی می‌تواند در تغییر مقادیر تلاش‌های خمشی و برشی دیوار و نیز پاسخ‌های دررفت پسماند و شتاب بام موثر باشد. با افزایش فاصله جاذب‌های انرژی از میانه دیوار می‌تواند تلاش‌های خمشی و برشی را در سطح *DBE* به مقدار ۱۴ و ۱۳ درصد و در سطح *MCE* به مقدار ۱۹ و ۱۷ درصد به ترتیب کاهش داد. همچنین مقادیر کاهش لنگر و برش در سازه‌ها تحت رکوردهای نزدیک گسل دارای پالس و در هر دو سطح خطر لرزه‌ای نسبت به سایر رکوردها، بیشتر است. در پایان، با افزایش فاصله جاذب‌های انرژی از میانه دیوار، شتاب‌های بام کاهش یافته می‌یابد.

کلمات کلیدی: سیستم مرکزگرا، جاذب انرژی، دیوار پایه-گهواره‌ای، اثر مودهای بالاتر، تغییر شکل پسماند.

سیستم‌های مرکزگرا تحت بارهای جانبی، با خصوصیات رفتاری مشخص برای تحمل بارهای جانبی در نظر گرفته می‌شوند که شامل؛ (۱) تأمین مکانیزم نیروی بازگرداندگی^۱ و (۲) تأمین مکانیزم جذب انرژی^۲، است. هدف این دو مکانیزم در سازه، ایجاد منحنی‌های پرچمی شکل نیرو-جابجایی تحت بارهای جانبی رفت و برگشتی است. هدف استفاده از مکانیزم نیروی بازگرداندگی در سیستم، بازگرداندن سازه تغییرشکل یافته تحت بارهای جانبی به موقعیت اولیه خود است. در سیستم‌های مرکزگرا برای تولید منحنی‌های نیروی جانبی-تغییرمکان دوخطی نیاز به مکانیزم مهم نیروی بازگرداندگی همراه با بازشوندگی است [۱]-[۴].

دیوارهای گهواره‌ای یکی از سیستم‌های متداول مرکزگرا هستند که در آن‌ها هر دو مکانیزم نیروی بازگرداندگی و جذب انرژی در سیستم تأمین می‌گردد. مکانیزم نیروی بازگرداندگی در سیستم با استفاده از پیش‌تنیده کردن کابل‌های متصل دیوار به فونداسیون و یا بلوک‌های گهواره‌ای به یکدیگر تأمین می‌گردد. کابل‌ها همواره با ایجاد نیروی بازگرداندگی و ایجاد بازشوندگی در سیستم با چرخش دیوار نسبت به فونداسیون و یا بلوک‌های دیوار نسبت به یکدیگر بر نیروی جانبی غلبه می‌کنند. فیوزهای جذب انرژی در سیستم‌های گهواره‌ای در موقعیت‌های مختلف هسته‌ای گهواره‌ای می‌توانند استفاده گردند. معمولاً این ابزار اتلاف‌گر انرژی در محل‌های بازشوندگی و یا در پیرامون دیوار در محل چرخش دیوار استفاده می‌گردد. این فیوزها می‌توانند از میلگرد معمولی، فیوز پروانه‌ای شکل، میراگر ویسکوز و ... استفاده شوند [۵]، [۶].

اولین مطالعات بر روی پاسخ دینامیکی حرکت گهواره‌ای بلوک‌های صلب، بر روی یک پایه تخت (بدون اتصال به پایه) تحت حرکت‌های افقی توسط هاوسنر^۳ [۷] در سال ۱۹۶۳ انجام پذیرفت. نتایج نشان داد، قابلیت واژگونی بلوک‌ها با ریشه مربع نسبت ارتفاع به عرض بلوک متناسب است. نتیجه‌ی دیگر این تحقیق، مشخصه‌های ارتعاش این نوع از سازه‌ها با یک سازه خطی الاستیک متفاوت است. اسلم و همکاران^۴ [۸] در سال ۱۹۸۰ به این نتیجه رسیدند که برای افزایش مقاومت در حالت بلندشدگی می‌توان سازه صلب را به زمین مهار نمود. این مهارها می‌تواند به وسیله کابل‌های پیش‌تنیده صورت گیرد که این موضوع باعث عملکرد سازه تحت تحریک‌های زلزله می‌شود. استفاده از دیوارهای با عملکرد گهواره‌ای در سازه‌ها اولین بار توسط پریستلی و همکاران^۵ [۹] در سال ۱۹۹۱ صورت گرفت.

رستریو و همکاران^۶ [۱۰] به طراحی سیستم دیوار برشی بتنی پیش‌ساخته با المان‌های پیش‌تنیده پرداختند. آنها نشان دادند، این سیستم، تحت زلزله‌های شدید نیز می‌تواند رفتار الاستیک خود را حفظ کند و همچنین در زلزله‌های بزرگ نیز تغییرمکان نسبی ماندگار این سیستم ناچیز است. پرز و همکاران^۷ [۱۱]، تلاش‌هایی برای تحلیل رفتار این سیستم با استفاده از روش فرم بسته^۸ انجام شده است و معیارهایی برای طراحی این سیستم‌ها ارائه شده است. در برخی از مطالعات عددی گذشته برای شبیه‌سازی رفتار این دیوارها از فنرهای پیچشی استفاده شده است [۱۲]. با این حال هنری و همکاران [۱۳] نشان دادند که برای بررسی صحیح رفتار دیوارهای مرکزگرا می‌بایست رفتار واقعی اجزا در این سیستم‌ها در تحلیل‌ها لحاظ شود. همچنین صادقی و همکاران [۱۴] و [۱۵] یک سیستم گهواره‌ای دیوار بتنی را ارائه دادند و به ارائه یک روش به منظور پیش‌بینی رفتار غیرخطی چرخه‌ای سیستم‌های گهواره‌ای پرداختند. در ادامه عباسی و همکاران [۱۶]، روشی کاربردی به‌منظور مدل‌سازی و تخمین خسارت دیوارهای گهواره‌ای تحت بارگذاری لرزه‌ای ارائه دادند.

¹ Restoring Force Mechanism

² Energy Dissipation Options

³ Housner

⁴ Aslam et al.

⁵ Priestley et al.

⁶ Restrepo et al.

⁷ Perez et al.

⁸ Closed-form

لو و همکاران^۹ [۱۷] نشان دادند در سیستم دیوارهای گهواره‌ای مرکزگرا به علت سختی بالای هسته‌ی گهواره‌ای، جابجایی ایجاد شده در طبقات یکنواخت است. در بیشتر تحقیقات، خرابی‌ها به علت بازشدگی قسمت پایه دیوار است و آسیب دیدگی جزئی در پنجه و پاشنه دیوار محدود می‌شود. هم‌چنین دوران دیوار، انتهای تیرها و دیافراگم متصل به آن را در طبقات ممکن است دچار خرابی کند. در این سیستم‌ها با افزایش جابجایی‌های جانبی، سختی غیرالاستیک سیستم کاهش می‌یابد. استفاده از دیوارها در سیستم‌های متداول سازه‌ای، می‌تواند از وقوع طبقه نرم جلوگیری کند [۱۸]. هم‌چنین برای عملکرد مطلوب‌تر سیستم‌های دیوار گهواره‌ای، استفاده از دو هسته بتنی با بکارگیری جاذب‌های انرژی در بین این دو هسته، پیشنهاد شده است [۱۹].

گیوو و همکاران^{۱۰} [۲۰] به تحلیل ابعادی سیستم‌های دیوار مرکزگرا تحت رکوردهای نزدیک گسل دارای پالس پرداختند. برای حل مسائل سیستم دیوار گهواره‌ای، حل فرم بسته پیشنهاد شده است. در این تحقیق نشان داده شد که ترکیب سیستم‌های متداول با سیستم‌های دیوار گهواره‌ای مرکزگرا و سیستم‌های دیوار گهواره‌ای با توزیع جاذب انرژی در ارتفاع، تحت رکوردهای نزدیک گسل دارای پالس موثر نیستند. شاه‌منصوری و همکاران [۲۱]، یک مدل شبکه عصبی چند هدفه برای پیش‌بینی رفتار جانبی دیوارهای گهواره‌ای بتنی را ارائه دادند. آن‌ها نشان دادند که مدل شبکه عصبی چندهدفه با دقت قابل قبولی رفتار جانبی این سیستم‌ها را پیش‌بینی می‌کند. این مدل قادر است سختی اولیه، سختی ثانویه، مقاومت بیشینه و ظرفیت دورانی را با دقت قابل قبولی تخمین بزند.

بروجردیان و محمدی ده‌چشمه^{۱۱} [۲۲] به بررسی رفتار احتمالاتی سازه‌های دیوار پایه-گهواره‌ای مرکزگرای کوتاه- و میان-مرتب‌ه پرداختند. سازه‌ها تحت سه نوع رکورد لرزه‌ای؛ دور از گسل، نزدیک گسل دارای پالس و بدون پالس، مورد بررسی قرار گرفت. هدف کلی این تحقیق، تعیین اثرات موده‌های بالاتر به صورت خمش و برش در هسته دیوار پایه-گهواره‌ای بوده است. آن‌ها به منظور کاهش اثرات موده‌های بالاتر در آن سیستم‌های مدنظر، دیوارهای گهواره‌ای دوگانه [۲۳]، گهواره‌ای چهارگانه [۲۴]، گهواره‌ای چندگانه [۵] و دوگهواره‌ای [۲۵] را پیشنهاد دادند. آن‌ها مطالعات پارامتریک گسترده‌ای انجام دادند و سازه‌های بهینه در هر یک از تحقیقات مشخص شد. در ادامه این تحقیقات آنها به بررسی اثرات مولفه‌ی دورانی زلزله بر روی آن سازه‌ها پرداختند [۲۶]. هم‌چنین آن‌ها، اثرات ستون پی-دلتا که اثر کلی بارگذاری قائم ناحیه میانی سازه‌های با قاب ساده را در نظر می‌گیرد را بررسی کردند [۲۷]. آن‌ها نشان دادند که در دیوار پایه-گهواره‌ای مرکزگرا، اثرات بارگذاری بار ثقلی ناحیه قاب ساده ناچیز و قابل صرف نظر است.

در تحقیقات مختلف دیوارهای گهواره‌ای مرکزگر با قرارگیری جاذب‌های انرژی با یک فاصله ثابت از بر دیوار در نظر گرفته می‌شوند [۲۲]-[۲۷]. در این تحقیق به بررسی پارامتریک فاصله جاذب‌های انرژی از بر دیوارهای مرکزگرای گهواره‌ای (گام بردار) پرداخته شده است. سازه‌های مورد نظر دارای تعداد طبقات ۴، ۸، ۱۲، ۱۶ و ۲۰ و با استفاده از نرم‌افزار *OpenSees* مدل‌سازی شده‌اند. تحلیل‌ها در این نرم‌افزار با در نظر گرفتن خواص غیرخطی مصالح و هندسه انجام شده است. جاذب‌های انرژی در (۱) لبه‌های دیوار، (۲) یک‌چهارم طول دیوار از لبه و (۳) میانه دیوار در نظر گرفته شده‌اند. تحلیل‌ها از نوع دینامیکی تاریخچه-زمانی بوده است. دیوارها تحت سه مجموعه شتابنگاشت شامل ۲۲ شتاب‌نگاشت دور (*FF*)، ۱۴ شتاب‌نگاشت نزدیک دارای پالس (*NF-Pulselike*) و ۱۴ شتاب‌نگاشت نزدیک بدون پالس (*NF-non Pulselike*) پرداخته می‌شود. مدل‌سازی‌ها، در نرم‌افزار به‌صورت دوبعدی و به صورت ریزمدل‌سازی انجام می‌شود. در پایان، پاسخ‌های و تلاش‌های سازه‌ها در مقابل رکوردهای لرزه‌ای مختلف مورد بررسی قرار گرفته است.

⁹ Lu et al.

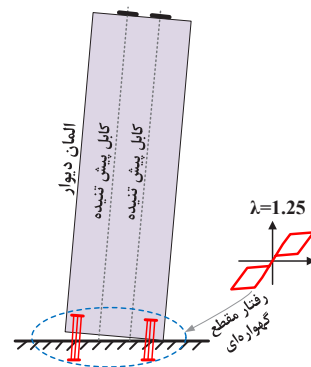
¹⁰ Guo et al.

¹¹ Broujerdian and Mohammadi Dehcheshmeh

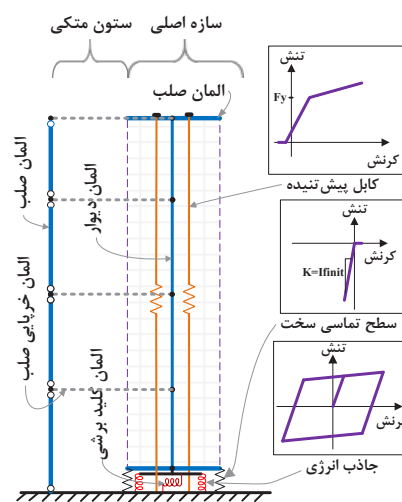
۲- روش تحقیق

۲-۱- نحوه‌ی مدل‌سازی سیستم‌های گهواره‌ای

برای مدل‌سازی نرم‌افزاری، می‌بایست یک سری فرضیات اولیه انجام شود و نیز مدل‌سازی به‌صورت ساده‌سازی تعریف گردد. در شکل ۱-الف) دیوار پایه-گهواره‌ای نشان داده شده است. در این دیوار محل قرارگیری و اتصال جاذب‌های انرژی (ED) و کابل‌های پیش‌تنیده (PT) و همچنین اجزای دیوار نشان داده شده است. برای مدل‌سازی این سیستم در نرم‌افزار *OpenSees* از مصالح و المان‌های مختلف استفاده می‌شود. در شکل ۱-ب)، مدل‌سازی هسته‌ی دیوار به‌صورت الاستیک در نظر گرفته شده است [۲۵]. با توجه به مقالات گذشته [۲۸] و [۲۹]، چون در طراحی اجزای غیرخطی شدن بتنی داده نشده است و می‌توان این فرض را صحیح دانست و سپس تنش در بتن، مورد بررسی قرار گرفته شده و این موضوع اثبات شود. در انتهای دیوار، به‌منظور اتصال به پایه با PT ها و ED ها و همچنین فنرهای تماسی سخت از المان‌های اتصال دهنده صلب استفاده شده است. برای مدل‌سازی سطوح تماس بلوک‌ها که به‌صورت فشاری به یکدیگر و پایه اتصال دارند، از فنرهای فشاری با سختی بی‌نهایت استفاده شده است. کابل‌های پیش‌تنیده استفاده شده دارای رفتار مصالح بدون تحمل فشار و از نوع *ElasticPPGap* با گپ صفر و پیش‌تنیدگی اولیه استفاده می‌شود. المان‌های ED به‌صورت فنر *Zero Length* به‌منظور جذب انرژی بین بلوک گهواره‌ای و پایه مورد استفاده قرار گرفته است. دقت شود که اتصال هسته گهواره‌ای با دیافراگم در طبقات به صورت جداسازی شده در نظر گرفته شده است و انتقال برش به‌وسیله اتصالات خاص مشابه تحقیق [۲۴] در نظر گرفته شده است.



الف) مدل دیوار گهواره‌ای

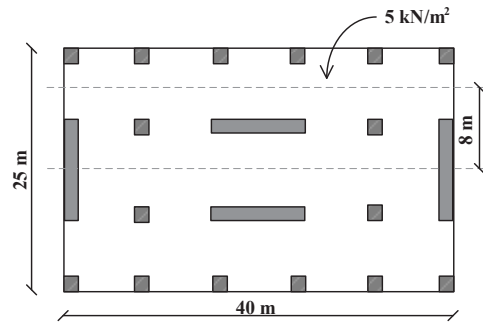


ب) مدل‌سازی عددی در نرم‌افزار *OpenSees*

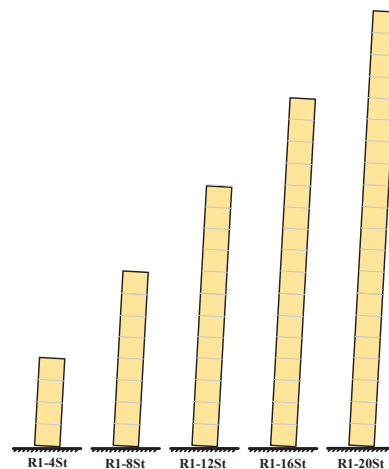
شکل ۱: مدل نرم‌افزاری دیوار بتنی پایه-گهواره‌ای مرکزگرا

۲-۲ مشخصات مدل‌های عددی

مدل‌های عددی مورد بررسی در این مقاله، دارای ساختمان مشابه پلان شکل ۲-۲ (الف) و دارای تعداد طبقات ۴، ۸، ۱۲، ۱۶ و ۲۰ است [۳۰]. مدل‌های مورد بررسی دارای ارتفاع‌های مختلف مطابق شکل ۲-۲ (ب) در نظر گرفته شده است. وزن مؤثر لرزه‌ای در مدل‌های دیوار برابر با ۲۵۰ تن نیرو در هر طبقه برای هر دیوار در نظر گرفته شده است. مشخصات مکانیکی بتن شامل $f'_c = 40MPa$ و $E_c = 30GPa$ است. مشخصات جاذب‌های انرژی $f_y = 300MPa$ و $E_s = 210GPa$ و هم‌چنین کابل‌های پیش‌تنیده دارای $f_y = 1560MPa$ و $E_s = 195GPa$ است. ارتفاع طبقات برابر با ۳۵۰۰ میلی‌متر در نظر گرفته شده است.



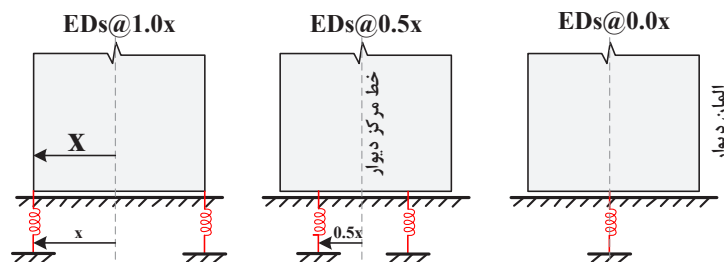
الف) پلان سازه با دیوارهای رفتار پایه-گهواره‌ای؛



ب) دیوارهای پایه-گهواره‌ای مورد بررسی.

شکل ۲: پلان سازه و نمای دیوارهای گهواره‌ای مرکزگرا

در این تحقیق، اثر محل قرارگیری جاذب‌های انرژی در پایه دیوار مورد بررسی قرار گرفته است. جاذب‌های انرژی در سه قسمت شامل لبه دیوار ($EDs@1.0x$)، در فاصله یک‌چهارم طول دیوار از لبه ($EDs@0.5x$) و در مرکز دیوار ($EDs@0.0x$) قرار گرفته‌اند. پارامتر x فاصله جاذب انرژی از خط مرکزی دیوار مطابق شکل ۳ است. محل قرارگیری جاذب‌های انرژی در این تحقیق در شکل ۳ نشان داده شده است.



شکل ۳: محل قرارگیری جاذب‌های انرژی در دیوارهای گهواره‌ای مرکزگرای مورد بررسی

۲-۳- صحت‌سنجی روند مدل‌سازی عددی

صحت‌سنجی سیستم گهواره‌ای در تحقیق [۲۲]، توسط نویسندگان تحقیق حاضر که برگرفته از تحقیق [۳۱] بوده، انجام شده است. مشخصات نمونه‌ی آزمایشگاهی شامل: ضخامت دیوار ۱۲۵ میلی‌متر و مقاومت فشاری بتن $f'_c = 45\text{MPa}$ مشخصات آرماتورهای طولی و عرضی $f_y = 460\text{MPa}$ و $E_s = 200\text{GPa}$ هم‌چنین کابل‌های پیش‌تنیده دارای $f_y = 1435\text{MPa}$ و $E_s = 180\text{GPa}$ است. در تحقیق [۲۲] نتایج حاکی از دقت مناسب مدل‌سازی است.

۲-۴- رکوردهای لرزه‌ای موردبررسی

در این تحقیق از سه دسته رکورد دور (FF) و نزدیک گسل با پالس (NF -Pulselike) و بدون پالس (NF -non Pulselike) مطابق دستورالعمل $FEMAP695$ [۳۲] استفاده شده است. این رکوردها به تفکیک با مشخصات مربوطه در تحقیق [۲۲] نشان داده شده است. با توجه به این‌که رکوردهای افقی دارای دو مؤلفه هستند و تحلیل‌های موردنظر این تحقیق دوبعدی است، از یک رکورد در تحلیل‌ها استفاده شده است. برای استفاده از رکوردهای دور از گسل در تحلیل‌ها، از رکورد با مؤلفه‌ی PGA بیشتر و رکوردهای نزدیک گسل، مؤلفه‌ی جهت عمود بر گسل انتخاب شده است [۳۳]. برای مقیاس کردن رکوردهای لرزه‌ای مطابق دستورالعمل $FEMAP695$ ابتدا به نرمالایز کردن رکوردها^{۱۲} پرداخته شده است. نرمالایز کردن مطابق شکل زیر انجام می‌شود:

$$NM_i = \text{Mean}(PGV_{PEER,i}) / PGV_{PEER,i} \quad (3)$$

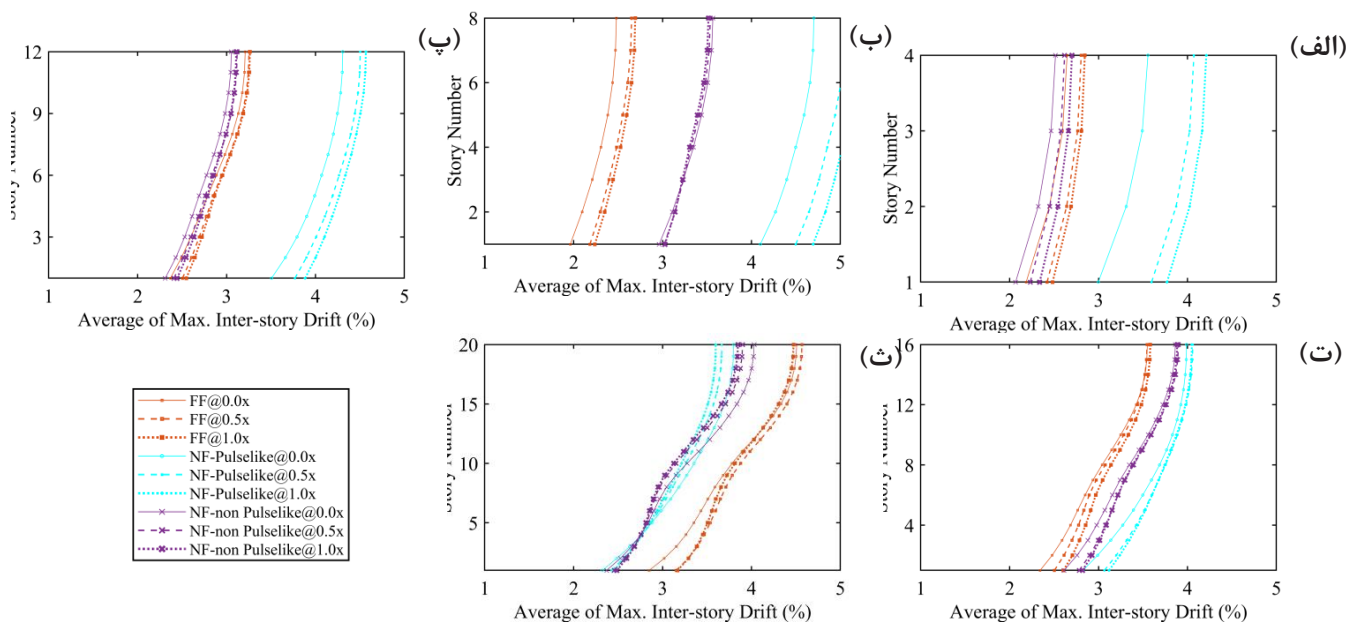
در رابطه‌ی فوق؛ NM_i مربوط به ضریب نرمالایز رکورد NM_i ، $PGV_{PEER,i}$ ماکزیمم شتاب افقی رکورد NM_i و $\text{Mean}(PGV_{PEER,i})$ میانگین مجموعه رکوردهای افقی موردنظر است.

در شبیه‌سازی‌های دوبعدی، برای مقیاس رکوردها، معمولاً مطابق آیین‌نامه $ASCE7$ [۳۴] در محدوده‌ی $0.2T1$ الی $1.5T1$ میانگین طیف رکوردها به طیف طراحی مقیاس می‌شوند.

۳- نتایج تحقیق

۳-۱- حداکثر جابجایی نسبی میان طبقه‌ای

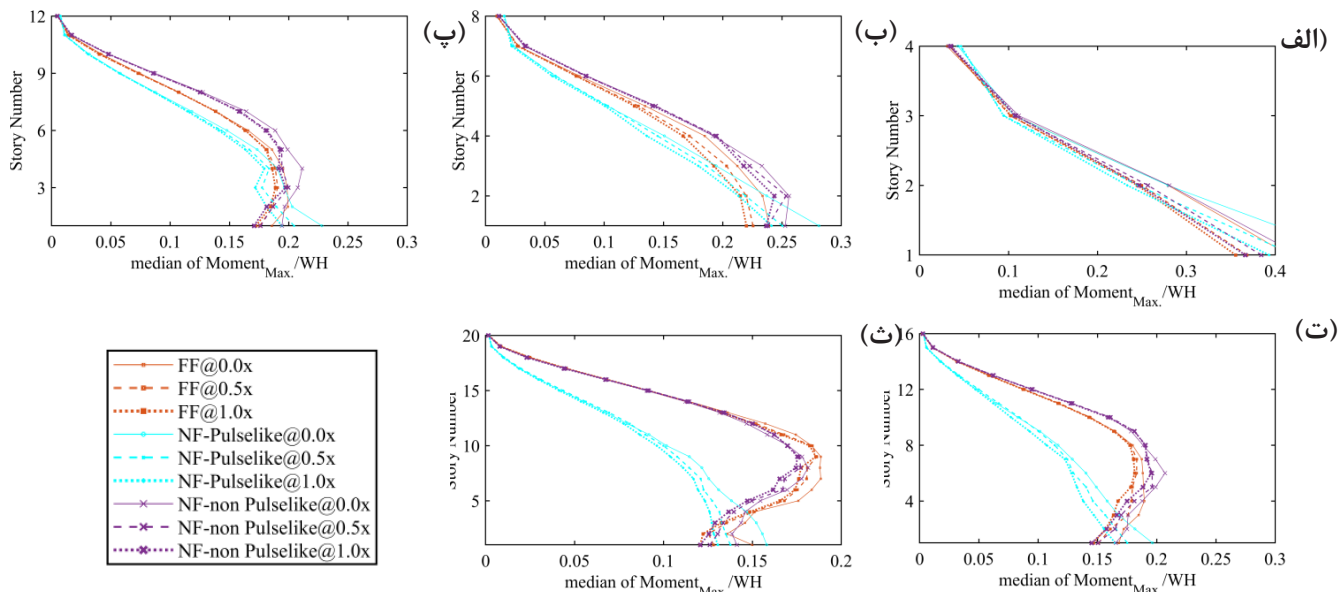
میانگین حداکثر جابجایی نسبی میان طبقه‌ای سازه‌ها در سطح زلزله MCE با تعداد طبقات مختلف در شکل ۴ نشان داده شده است. در بیشتر سازه‌ها (به‌جز سازه ۲۰ طبقه)، رکوردهای NF -Pulselike مقادیر جابجایی نسبی بیشتری در سازه ایجاد می‌کنند. دقت شود که نوع رکورد لرزه‌ای می‌تواند تا بیش از دو برابر (بیشتر در سازه‌های با ارتفاع کوتاه‌تر) در ایجاد جابجایی‌های نسبی حداکثر در سازه‌های مورد بررسی، موثر باشد. هم‌چنین دقت شود که نوع رکورد لرزه‌ای و فاصله جاذب‌های انرژی از میانگین دیوار می‌توانند در نتایج جابجایی نسبی میان طبقه‌ای تاثیرگذار باشند. در تمامی رکوردهای لرزه‌ای (به‌جز سازه ۸ و ۲۰ طبقه تحت رکوردهای NF -non Pulselike)، با فاصله گرفتن جاذب‌های انرژی از میانگین دیوار، مقادیر حداکثر دررفت سازه افزایش می‌یابد. هم‌چنین محل جاذب‌های انرژی می‌تواند تا حدود ۲۵ درصد در ایجاد حداکثر جابجایی‌های نسبی میان طبقه‌ای (بیشتر در سازه‌های کوتاه‌تر) اختلاف ایجاد نماید. با افزایش ارتفاع سازه، جابجایی نسبی میان طبقه‌ای ناشی از رکوردهای لرزه‌ای موردنظر غیریکنواخت‌تر می‌شود. به معنی دیگر، می‌توان گفت که با افزایش ارتفاع سازه، ممکن است تمرکز جابجایی نسبی میان طبقه‌ای در سازه به وجود آید که بایستی سختی در طراحی سازه‌های گهواره‌ای بلندتر طوری در نظر گرفته شود که این مورد را برطرف کند. تمرکز جابجایی نسبی میان طبقه‌ای در سازه‌های گهواره‌ای مورد بررسی ۴ الی ۱۶ طبقه خیلی ناچیز است ولی در سازه ۲۰ طبقه با توجه به افزایش ارتفاع، پروفیل مقادیر جابجایی نسبی از حالت خطی قائم خارج شده است و در میانگین ارتفاع کمی انحنای مشاهده می‌شود. این انحنا در سازه ۲۰ طبقه بیشتر تحت رکوردهای FF و NF -non Pulselike به علت موثر بودن بیشتر اثرات موده‌های بالاتر مشاهده می‌شود. البته همانطور که در قسمت فوق گفته شده است این تمرکز دررفت را می‌توان با تغییر محل جاذب‌های انرژی در مقطع گهواره‌ای کاهش داد.



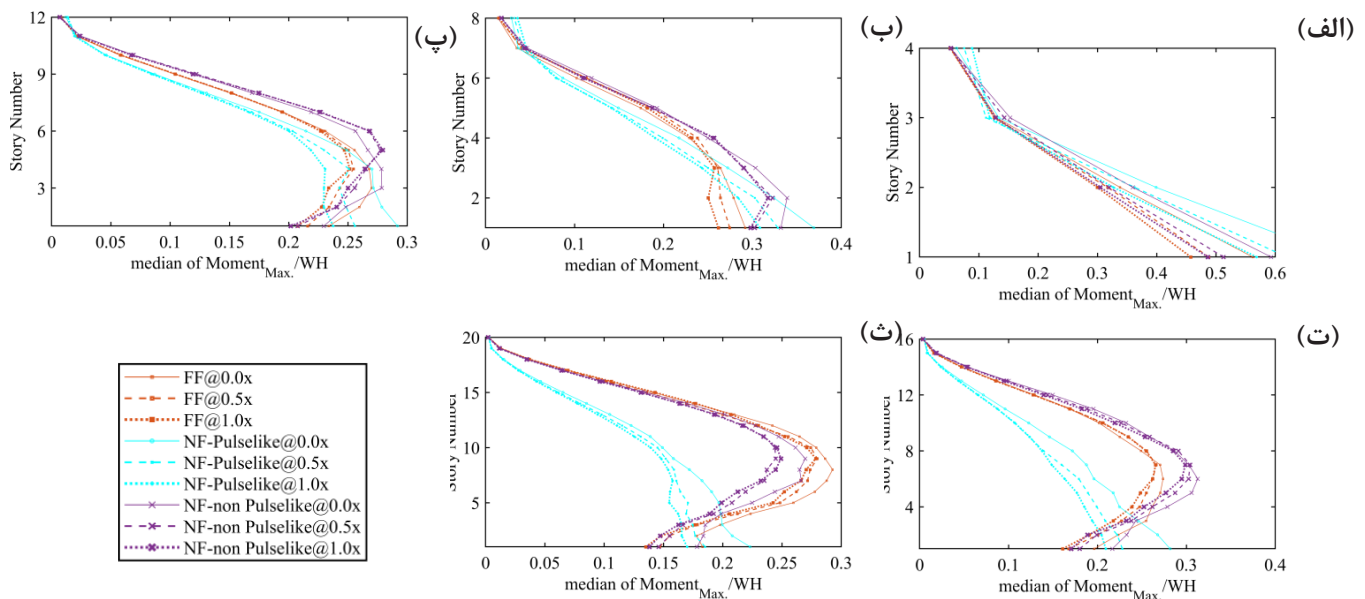
شکل ۴: میانه حداکثر جابجایی نسبی بین طبقه‌ی تحت رکوردهای مختلف لرزه‌ای در سطح *MCE* مربوط به سازه‌های: (الف) ۴ طبقه، (ب) ۸ طبقه، (پ) ۱۲ طبقه، (ت) ۱۶ طبقه و (ث) ۲۰ طبقه

۳-۲- حداکثر خمش طبقات

میانه حداکثر خمش طبقات دیوار تحت رکوردهای مختلف لرزه‌ای در سطح *DBE* و *MCE* در شکل ۵ و ۶ نشان داده شده است. با افزایش ارتفاع و هم‌چنین افزایش شدت زلزله، اثرات مودهای بالاتر به صورت خمش در ارتفاع افزایش می‌یابد (بیشتر در نوع زلزله‌های *FF* و *NF-non Pulselike* مشاهده می‌شود). همانطور که در قسمت‌های اولیه پژوهش اشاره شد، یکی از اثرات مودهای بالاتر افزایش تلاش لنگر خمشی در نزدیک میانه ارتفاع دیوار است. دلیل افزایش اثرات مودهای بالاتر سازه‌ها تحت زلزله‌های نوع *FF* و *NF-non Pulselike*، بخاطر افزایش مقادیر شتاب مودهای بالاتر ناشی از این رکوردها است. با توجه به اینکه سازه تمایل ندارد متناسب با شکل مودی حرکت کند، مقادیر تقاضاها در قسمت‌های از سازه افزایش می‌یابد. مطابق این اشکال با افزایش فاصله جاذب‌های انرژی از میانه دیوار می‌توان مقدار لنگرها را کاهش داد. در تقریباً سازه‌های تحت رکوردهای *NF-non Pulselike* و سازه‌های کوتاه‌تر (۴ و ۸ طبقه) در قسمت‌های پایین ارتفاع سازه، تغییرات بیشتری در مقادیر خمش ناشی از تغییر محل جاذب‌های انرژی مشاهده می‌شود. مقدار این تغییرات با افزایش ارتفاع سازه، افزایش پیدا می‌کند. در سازه‌های بلندتر (مشابه ۲۰ طبقه)، تغییرات خمش دیوار ناشی از تغییر محل جاذب‌های انرژی، در میانه ارتفاع تحت رکوردهای *FF* و *NF-non Pulselike* در محل حداکثر خمشی علاوه بر پایه دیوار نیز مشاهده می‌شود. دقت شود که تغییرات حداکثر خمش در سازه‌های بلندتر با توجه به نوع رکورد لرزه‌ای در سطح خطر زلزله *DBE* و *MCE* به ترتیب تا حدود ۲۵ و ۵۰ درصد مشاهده شده است. به‌طور کلی، با جابجایی محل جاذب‌های انرژی در مقطع گهواره‌ای، تغییرات حداکثر خمش در دیوارهای مورد بررسی حدود ۱۶ و ۲۲ درصد به ترتیب تحت انواع رکوردهای لرزه‌ای در دو سطح خطر *DBE* و *MCE* مشاهده شده است.



شکل ۵: میانه حداکثر لنگر خمشی طبقات تحت رکوردهای مختلف لرزه‌ای در سطح DBE مربوط به سازه‌های: (الف) ۴ طبقه، (ب) ۸ طبقه، (پ) ۱۲ طبقه، (ت) ۱۶ طبقه و (ث) ۲۰ طبقه

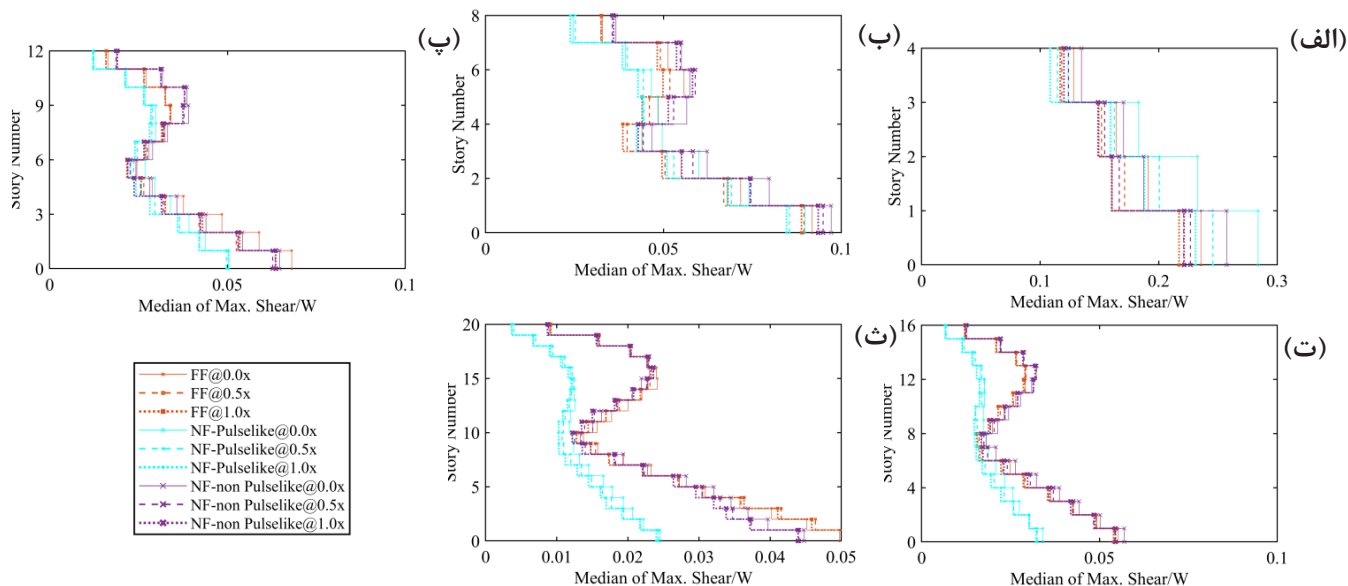


شکل ۶: میانه حداکثر لنگر خمشی طبقات تحت رکوردهای مختلف لرزه‌ای در سطح MCE مربوط به سازه‌های: (الف) ۴ طبقه، (ب) ۸ طبقه، (پ) ۱۲ طبقه، (ت) ۱۶ طبقه و (ث) ۲۰ طبقه

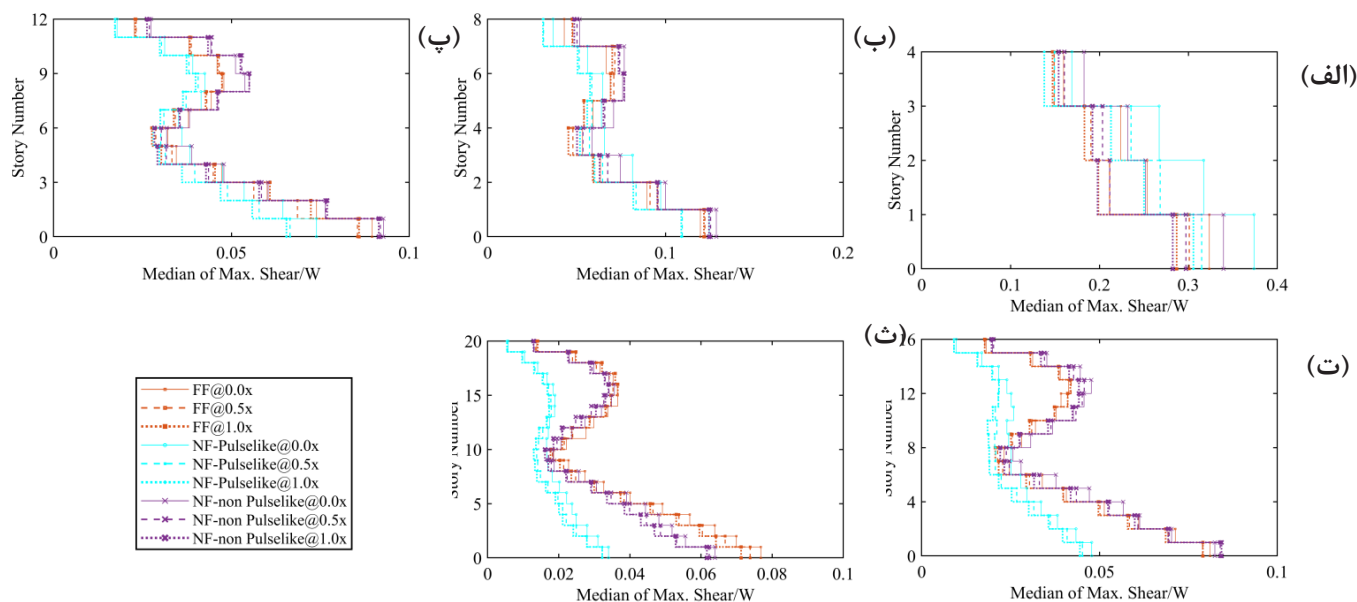
۳-۳- حداکثر برش طبقات

میانه حداکثر برش طبقات دیوار تحت رکوردهای مختلف لرزه‌ای در سطح‌های DBE و MCE در شکل ۷ و ۸ نشان داده شده است. اثرات مودهای بالاتر، به صورت افزایش برش در پایه و قسمت فوقانی دیوار مشاهده می‌شود. با افزایش ارتفاع و همچنین افزایش شدت زلزله، اثرات مودهای بالاتر به صورت برش در پایه و ارتفاع افزایش می‌یابد (بیشتر در نوع زلزله‌های FF و NF-non Pulselike مشاهده می‌شود). مقادیر برش در سازه‌ها تحت رکوردهای FF و NF-non Pulselike در میانه ارتفاع تقریباً برابر با مقادیر برش تحت رکوردهای NF-Pulselike است. اعمال نوع رکورد لرزه‌ای می‌تواند مقادیر برش را تا حدود ۲ برابر در پایه و حدود ۳ برابر در نیمه بالایی دیوار، تغییر دهد (در سازه ۲۰ طبقه قابل مشاهده است). حداکثر برش در سازه‌های ناشی از NF-Pulselike و در سازه‌های بلندتر ناشی از FF و NF-non Pulselike ایجاد می‌شود. مطابق این شکل با افزایش فاصله جاذب‌های انرژی از میانه دیوار، می‌توان مقدار برش‌ها را

کاهش داد. تغییرات محل جاذب‌های انرژی، بیشتر در مقادیر برش در پایه سازه تاثیرگذار است. مقادیر تغییرات برش در سازه‌های کوتاه‌تر (همانند ۴ و ۸ طبقه)، با جابجایی محل جاذب‌های انرژی در مقطع دیوار حساس‌تر است. این حساسیت با افزایش ارتفاع دیوار، کاهش پیدا می‌کند.



شکل ۷: میانگین حداکثر برش طبقات تحت رکوردهای مختلف لرزه‌ای در سطح DBE مربوط به سازه‌های: (الف) ۴ طبقه، (ب) ۸ طبقه، (پ) ۱۲ طبقه، (ت) ۱۶ طبقه و (ث) ۲۰ طبقه

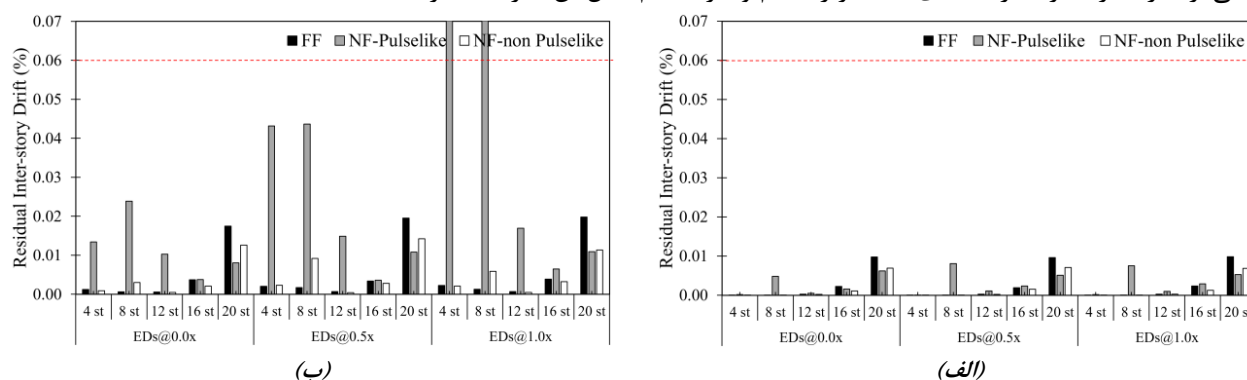


شکل ۸: میانگین حداکثر برش طبقات تحت رکوردهای مختلف لرزه‌ای در سطح MCE مربوط به سازه‌های: (الف) ۴ طبقه، (ب) ۸ طبقه، (پ) ۱۲ طبقه، (ت) ۱۶ طبقه و (ث) ۲۰ طبقه

۳-۴- جابجایی نسبی پسماند بام

حداکثر مقدار قابل قبول جابجایی نسبی میان طبقه‌ای پسماند (دریفت پسماند) برای سیستم‌های مرکزگرا، مطابق تحقیق [۳۵] برابر با ۰/۰۶ درصد در نظر گرفته شده است. در شکل‌های ۹- (الف) و (ب) مقادیر میانگین جابجایی نسبی میان طبقه‌ای پسماند برای دیوارهای مختلف و تحت زلزله‌های مختلف و در دو سطح عملکرد DBE و MCE نشان می‌دهد. مطابق شکل ۹- (الف)، مقادیر جابجایی نسبی میان طبقه‌ای پسماند از مقدار حداکثر قابل قبول (۰/۰۶ درصد) کمتر است ولی در در سازه‌های کوتاه مرتبه سطح MCE مقادیر جابجایی پسماند در سازه‌های تحت NF-Pulslike تجاوز نموده است. هم‌چنین محدود نمودن دریفت پسماند به حد ۰/۰۶ درصد، خیلی محافظه کارانه است. در بعضی از

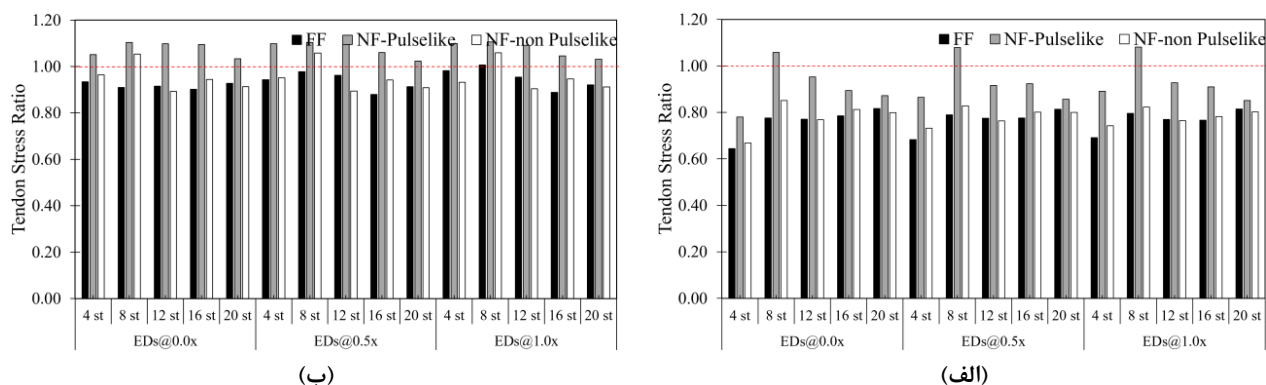
تحقیقات برای سیستم‌های گهواره‌ای مرکزگرا برای سطح DBE حدود ۰/۲ درصد انتخاب شده است [۴]. لازم به ذکر است که مقادیر دررفت پسماند تحت رکورد $NF-Pulslike$ و در سطح MCE در تمامی سازه‌ها تقریباً بیشتر است. هم‌چنین به صورت کلی با افزایش ارتفاع مقادیر دررفت پسماند افزایش یافته است. با قرارگیری جاذب‌های انرژی در لبه‌ها نسبت به دو حالت دیگر، مقادیر دررفت پسماند سازه افزایش می‌یابد. مقادیر دررفت پسماند در حالتی که جاذب‌های انرژی در میانه دیوار باشند، مقادیر کمتری نسبت به دو حالت دیگر دارند. به طور کلی با ایجاد فاصله جاذب‌های انرژی از میانه دیوار، مقادیر دررفت پسماند بام افزایش می‌یابد. می‌توان دلیل افزایش دررفت پسماند در بعضی از سازه‌ها را تجربه دررفت‌های حداکثر زیاد بام و نیز تسلیم کابل آن سازه‌ها شمرد.



شکل ۹: میانه جابجایی پسماند تحت رکوردهای مختلف لرزه‌ای در سطح زلزله؛ (الف) DBE و (ب) MCE

۳-۵- نسبت تنش تاندن‌ها

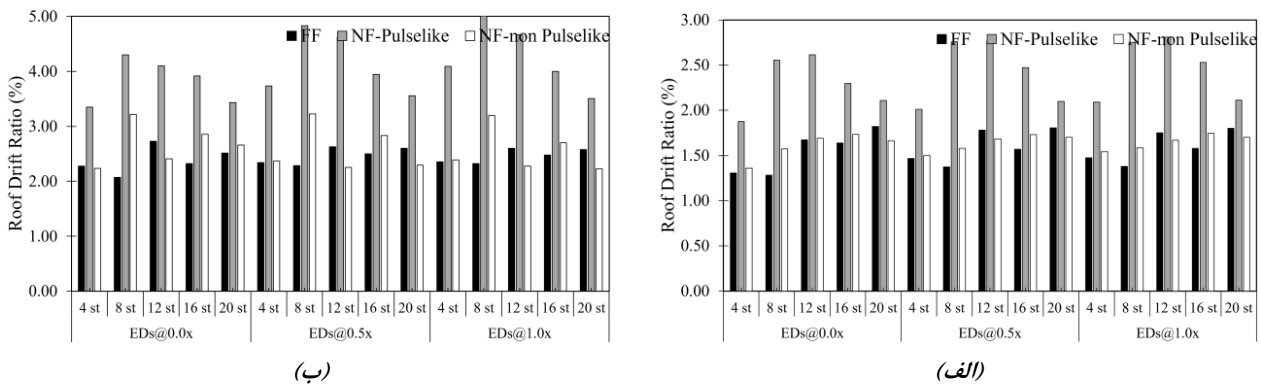
حداکثر نسبت تنش در تاندن‌ها، در شکل‌های ۱۰- (الف) و (ب) در سازه‌ها مختلف و تحت رکوردهای مختلف در دو سطح زلزله DBE و MCE نشان داده شده است. در زلزله DBE مقادیر نسبت تنش معمولاً کمتر از عدد یک است (به‌جز یک مورد تحت زلزله $NF-Pulslike$). در سطح MCE مقادیر نسبت تنش کابل‌ها در بیشتر سازه‌ها بزرگتر از عدد یک است (در تمامی سازه‌ها تحت $NF-Pulslike$ مشاهده می‌شود). در این سطح زلزله، تحت رکوردهای FF ، تسلیم در کابل‌ها مشاهده نمی‌شود ولی تحت رکوردهای $NF-Pulslike$ در تمامی سازه‌ها تسلیم در کابل‌ها مشاهده می‌شود. هم‌چنین تحت رکوردهای $NF-non Pulslike$ در یک سازه، تسلیم در کابل‌ها مشاهده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، با ایجاد فاصله جاذب‌های انرژی از میانه دیوار، مقادیر تنش در کابل‌ها زیاد تغییری نمی‌کند. به‌منظور کاهش تنش در کابل‌ها در سطوح خطر بالا (همانند MCE) پیشنهاد می‌شود که تنش تسلیم کابل یا تعداد آن‌ها افزایش داده شود. تنش در تاندون‌ها رابطه مستقیم با جابجایی کل بام دارد، با بررسی قسمت بعدی، می‌توان مشاهده نمود که تنش کابل‌هایی که دررفت بام زیادی دارند، به طور چشم‌گیری افزایش یافته است.



شکل ۱۰: میانه حداکثر نسبت تنش تاندن‌ها تحت رکوردهای مختلف لرزه‌ای در سطح زلزله؛ (الف) DBE و (ب) MCE

۳-۶- حداکثر جابجایی نسبی بام

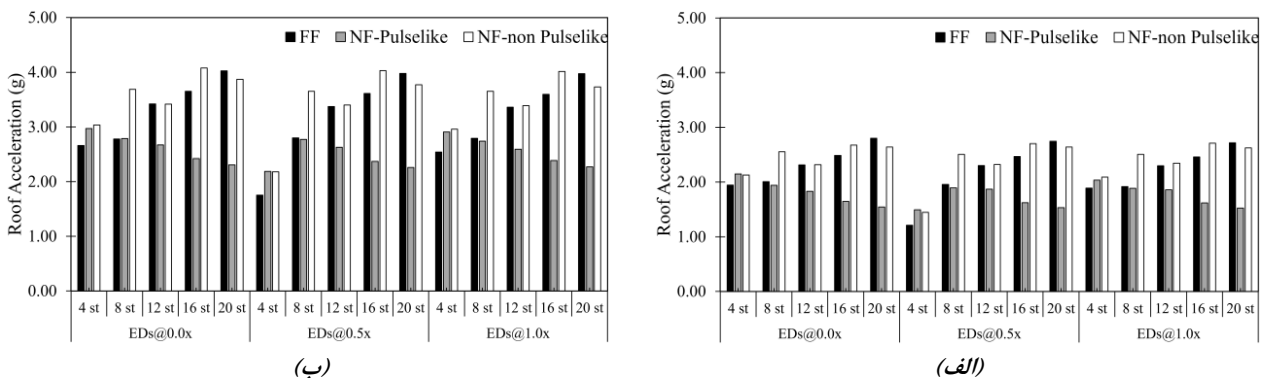
حداکثر جابجایی نسبی بام (دریفت)، در شکل‌های ۱۱-الف) و ب) در سازه‌های مختلف و تحت رکوردهای مختلف در دو سطح زلزله *DBE* و *MCE* نشان داده شده است. در دو سطح زلزله دریفت بام تحت رکوردهای *NF-Pulselike* بیشتر از سایر رکوردها است. به طور کلی، در سازه‌های کوتاه‌تر، رکوردهای *NF-non Pulselike* نسبت به رکوردهای *FF* دریفت بیشتری ایجاد می‌کنند ولی در سازه‌های بلندتر، نتیجه عکس است. مقادیر دریفت‌های ایجاد شده ناشی از *NF-Pulselike* نسبت به *FF* و *NF-non Pulselike* حدود ۴۰ درصد افزایش یافته است. دقت شود که دریفت‌های بام در سازه‌های میان‌مرتبه (۸ و ۱۲ طبقه) نسبت به سازه‌های کوتاه‌مرتبه (۴ طبقه) و سازه‌های بلند مرتبه (۱۶ و ۲۰ طبقه)، افزایش یافته است. هم چنین با افزایش فاصله جاذبه‌های انرژی از میانه دیوار، حداکثر دریفت بام افزایش می‌یابد.



شکل ۱۱: میان‌ه حداکثر جابجایی نسبی بام تحت رکوردهای مختلف لرزه‌ای در سطح زلزله؛ الف) *DBE* و ب) *MCE*

۳-۷- حداکثر شتاب مطلق بام

حداکثر شتاب مطلق بام، در شکل‌های ۱۲-الف) و ب) در سازه‌ها مختلف و تحت رکوردهای مختلف در دو سطح زلزله *DBE* و *MCE* نشان داده شده است. با افزایش فاصله جاذبه‌های انرژی از میانه دیوار، شتاب‌های بام کاهش پیدا می‌کند. به طور کلی شتاب‌های بام سازه‌های کوتاه‌تر کمتر از سازه‌های بلندتر است. معمولاً شتاب بام سازه‌های متوسط و بلند (۸ الی ۲۰ طبقه) تحت رکوردهای *FF* و *NF-non Pulselike* بیشتر از رکوردهای *NF-Pulselike* است. به طوری که رکوردهای *FF* و *NF-non Pulselike* نسبت به رکوردهای *NF-Pulselike* در هر دو سطح زلزله و سازه ۲۰ طبقه حدود ۶۰ درصد شتاب بام بیشتری ایجاد می‌کنند. نوع رکورد لرزه‌ای در ایجاد مقادیر شتاب بام در سازه‌ی کوتاه (۴ طبقه) و در سطوح زلزله *DBE* و *MCE* تفاوت ایجاد نمی‌کند. افزایش شتاب بام سازه‌ها تحت رکوردهای *MCE* نسبت به *DBE* حدوداً ۵۰ درصد است.



شکل ۱۲: میان‌ه حداکثر شتاب مطلق بام تحت رکوردهای مختلف لرزه‌ای در سطح زلزله؛ الف) *DBE* و ب) *MCE*

۴- بحث در نتایج

در جدول (۱) و (۲) به ترتیب درصد تغییرات پاسخ‌ها و تلاش‌های سازه در حالت قرارگیری جاذب‌های انرژی در فاصله یک-چهارم طول دیوار از لبه و لبه دیوار نسبت به میانه دیوار را نشان می‌دهد. به طور کلی با جابجایی جاذب‌های انرژی از میانه دیوار، افزایش حداکثر دریفت (دریفت بام)، تنش کابل‌ها و دریفت پسماند را به همراه داشته است. به صورت میانگین تحت رکوردهای لرزه‌ای مختلف، مقادیر تغییرات دریفت حداکثر، دریفت بام و تنش کابل‌ها با جابجایی محل جاذب‌های انرژی کمتر از ۵ درصد است که می‌توان گفت این تغییرات قابل صرف نظر است. در حالت میانگین و تحت رکوردهای لرزه‌ای مختلف، مقادیر تغییرات دریفت پسماند بام با تغییر محل جاذب‌های انرژی بیشتر از ۵۰ درصد است. البته مطابق بخش ۴-۳ مشاهده شد که در بیشتر سازه‌ها تحت رکوردهای لرزه‌ای مختلف مقادیر دریفت پسماند قابل صرف نظر است. با افزایش فاصله جاذب‌های انرژی از میانه مشاهده می‌شود که در دو سطح خطر لرزه‌ای مورد بررسی، تغییرات در دریفت حداکثر، دریفت بام و تنش کابل‌ها ناچیز است ولی تغییرات دریفت پسماند، افزایش یافته است. هم‌چنین می‌توان گفت که در سازه‌ها تحت رکوردهای *NF-Pulselike*، تغییرات دریفت حداکثر و دریفت بام بیشتری نسبت به سایر رکوردها با تغییر محل جاذب‌های انرژی ایجاد می‌شود. نوع رکوردهای لرزه‌ای روی مقادیر تنش کابل‌ها با تغییر محل جاذب‌های انرژی تاثیر چندانی ندارد. مقادیر دریفت پسماند سازه‌ها تحت رکوردهای *NF-Pulselike* و سطح *DBE* کمتر از سایر رکوردها است ولی در سطح *MCE* مقادیر دریفت پسماند به طور قابل مشاهده‌ای نسبت به سایر رکوردها افزایش یافته است.

با جابجایی جاذب‌های انرژی از محل میانه دیوار، مقادیر لنگر خمشی، برش و شتاب بام کاهش پیدا کرده است. به صورت میانگین در دو سطح خطر لرزه‌ای مورد بررسی، در دو حالت مورد بررسی جاذب‌های انرژی نسبت به حالت میانه دیوار، مقادیر خمش و برش دیوار دارای تغییرات بیش از ۱۰ درصد و مقادیر تغییرات شتاب بین ۵ تا ۱۰ درصد است. با افزایش فاصله جاذب‌های انرژی از میانه دیوار، مقادیر کاهش لنگر خمشی و برش دیوار افزایش یافته است در صورتی که با افزایش فاصله جاذب‌های انرژی از میانه دیوار، شتاب‌ها به طور قابل توجهی کاهش نیافته است. هم‌چنین می‌توان گفت که سازه‌ها تحت *NF-Pulselike*، تغییرات لنگر خمشی و برش دیوارها در سازه نسبت به سایر رکوردها با تغییر محل جاذب‌های انرژی، بیشتر مشاهده شده است. مقادیر کاهش لنگر و برش در سازه‌ها تحت رکوردهای *NF-Pulselike* و دو سطح خطر لرزه‌ای نسبت به سایر رکوردهای بیشتر مشاهده شده است در صورتی که تحت این نوع رکورد و سطوح خطر لرزه‌ای نسبت به سایر رکوردها، مقادیر شتاب بام با افزایش فاصله جاذب‌ها از میانه دیوار کمتر کاهش یافته است. هم‌چنین لازم به ذکر است که با افزایش فاصله جاذب‌های انرژی از میانه دیوار مقادیر لنگر خمشی و برش دیوار بیشتر کاهش یافته در صورتی که مقادیر شتاب بام کمتر کاهش یافته است.

جدول ۱- درصد تغییر تلاش و پاسخ‌های سازه نسبت به حالت قرارگیری جاذب‌های انرژی قرار گرفته در یک-چهارم طول دیوار از لبه نسبت به میانه دیوار

درصد تغییرات (افزایش یا کاهش) پارامتر			سطح زلزله	پاسخ یا تلاش
NF-non Pulselike	NF-Pulselike	FF		
2.5	5.7	4.2	DBE	حداکثر
-3.0	8.2	4.2	MCE	دریافت
-10.9	-12.7	-11.4	DBE	حداکثر خمش
-16.8	-16.2	-15.1	MCE	
-9.5	-12.9	-10.7	DBE	حداکثر برش
-13.8	-18.5	-12.3	MCE	
77.0	32.5	39.9	DBE	دریافت پسماند
79.4	76.0	53.5	MCE	
1.0	2.1	1.4	DBE	تنش تاندون
-0.3	0.1	1.9	MCE	
2.5	5.7	4.2	DBE	دریافت
-3.0	8.2	4.2	MCE	بام
-6.6	-6.6	-8.8	DBE	شتاب
-6.7	-6.6	-7.4	MCE	بام

جدول ۲- درصد تغییر تلاش و پاسخ‌های سازه نسبت به حالت قرارگیری جاذب‌های انرژی قرار گرفته در لبه دیوار نسبت به میانه دیوار

درصد تغییرات (افزایش یا کاهش) پارامتر			سطح زلزله	پاسخ یا تلاش
NF-non Pulselike	NF-Pulselike	FF		
3.2	7.4	4.0	DBE	حداکثر
-4.2	11.3	4.0	MCE	دریافت
-15.0	-17.7	-15.0	DBE	حداکثر خمش
-22.8	-22.4	-20.6	MCE	
-13.9	-17.5	-12.9	DBE	حداکثر برش
-18.5	-23.9	-15.7	MCE	
135.1	47.4	60.5	DBE	دریافت پسماند
55.8	359.8	47.0	MCE	
0.7	2.6	1.4	DBE	تنش تاندون
-0.3	-0.1	3.5	MCE	
3.2	7.4	4.0	DBE	دریافت
-4.2	11.3	4.0	MCE	بام
-0.4	-1.9	-2.4	DBE	شتاب
-1.9	-2.0	-1.7	MCE	بام

۵- نتیجه گیری

در این تحقیق به بررسی رفتار دیوارهای بتنی پایه-گهواره‌ای ۴، ۸، ۱۲، ۱۶ و ۲۰ طبقه پرداخته شده است. سازه‌های پایه-گهواره‌ای با قرارگیری جاذب‌های انرژی در لبه دیوار، فاصله یک چهارم طول دیوار از لبه و میانه دیوار قرار گرفته‌اند. سازه‌های موردنظر تحت رکوردهای دور و نزدیک گسل دارای پالس و بدون پالس مورد تحلیل تاریخچه-زمانی قرار گرفته‌اند. تحلیل‌ها در نرم‌افزار *OpenSees* به صورت دو بعدی با در نظر گرفتن خواص غیرخطی مصالح و هندسه انجام شده است. سازه‌های مورد نظر در دو سطح زلزله *MCE* و *DBE* مورد تحلیل قرار گرفته‌اند. نتایج کلی این تحقیق به صورت زیر است:

- در بیشتر رکوردهای لرزه‌ای، با فاصله گرفتن جاذب‌های انرژی از میانه دیوار، مقادیر حداکثر دررفت سازه افزایش یافته‌است. البته مقادیر تغییرات حداکثر دررفت جزئی و قابل صرف نظر است. سازه‌ها تحت *NF-Pulselike* تغییرات دررفت حداکثر و دررفت بام بیشتری را نسبت به سایر رکوردها با تغییر محل جاذب‌های انرژی متحمل می‌شوند.
 - با افزایش فاصله جاذب‌های انرژی از میانه دیوار، لنگر و برش دیوار یافته‌است. به صورت میانگین در دو سطح خطر لرزه‌ای مورد بررسی، در دو حالت مورد بررسی جاذب‌های انرژی نسبت به حالت میانه دیوار، مقادیر خمش و برش دیوار دارای تغییراتی بیش از ۱۰ درصد را دارد.
 - با افزایش فاصله جاذب‌های انرژی از میانه دیوار، مقادیر دررفت پسماند بام افزایش می‌یابد. با افزایش شدت زلزله، مقادیر دررفت پسماند بام به طور چشم‌گیری افزایش می‌یابد. به طور کلی دررفت‌های پسماند به شدت حساس به محل قرارگیری جاذب‌های انرژی هستند ولی در بیشتر موارد مقدار آن از مقدار مجاز تجاوز نمی‌کند.
 - با ایجاد فاصله جاذب‌های انرژی از میانه دیوار، مقادیر تنش در کابل‌ها زیاد تغییری نمی‌کند.
 - در دو سطح زلزله مورد بررسی، دررفت بام تحت رکوردهای *NF-Pulselike* بیشتر از سایر رکوردها است.
 - با افزایش فاصله جاذب‌های انرژی از میانه دیوار، شتاب‌های بام کاهش یافته‌است. به صورت میانگین در دو سطح خطر لرزه‌ای مورد بررسی، در دو حالت مورد بررسی جاذب‌های انرژی نسبت به حالت میانه دیوار، مقادیر تغییرات شتاب بین ۵ تا ۱۰ درصد است.
 - مقادیر تغییرات دررفت پسماند سازه‌ها با تغییر محل جاذب‌های انرژی تحت رکوردهای *NF-Pulselike* و سطح *DBE* کمتر از سایر رکوردهای است در صورتی که در سطح *MCE* مقادیر تغییرات دررفت پسماند به طور قابل مشاهده‌ای نسبت به سایر رکوردها افزایش یافته است.
- سیستم‌های دوگهواره‌ای و گهواره‌ای چندگانه می‌توانند جزء سیستم‌های نوین لرزه‌ای و جایگزینی مناسب سیستم‌های سازه‌ای متداول آیین‌نامه‌ای و حتی دیوارهای پایه-گهواره‌ای انتخاب گردند. موقعیت قرارگیری جاذب‌های انرژی در این سیستم‌ها نیز می‌تواند در نتایج لرزه‌ای آن‌ها تاثیرگذار باشد. هم‌چنین توسعه الگوریتم‌های یادگیری ماشین [۳۶] به‌منظور پیش‌بینی رفتار سازه‌های پایه-گهواره‌ای، دوگهواره‌ای و گهواره‌ای چندگانه می‌تواند جالب توجه باشد. در تحقیقات آتی به این موضوعات پرداخته شود.

۶- مراجع

- [1] E. Mohammadi Dehcheshmeh and V. Broujerdian, "Probabilistic Evaluation of Self-Centering Biorocking Walls Subjected to Far-Field and Near-Field Ground Motions," *J. Struct. Eng.*, vol. 148, no. 9, p. 4022134, 2022.
- [2] M. J. E. Majumerd, E. M. Dehcheshmeh, V. Broujerdian, and S. Moradi, "Self-centering rocking dual-core braced frames with buckling-restrained fuses," *J. Constr. Steel Res.*, vol. 194, p. 107322, 2022.
- [3] M. J. Ebrahimi Majumerd and others, "Feasibility study of using endurance time method for seismic evaluation of self-centering buckling restrained braced frame (SC-BRC-BF),"

Modares Civ. Eng. J., vol. 22, no. 2, p. 0, 2022.

- [4] M. Rafiei Mohammadi, V. Broujerdian, and E. Mohammadi Dehcheshmeh, "Optimized design of bi-rocking steel braced frames; changing second rocking joint location," *Sharif J. Civ. Eng.*, 2023, doi: 10.24200/j30.2022.61242.3156.
- [5] E. Mohammadi Dehcheshmeh and V. Broujerdian, "Seismic Design Coefficients of Self-Centering Multiple Rocking Walls Subjected to Effect of Far and Near-Field Earthquakes," *Civ. Infrastruct. Res.*, vol. 7, no. Issue 1 (In progress), 2021, doi: 10.22091/cer.2021.7025.1257.
- [6] J. Wang and W. Zhou, "Experimental and numerical response of unbonded post-tensioned rocking wall under lateral cyclic loading," *J. Build. Eng.*, p. 105827, 2023.
- [7] G. W. Housner, "The behavior of inverted pendulum structures during earthquakes," *Bull. Seismol. Soc. Am.*, vol. 53, no. 2, pp. 403–417, 1963.
- [8] M. Aslam, W. G. Godden, and D. T. Scalise, "Earthquake rocking response of rigid bodies," *J. Struct. Div.*, vol. 106, no. 2, pp. 377–392, 1980.
- [9] M. J. N. Priestley, "Overview of PRESSS research program," *PCI J.*, vol. 36, no. 4, pp. 50–57, 1991.
- [10] J. I. Restrepo, J. Mander, and T. J. Holden, "New generation of structural systems for earthquake resistance," in *NZSEE 2001 Conference*, 2001.
- [11] F. J. Perez, S. Pessiki, and R. Sause, "Seismic Design of Unbonded Concrete Walls with Vertical Joint Connectors," *PCI J.*, vol. 49, no. 1, pp. 58–79, 2004, doi: 10.15554/pcij.01012004.58.79.
- [12] R. S. Henry, S. Sritharan, and J. M. Ingham, "Finite element analysis of the PreWEC self-centering concrete wall system," *Eng. Struct.*, vol. 115, pp. 28–41, 2016, doi: 10.1016/j.engstruct.2016.02.029.
- [13] R. S. Henry, S. Sritharan, and J. M. Ingham, "Residual drift analyses of realistic self-centering concrete wall systems," *Earthq. Struct.*, vol. 10, no. 2, pp. 409–428, 2016, doi: 10.12989/eas.2016.10.2.409.
- [14] M. Sadeghi, F. Jandaghi Alaei, H. A. Bengar, and A. Jafari, "Hysteresis Behavior of Hybrid Rocking Walls: An Analytical Method," *Pract. Period. Struct. Des. Constr.*, vol. 28, no. 1, p. 4022064, 2023.
- [15] M. Sadeghi, F. Jandaghi Alaei, H. Akbarzadeh Bengar, and A. Jafari, "Evaluating the efficiency of supplementary rebar system in improving hysteretic damping of self-centering rocking walls," *Bull. Earthq. Eng.*, vol. 20, no. 11, pp. 6075–6107, 2022.
- [16] N. Abbasi, H. Akbarzadeh Bengar, A. Jafari, and M. Nazari, "Numerical modeling of seismic response and damage estimation of concrete rocking walls under seismic loading," *Sharif J. Civ. Eng.*, vol. 37, no. 2.2, pp. 35–45, 2021.
- [17] X. Lu, B. Yang, and B. Zhao, "Shake-table testing of a self-centering precast reinforced concrete frame with shear walls," *Earthq. Eng. Eng. Vib.*, vol. 17, no. 2, pp. 221–233, 2018, doi: 10.1007/s11803-018-0436-y.
- [18] T. Sun, Y. C. Kurama, P. Zhang, and J. Ou, "Linear-elastic lateral load analysis and seismic design of pin-supported wall-frame structures with yielding dampers," *Earthq. Eng. Struct. Dyn.*, vol. 47, no. 4, pp. 988–1013, 2018, doi: 10.1002/eqe.3002.
- [19] G. Wu, D.-C. Feng, and C.-L. Wang, "Prefabricated Rocking Wall Structural System," in *Novel Precast Concrete Structure Systems*, Springer, 2023, pp. 199–228.
- [20] G. Guo, L. Qin, D. Yang, and Y. Liu, "Dimensional response analysis of rocking wall-frame building structures with control devices subjected to near-fault pulse-like ground motions," *Eng. Struct.*, vol. 220, p. 110842, 2020.
- [21] A. A. Shahmansouri, H. Akbarzadeh Bengar, and A. Jafari, "Modeling the lateral behavior of concrete rocking walls using multi-objective neural network," *J. Concr.*

Struct. Mater., vol. 5, no. 2, pp. 110–128, 2020.

- [22] V. Broujerdian and E. Mohammadi Dehcheshmeh, "Development of fragility curves for self-centering base-rocking walls subjected to far and near field ground motions," *Sharif J. Civ. Eng.*, 2021, doi: 10.24200/j30.2021.57279.2897.
- [23] V. Broujerdian and E. Mohammadi Dehcheshmeh, "Investigation of the Behavior of Self-Centering Base- and Double- Rocking Walls Subjected to Far-Field and Near-Field Earthquakes," *Ferdowsi Civ. Eng.*, 2021, doi: 10.22067/jfcei.2021.68094.1008.
- [24] E. Mohammadi Dehcheshmeh and V. Broujerdian, "Determination of optimal behavior of self-centering multiple-rocking walls subjected to far-field and near-field ground motions," *J. Build. Eng.*, p. 103509, 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2021.103509>.
- [25] V. Broujerdian and E. Mohammadi Dehcheshmeh, "Locating the rocking section in self-centering bi-rocking walls to achieve the best seismic performance," *Bull. Earthq. Eng.*, 2022, doi: 10.1007/s10518-022-01325-y.
- [26] E. Mohammadi Dehcheshmeh and V. Broujerdian, "The effects of rotational components of near-fault earthquakes on self-centering base-rocking walls," *Bull. Earthq. Sci. Eng.*, 2021.
- [27] E. Mohammadi Dehcheshmeh and V. Broujerdian, "Investigation of the leaning column effect on estimating of the responses of self-centering base-rocking walls under far-and near-field ground motions," *Civ. Infrastruct. Res.*, 2022.
- [28] L. Wiebe and C. Christopoulos, "Mitigation of higher mode effects in base-rocking systems by using multiple rocking sections," *J. Earthq. Eng.*, vol. 13, no. 1 SUPPL. 1, pp. 83–108, 2009, doi: 10.1080/13632460902813315.
- [29] M. Khanmohammadi and S. Heydari, "Seismic behavior improvement of reinforced concrete shear wall buildings using multiple rocking systems," *Eng. Struct.*, vol. 100, pp. 577–589, 2015, doi: 10.1016/j.engstruct.2015.06.043.
- [30] D. Pennucci, G. M. Calvi, and T. J. Sullivan, "Displacement-based design of precast walls with additional dampers," *J. Earthq. Eng.*, vol. 13, no. S1, pp. 40–65, 2009.
- [31] J. I. Restrepo and A. Rahman, "Seismic Performance of Self-Centering Structural Walls Incorporating Energy Dissipators," *J. Struct. Eng.*, vol. 133, no. 11, pp. 1560–1570, 2007, doi: 10.1061/(ASCE)0733-9445(2007)133:11(1560).
- [32] FEMA, FEMA P695: Quantification of building seismic performance factors. US Department of Homeland Security, FEMA, 2009.
- [33] M. Archila, "Directionality effects of pulse-like near field ground motions on seismic response of tall buildings." University of British Columbia, 2014.
- [34] ASCE/SEI 7, "Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures (ASCE/SEI 7-10).," 2010.
- [35] F. C. Blebo and D. A. Roke, "Seismic-resistant self-centering rocking core system with buckling restrained columns," *Eng. Struct.*, vol. 173, pp. 372–382, 2018.
- [36] A. Farzinpour, E. Mohammadi Dehcheshmeh, V. Broujerdian, S. Nasr Esfahani, and A. H. Gandomi, "Efficient boosting-based algorithms for shear strength prediction of squat RC walls," *Case Stud. Constr. Mater.*, vol. 18, p. e01928, 2023, doi: <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2023.e01928>.