

**E. Mohammadi
Dehcheshmeh**

Iran University of Science
and Technology, Tehran,
Iran.

e-mail:
esmaeil_mohammadi@civileng.iust.ac.ir

V. Broujerdian*

Iran University of Science
and Technology, Tehran,
Iran.

e-mail:
broujerdian@iust.ac.ir

Investigation of the Leaning Column Effect on Estimating of the Responses of Self-Centering Base-Rocking Walls under Far and Near Field Ground Motions

In this research, the effect of P-Delta column (leaning column) on the response of gravitational frames with lateral-load resistance system of base-rocking wall has been investigated. The studied structures have 4-, 8-, 12-, 16-, and 20-stories. Nonlinear dynamic behavior is performed under 22 far-field seismic records and 28 near-field seismic records, half of which are pulse-like, via OpenSees software. The ground motions are scaled at both DBE and MCE levels and applied to the structure. The modeling is done in two dimensions. As a results, it has been shown that 1) the higher modes effect increases with increasing earthquake intensity, 2) the higher modes effect are more visible in the records of far-field and near-field-non pulse-like, 3) residual displacements in The both earthquake levels studied are insignificant and negligible, 4) P-Delta column has been more effective in structures under near-field-pulse-like records, 5) The maximum effect of P-Delta column in increasing the moment of wall under near-field-pulse-like earthquake that the value is 12%, and 6) In general, the effect of the P-Delta column on the base-rocking wall structures in especially the stepping-wall can be ignored.

Keywords: Self-centering system, Rocking wall, Residual displacement, Leaning column effect, Higher mode effect.

* Corresponding author

Received 07 March 2022, Revised 04 August 2022, Accepted 10 August 2022.

DOI: 10.22091/cer.2022.7994.1373

بررسی اثر ستون متکی در برآورد پاسخ‌های دیوارهای پایه - گهواره‌های مرکزگرا تحت رکوردهای حوزه دور و نزدیک گسل

در این تحقیق به بررسی اثر ستون پی-دلتا (ستون متکی) در پاسخ قاب‌های ثقلی دارای سیستم باربر جانبی دیوار پایه-گهواره‌ای پرداخته است. سازه‌های مورد بررسی دارای تعداد طبقات ۴، ۸، ۱۲، ۱۶ و ۲۰ طبقه هستند. رفتار دینامیکی غیرخطی تحت ۲۲ رکورد لرزه‌ای دور و ۲۸ رکورد لرزه‌ای نزدیک گسل که نیمی از آن‌ها دارای پالس هستند، در نرم‌افزار OpenSees انجام شده است. رکوردهای موردنظر در دو سطح DBE و MCE مقیاس شده و به سازه اعمال می‌شوند. مدل‌سازی به صورت دوبعدی انجام گرفته است. در این تحقیق نشان داده شده است که (۱) اثر موده‌های بالاتر با افزایش شدت زلزله افزایش می‌یابد، (۲) اثرات موده‌های بالاتر به صورت افزایش خمش و برش در دیوار در رکوردهای دور و نزدیک گسل بدون پالس بیشتر قابل مشاهده است، (۳) جابجایی‌های پسماند در دو سطح زلزله مورد بررسی ناچیز و قابل صرف نظر است، (۴) ستون پی-دلتا بیشتر در سازه‌ها تحت رکوردهای نزدیک گسل دارای پالس موثر بوده است، (۵) حداکثر اثر ستون پی-دلتا در افزایش لنگر خمشی دیوار تحت زلزله نزدیک گسل دارای پالس است که مقدار آن ۱۲ درصد است و (۶) به صورت کلی اثر ستون پی دلتا در سازه‌های دیوار پایه-گهواره‌ای به صورت ویژه دیوارهای گام بردارم قابل صرف نظر است.

واژگان کلیدی: سیستم مرکزگرا، دیوار گهواره‌ای، تغییرشکل پسماند، اثر ستون متکی، اثر موده‌های بالاتر.

اسماعیل محمدی

ده‌چشمه

دانشکده مهندسی عمران،

دانشگاه علم و صنعت ایران.

پست الکترونیک:

esmaeil_mohammadi@civileng.iust.ac.ir

وحید بروجردیان*

دانشکده مهندسی عمران،

دانشگاه علم و صنعت ایران.

پست الکترونیک:

broujerdian@iust.ac.ir

۱- مقدمه

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 به‌همراه بازشوندگی در سیستم است [۱].

دیوارهای گهواره‌ای یکی از سیستم‌های متداول مرکزگرا هستند که در آن‌ها هر دو مکانیزم نیروی بازگرداندگی و جذب انرژی در سیستم تأمین می‌شود. مکانیزم نیروی بازگرداندگی در سیستم با استفاده از پیش‌تنیده کردن کابل‌های اتصالی دیوار به فونداسیون و یا بلوک‌های گهواره‌ای به یکدیگر تأمین می‌شود. کابل‌ها همواره با ایجاد نیروی بازگرداندگی و ایجاد بازشوندگی

سیستم‌های مرکزگرا تحت بارهای جانبی، با خصوصیات رفتاری مشخص برای تحمل بارهای جانبی در نظر گرفته می‌شوند. این خصوصیت‌ها شامل (۱) تأمین مکانیزم نیروی بازگرداندگی^۲ و (۲) تأمین مکانیزم جذب انرژی^۳ هستند. هدف این دو مکانیزم در سازه، ایجاد منحنی‌های پرچمی شکل نیرو-جابجایی تحت بارهای جانبی رفت و برگشتی است. هدف استفاده از مکانیزم

* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۴۰۰/۱۲/۱۶، بازنگری ۱۴۰۱/۰۵/۱۳، پذیرش ۱۴۰۱/۰۵/۱۹.

(DOI): 10.22091/cer.2022.7994.1373 شناسه دیجیتال

² Restoring Force Mechanism

³ Energy Dissipation Options

استفاده شده است. نتیجه مهمی که در این تحقیق بدست آمد، کاهش غیریکنواختی در تغییرشکل نسبی طبقات مخصوصاً برای طبقات نرم احتمالی و کاهش نامنظمی در یک سازه نامنظم بود.

هنری و همکاران [۸] در دیوارهای مرکزگرای گهواره‌ای برای جلوگیری از خردشدگی بتن در لبه‌ها، از خاموت‌های اسپیرال و به منظور افزایش محصورشدگی استفاده کردند. کرنش فشاری نهایی در نظر گرفته شده بتن برای محاسبه مقاومت خمشی دیوار گهواره‌ای، ۰/۰۰۵ پیشنهاد شده است. هم‌چنین محققان [۹] نشان دادند این دیوارها می‌توانند مقاومت جانبی خود را، تا دریافت ۳ درصد بام، بدون ایجاد مفصل پلاستیک حفظ نمایند.

رستریو^۹ و همکاران [۱۰] به طراحی سیستم دیوار برشی بتنی پیش‌ساخته با المان‌های پیش‌تنیده پرداختند. آنها نشان دادند که 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^{۱۰} و همکاران [۱۱]، تلاش‌هایی برای تحلیل رفتار این سیستم با استفاده از روش فرم بسته^{۱۱} انجام دادند و معیارهایی برای طراحی این سیستم‌ها ارائه کردند. در برخی از مطالعات عددی انجام شده، 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.

محققان [۱۴]، رفتار چرخه‌ای دیوارهای مرکزگرای گهواره‌ای با لحاظ پارامترهای مختلف دیوار بررسی شده است. نتایج تحقیق مزبور نشان داد که برای افزایش کارایی سیستم، بهتر است مساحت جاذب‌های انرژی

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 هسته‌ی 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 غیره استفاده شوند [۱].

هاوسنر^۴ [۲] در سال ۱۹۶۳ مطالعات اولیه بر روی پاسخ دینامیکی حرکت گهواره‌ای بلوک‌های صلب و بر روی یک پایه تخت انجام داد. نتایج نشان داد، قابلیت واژگونی بلوک‌ها با مقطع مربع، با نسبت ارتفاع به عرض بلوک متناسب است. اسلم^۵ و همکاران [۳] در سال ۱۹۸۰ نشان دادند که برای افزایش مقاومت در حالت بلندشدگی، می‌توان سازه صلب را به زمین مهار کرد. این مهارها می‌تواند به وسیله کابل‌های پیش‌تنیده انجام پذیرد که این موضوع باعث عملکرد مناسب سازه تحت تحریک‌های زلزله می‌شود. استفاده از دیوارهای با عملکرد گهواره‌ای در سازه‌ها، اولین بار توسط پریستلی^۶ و همکاران [۴] در سال ۱۹۹۱ صورت گرفت.

کوراما و پیسیکی^۷ [۵] میلگرد معمولی در پای دیوار را به عنوان جاذب انرژی استفاده کردند و نشان دادند که می‌توان بعد از زلزله به راحتی این فیوزها را تعویض کرد. پژوهشگران، انواع فیوزهای فلزی با شکل‌های مختلف را با تحلیل اجزای محدود مورد بررسی قرار دادند و رفتار فیوز بهینه را تعیین کردند [۶]. وادا^۸ و همکاران [۷] سازه با دیوارهای پایه مفصلی را بررسی کردند. در این تحقیق از میراگرهای فولادی برای اتلاف انرژی در سازه

⁴ Housner

⁵ Aslam

⁶ Priestley

⁷ Kurama and Pessiki

⁸ Wada

⁹ Restrepo

¹⁰ Perez

¹¹ Closed-form

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.

محققان [۲۰] به بررسی سیستم دیوار گهواره‌ای با ستون‌های انتهایی پرداختند. این تحقیق به صورت آزمایشگاهی با بکارگیری جاذب‌های انرژی O شکل پرداخته شده است. در این تحقیق جداسازی سقف طبقات و سیستم دیوارگهواره‌ای دوران کننده به درستی انجام شده است. سیستم‌های معرفی شده تا جابجایی نسبی ۵ درصد نیز می‌توانند مقاومت خود را حفظ نمایند. در پایان توصیه‌هایی برای جداسازی سیستم سازه‌ای دیوار گهواره‌ای و سقف ساختمان شده است.

اجرب^{۱۴} و همکاران [۲۱]، دیوار پایه-گهواره‌ای را داخل یک سازه قاب خمشی قرار داده و اثر عرض دیوار را بر روی جابجایی‌های نسبی طبقات بررسی کردند. نتایج نشان داد با افزایش عرض دیوار جابجایی‌های نسبی طبقات میانی یکنواخت‌تر می‌شود.

بروجردیان و محمدی ده‌چشمه به بررسی رفتار احتمالاتی دیوارهای پایه-گهواره‌ای [۲۲] و دوگهواره‌ای [۲۳] مرکزگرا 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 تحقیق‌ها، تعیین و کاهش اثرات مودهای بالاتر به صورت خمش و برش در هسته دیوار پایه-گهواره‌ای بوده است. به منظور کاهش اثرات مودهای بالاتر در سیستم‌های مورد نظر آنها دیوارهای گهواره‌ای دوگانه [۲۴]، گهواره‌ای چهارگانه [۲۵]، گهواره‌ای چندگانه [۱] و دوگهواره‌ای [۲۳] و [۲۶] را پیشنهاد دادند. در این تحقیقات سازه‌های موردنظر با ارتفاع‌های مختلف تحت

افزایش یابد. همچنین می‌توان دریافت سازه را با افزایش نسبت ابعادی دیوار و افزایش نسبت پیش‌تنیدگی اولیه، کاهش داد. با افزایش پیش‌تنیدگی کابل‌ها و یا افزایش سختی الاستیک کابل‌ها، می‌توان دوران بلوک گهواره‌ای و سرعت زاویه‌ای دیوار را کاهش داد. همچنین با افزایش میراگر در سیستم، ظرفیت استهلاک انرژی در سیستم افزایش می‌یابد [۱۵].

بادیکا و ویجی ویکراما^{۱۲} [۱۶] به مقایسه دیوارهای گهواره‌ای مرکزگرا با دیوارهای متداول در دو سطح زلزله طرح و زلزله حداکثر محتمل پرداخته‌اند. دیوارهای گهواره‌ای مرکزگرا در مقایسه با دیوارهای متداول، آسیب‌های سازه‌ای کمتری را متحمل می‌شوند ولی جابجایی‌های حداکثر در این سیستم‌ها بیشتر است. علاوه بر این آسیب‌پذیری اجزای غیر سازه‌ای در دیوار گهواره‌ای، به علت ایجاد شتاب‌های زیاد بیشتر است. همچنین نشان داده شده است که اثر مؤلفه قائم زلزله در سیستم دیوار گهواره‌ای و دیوار برشی متداول بر روی پاسخ‌های سازه ناچیز است.

پژوهشگران [۱۷] نشان دادند در سیستم دیوارهای گهواره‌ای مرکزگرا به علت سختی بالای هسته گهواره‌ای، جابجایی ایجادشده در طبقات یکنواخت است. در بیشتر تحقیقات، خرابی‌ها به علت بازشدگی قسمت پایه دیوار است و آسیب‌دیدگی 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 دیوارهای گهواره‌ای مرکزگرا در سیستم‌های متداول سازه‌ای، می‌تواند از وقوع طبقه نرم جلوگیری کند [۱۸].

گیوو^{۱۳} و همکاران [۱۹] به تحلیل ابعادی سیستم‌های دیوار مرکزگرا تحت رکوردهای نزدیک گسل

¹² Buddika and Wijeyewickrema

¹³ Guo

¹⁴ Ajrab

بارگذاری‌های لرزه‌ای رکوردهای دور از گسل، نزدیک گسل دارای پالس و بدون پالس مورد بررسی قرار گرفت و سازه‌های بهینه در هریک از تحقیقات مشخص شد. در ادامه این تحقیقات آنها به بررسی اثرات مولفه‌ی دورانی زلزله بر روی آن سازه‌ها پرداختند [۲۷]. نتایج نشان داد لحاظ مؤلفه دورانی زلزله می‌تواند پاسخهای سازه را افزایش دهد. به طوری که حداکثر شتاب، جابجایی نسبی، خمش، برش طبقات، جابجایی نسبی پسماند بام و نسبت تنش حداکثر کابل به ترتیب برابر با $۲۴/۶$ ، $۹/۳$ ، $۱۰/۴$ ، $۹/۶$ و ۶۲۳ درصد با لحاظ مؤلفه دورانی زلزله به صورت حداکثر، افزایش یافته است.

ستون پی- دلتا (ستون متکی) برای مدل‌سازی سازه‌هایی که دارای قاب‌های میانی ثقلی هستند، مورد استفاده قرار می‌گیرد. در اصل با استفاده از این ستون، اثرات سه بعدی قاب‌های دارای قاب میانی ثقلی را در تحلیل‌های دوبعدی می‌توان در نظر گرفت. ستون پی- دلتا با توجه به اینکه ناحیه غیرخطی سازه‌های مختلف را تحت تاثیر قرار می‌دهد، ممکن است که ناپایداری در سیستم به علت بارهای ثقلی بالا ناحیه میانی ایجاد کند. این موضوع نیز در تحقیقات مختلف دیوارهای گهواره‌ای مرکزگر در نظر گرفته شده است [۲۲ و ۲۷].

مدل‌سازی ستون پی- دلتا می‌تواند دارای پیچیدگی‌های خاص، افزایش زمان محاسباتی تحلیل‌ها، هدر رفتن زمان به علت برآورد نیروهای اعمالی به این ستون و اشتباهات محاسباتی نیروها، می‌شود. در این تحقیق مدل‌های دیوارهای مرکزگرای گهواره‌ای (گام بردار) دارای طبقات ۴، ۸، ۱۲، ۱۶ و ۲۰ طبقه با لحاظ و بدون لحاظ اثر پی- دلتا با استفاده از نرم‌افزار OpenSees پرداخته است. تحلیل‌ها در این نرم‌افزار با در نظر گرفتن خواص غیرخطی مصالح و هندسه انجام شده است. 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

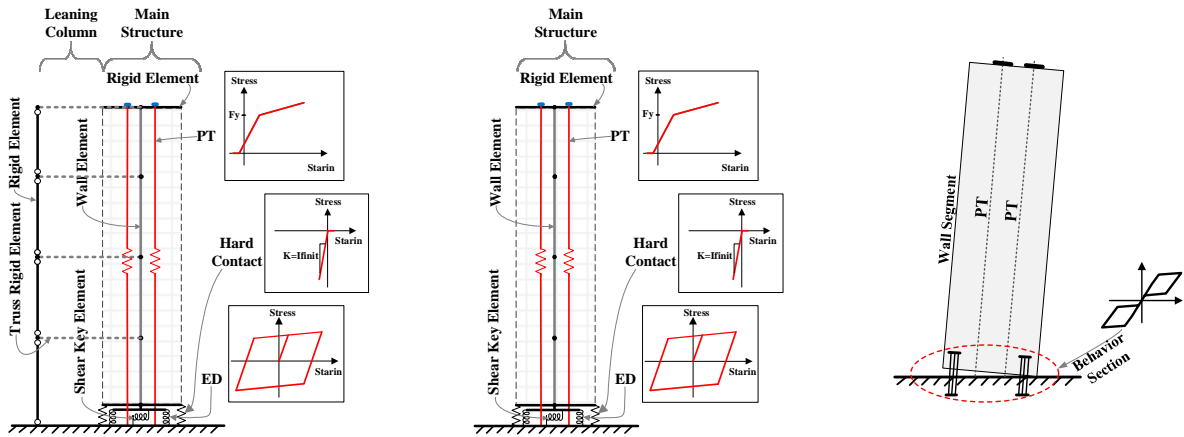
پالس (NF-non Pulselike) پرداخته می‌شود. مدل‌سازی‌ها در نرم‌افزار به صورت دوبعدی و به صورت ریزمدل‌سازی انجام می‌شود. در پایان پاسخهای سازه‌ها در مقابل رکوردهای لرزه‌ای مختلف مورد بررسی قرار گرفته است.

۲- روش تحقیق

۲-۱- نحوه مدل‌سازی سیستم‌های گهواره‌ای

برای مدل‌سازی نرم‌افزاری می‌بایست یک سری فرضیات اولیه انجام شود و نیز مدل‌سازی به صورت ساده‌سازی تعریف گردد. شکل ۱- الف دیوار گهواره‌ای چندگانه را نشان داده 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 ورژن v3.3.0 [۲۸] از مصالح و المان‌های مختلف استفاده می‌شود. شکل‌های ۱- ب و ۱- پ به ترتیب مدل‌سازی سازه دیوار گهواره‌ای بدون و با ستون متکی (ستون P-Delta) را نشان می‌دهد. در شکل‌های ۱- ب و ۱- پ مدل‌سازی هسته دیوار به صورت الاستیک در نظر گرفته شده است [۲۶]. با توجه به مقالات گذشته [۲۹-۳۱] چون در طراحی اجازه غیرخطی شدن بتنی داده نشده است می‌توان این فرض را صحیح دانست و سپس تنش در بتن مورد بررسی قرار گرفته و این موضوع اثبات شود. در انتهای دیوار جهت اتصال به یکدیگر و پایه با PTها و EDها و همچنین فنرهای تماسی سخت از المان‌های اتصال‌دهنده صلب استفاده شده است. برای مدل‌سازی سطوح تماس بلوک‌ها که به صورت 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 EDها به صورت فنر Zero Length

جهت جذب انرژی بین بلوک‌های گهواره‌ای و بلوک گهواره‌ای و پایه مورد استفاده قرار گرفته است.



(ب) مدل تحلیلی دیوار با ستون متکی

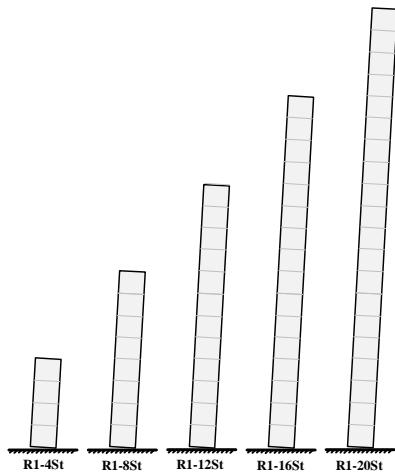
(ب) مدل تحلیلی دیوار بدون ستون متکی

(الف) مدل فیزیکی دیوار

شکل ۱- مدل نرم‌افزاری دیوار گهواره‌ای مرکز‌گرای

۲-۲- مشخصات مدل‌های عددی

مدل‌های عددی مورد بررسی در این مقاله، دارای ساختمان مشابه پلان شکل ۲ و دارای تعداد طبقات ۴، ۸، ۱۲، ۱۶ و ۲۰ است [۳۲]. مدل‌های مورد بررسی دارای ارتفاع‌های مختلف مطابق شکل ۳ 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 $E_s = 195GPa$ می‌باشند. ارتفاع طبقات برابر با ۳۵۰۰ میلی‌متر در نظر گرفته شده است.

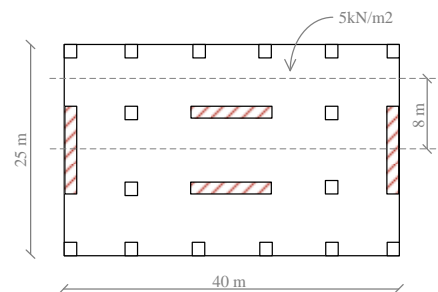


شکل ۳- دیوارهای گهواره‌ای چندگانه منظم در ارتفاع موردنظر

این تحقیق [۲۲]

۳-۲- صحت سنجی روند مدل‌سازی عددی

صحت سنجی سیستم گهواره‌ای در تحقیق [۲۲] توسط نویسندگان تحقیق حاضر، مطابق تحقیق [۳۳] انجام شده است. مشخصات نمونه‌ی آزمایشگاهی شامل: ضخامت دیوار ۱۲۵ میلی‌متر و مقاومت فشاری بتن $f'_c = 45MPa$ مشخصات آرماتورهای طولی و عرضی $f_y = 460MPa$ و $E_s = 200GPa$ هم‌چنین کابل‌های پیش‌تنیده دارای $f_y = 1435MPa$ و $E_s = 180GPa$ است. در تحقیق [۲۲] نتایج حاکی از دقت مناسب مدل‌سازی است.



شکل ۲- پلان سازه با دیوارهای دارای رفتار گهواره‌ای [۲۶]

0.2T1 الی 1.5T1 میانه طیف رکوردها به طیف طراحی مقیاس می‌گردد.

۳- نتایج تحقیق

۳-۱- حداکثر جابجایی نسبی میان طبقه‌ای

میانه حداکثر جابجایی نسبی میان طبقه‌ای سازه‌ها در سطح زلزله MCE با تعداد طبقات مختلف در شکل ۴ نشان داده شده است. این شکل رکوردهای مختلف در حالت بدون اثر پی-دلتا و با اثر پی-دلتا (نمودارهای دارای PD) را بیان می‌کند. در بیشتر سازه‌ها (به جز سازه ۲۰ طبقه)، رکوردهای NF-non Pulselike مقادیر جابجایی نسبی بیشتری در سازه ایجاد می‌کنند. اختلاف نمودارهای با و بدون لحاظ اثر پی-دلتا در سطح زلزله MCE خیلی ناچیز است و این موضوع نیز در سطح DBE مشاهده می‌شود. لازم به ذکر است که اثر پی-دلتا همیشه باعث افزایش جابجایی نسبی طبقات نمی‌شود ولی به صورت کلی باعث افزایش جابجایی نسبی حداکثر طبقات می‌شود.

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 f و NF-non Pulselike مشاهده می‌شود). مشابه جابجایی نسبی طبقات، لحاظ اثر پی-دلتا همیشه باعث افزایش خمش در دیوار نمی‌شود ولی به صورت کلی این تلاش با در نظر گرفتن اثر پی-دلتا، افزایش می‌یابد.

۳-۳- حداکثر برش طبقات

میانه حداکثر برش طبقات دیوار تحت رکوردهای مختلف لرزه‌ای در سطح MCE در شکل ۷ نشان داده شده است.

صحت سنجی سیستم متداول آیین‌نامه‌ای در تحقیق [۱] توسط نویسندگان تحقیق حاضر، مطابق تحقیق [۳۴] انجام می‌شود ضخامت دیوار گهواره‌ای موردنظر، ۱۰۲ میلی‌متر است. مشخصات مکانیکی بتن شامل $f'_c = 42.8MPa$ و $E_c = 31.03GPa$ است، مشخصات آرماتورهای طولی و عرضی $f_y = 434MPa$ و $E_s = 200GPa$ استفاده شده است. در این مدل‌سازی از مقطع فایبر جهت مدل‌سازی مقطع دیوار استفاده شده است و در نواحی المان مرزی از بتن محصور شده استفاده شده است.

۲-۴- رکوردهای لرزه‌ای مورد بررسی

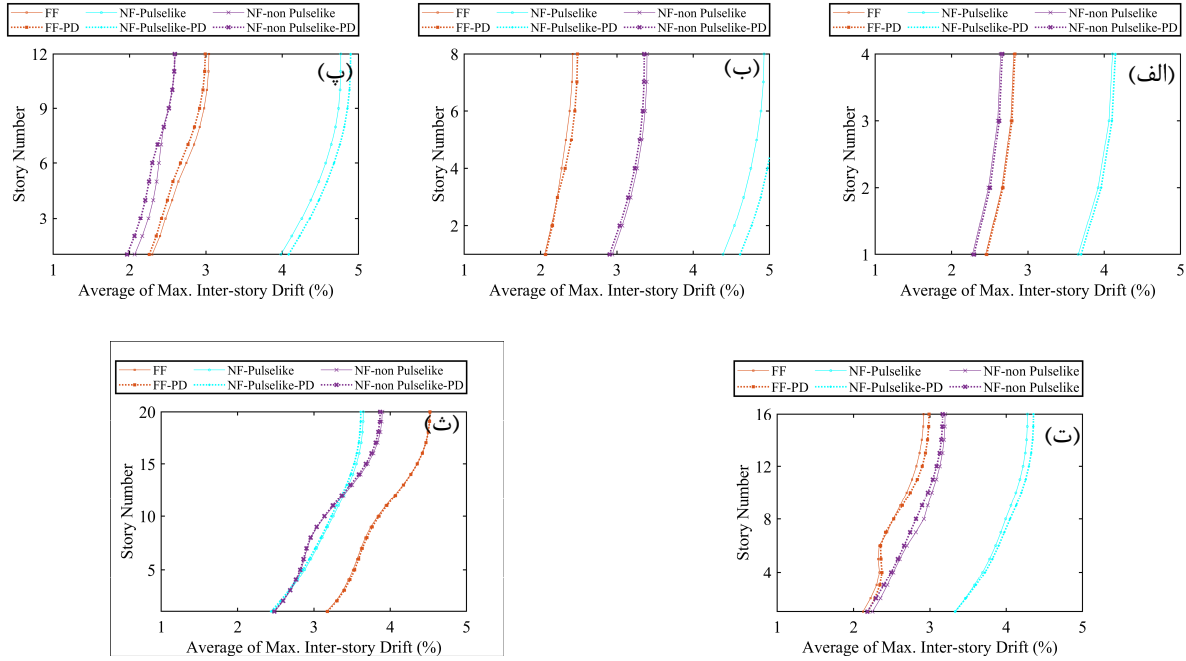
در این تحقیق از سه دسته رکورد دور (FF) و نزدیک گسل با پالس (NF-Pulselike) و بدون پالس (NF-non Pulselike) مطابق دستورالعمل FEMAP695 [۳۵] استفاده شده است. این رکوردها به تفکیک با مشخصات مربوطه در تحقیق [۲۲] نشان داده شده است. با توجه به این که رکوردهای افقی دارای دو مؤلفه می‌باشند و تحلیل‌های موردنظر این 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، مؤلفه جهت عمود بر گسل انتخاب شده است [۳۶].

برای مقیاس کردن رکوردهای لرزه‌ای مطابق دستورالعمل FEMAP695 ابتدا به نرمالایز کردن رکوردها پرداخته شده است. نرمالایز کردن مطابق رابطه ذیل انجام می‌شود:

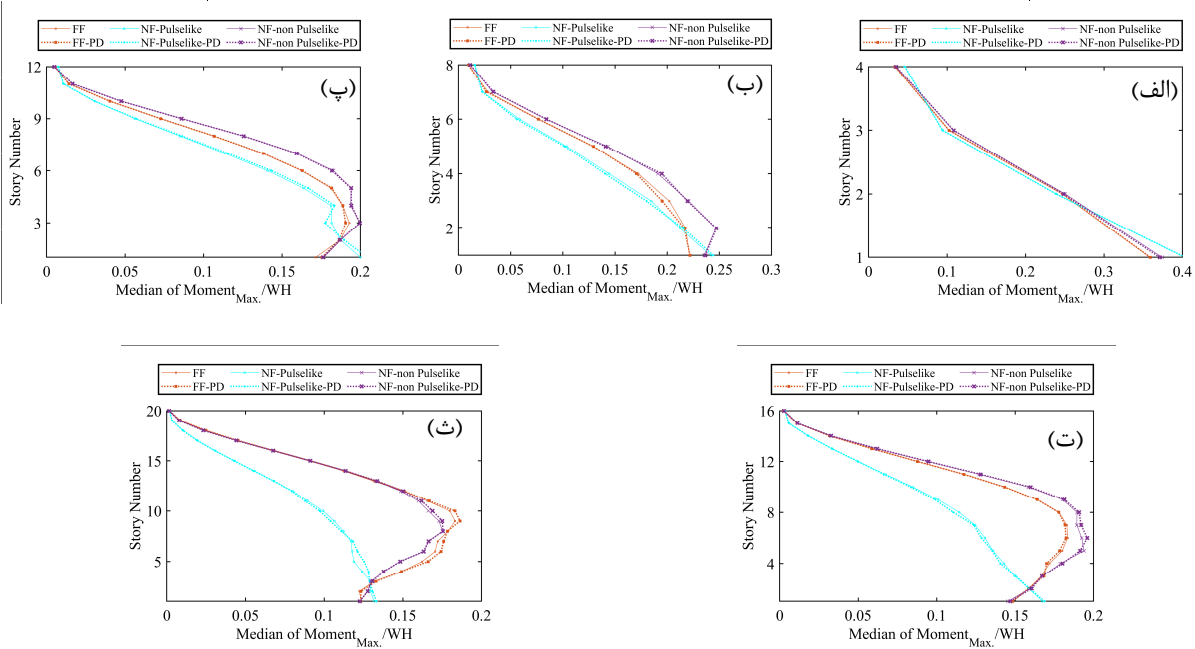
$$NM_i = Mean(PGV_{PEER,i}) / PGV_{PEER,i} \quad (1)$$

در رابطه فوق؛ NM_i مربوط به ضریب نرمالایز رکورد i ام، $PGV_{PEER,i}$ ماکزیمم شتاب افقی رکورد i ام و $Mean(PGV_{PEER,i})$ میانه مجموعه رکوردهای افقی مورد نظر است.

در شبیه‌سازی‌های دوبعدی، برای مقیاس رکوردها، معمولاً مطابق آیین‌نامه ASCE7 [۳۷] در محدوده



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



شکل ۵- میانه حداکثر خمش طبقات دیوار 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

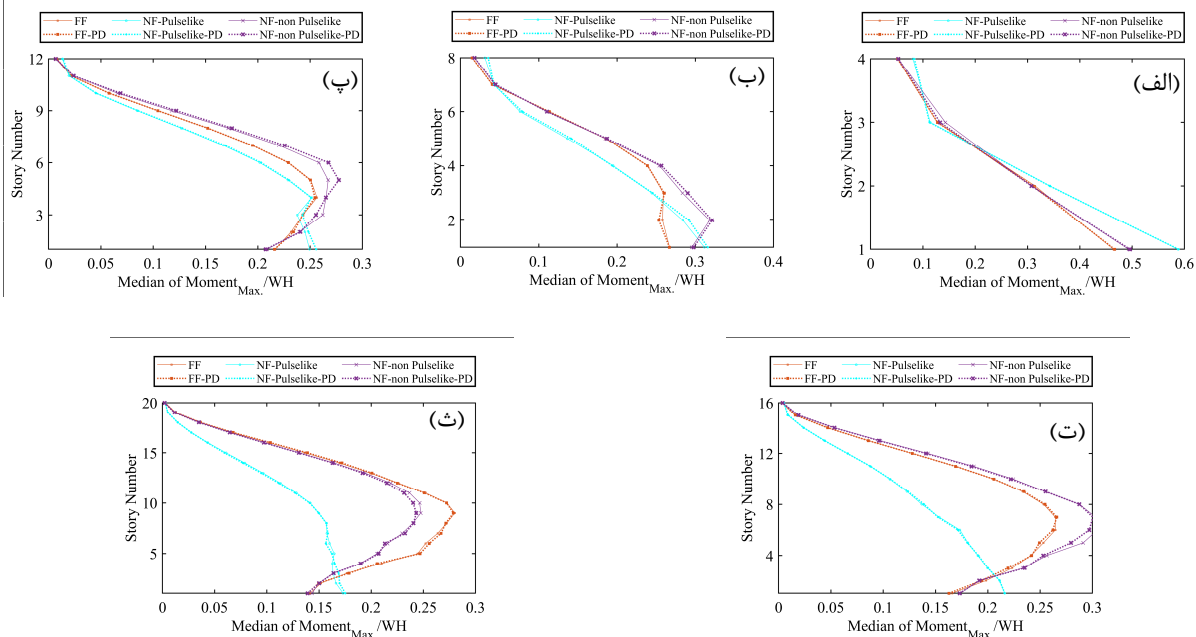
افزایش برش در دیوار نمی‌شود ولی به صورت کلی این تلاش با در نظر گرفتن اثر پی-دلتا، افزایش می‌یابد.

۴-۳- جابجایی پسماند

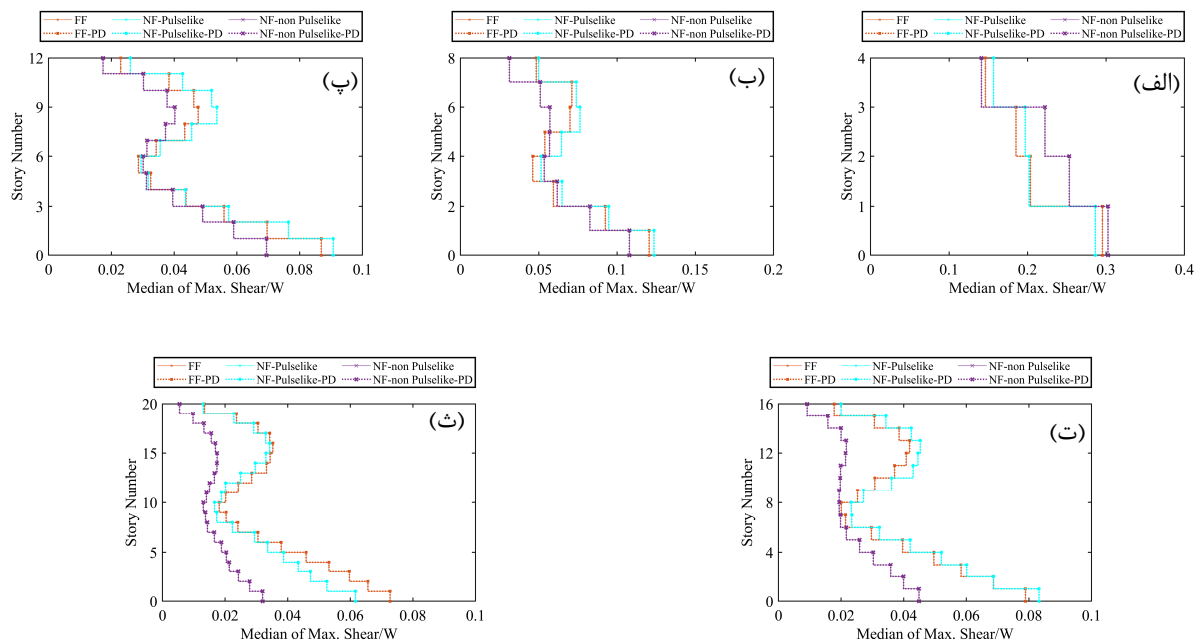
با افزایش ارتفاع و همچنین افزایش شدت زلزله، اثرات موده‌های بالاتر به صورت برش در پایه و ارتفاع افزایش می‌یابد (بیشتر در نوع زلزله‌های FF و NF-Pulselike مشاهده می‌شود). مشابه جابجایی نسبی طبقات و خمش دیوارها، لحاظ اثر پی-دلتا همیشه باعث

[۳۸] برابر با ۰/۰۶ درصد در نظر گرفته شده است.

حداکثر مقدار قابل قبول جابجایی نسبی میان طبقه‌های پسماند برای سیستم‌های مرکزگرا، مطابق تحقیق



شکل ۶- میان‌ه حداکثر خمزش طبقات دیوار 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

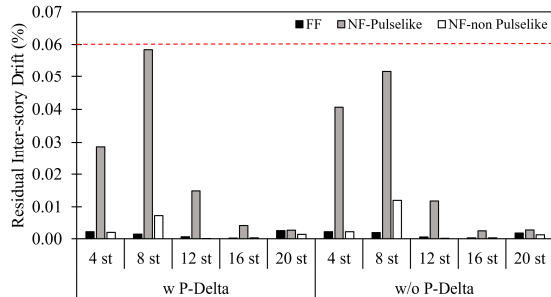


شکل ۷- میان‌ه حداکثر برش طبقات دیوار تحت رکوردهای مختلف لرزه‌ای در سطح MCE مربوط به سازه‌های: (الف) ۴ طبقه، (ب) ۸ طبقه، (پ) ۱۲ طبقه، (ت) ۱۶ طبقه و (ث) ۲۰ طبقه

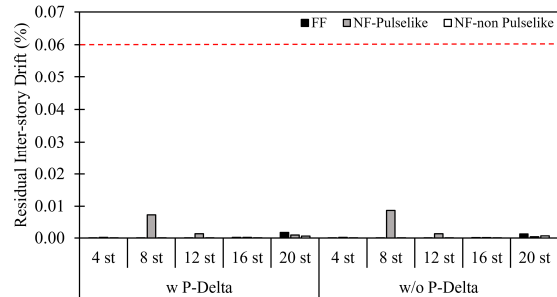
طبقه‌ای پسماند از مقدار حداکثر قابل قبول (۰/۰۶ درصد) کمتر است. همچنین لازم به ذکر است که مقادیر دریفت پسماند تحت رکورد NF-Pulslike در تمامی سازه‌ها تقریباً بیشتر است. اثر پی-دلتا در افزایش جابجایی نسبی

در شکل ۸ مقادیر میان‌ه جابجایی نسبی میان طبقه‌ای پسماند برای دیوارهای مختلف و تحت زلزله‌های مختلف و در دو سطح عملکرد DBE و MCE نشان می‌دهد. مطابق این شکل مقادیر جابجایی نسبی میان

پسماند را افزایش می‌دهد. لازم به ذکر است که سازه‌ها با در نظر گرفتن اثر پی دلتا با w P-Delta و سازه‌های بدون لحاظ اثر پی-دلتا با w/o P-Delta نشان داده شده است.



(ب)



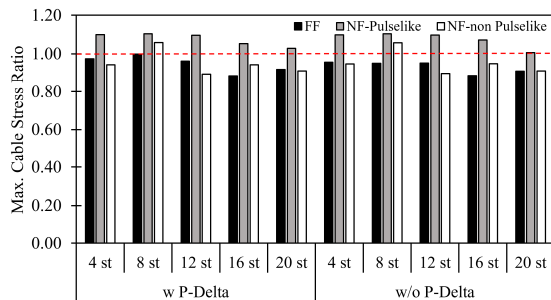
(الف)

شکل ۸- میانه جابجایی پسماند تحت رکوردهای مختلف لرزه‌ای در سطح زلزله (الف) DBE و (ب) MCE

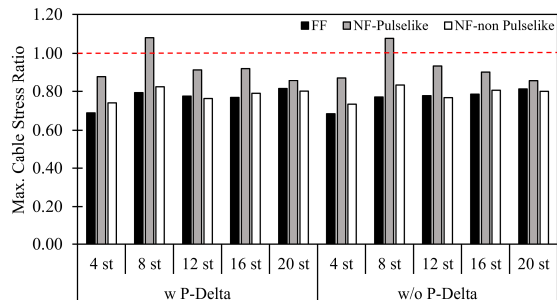
رکوردهای FF، تسلیم در کابل‌ها مشاهده نمی‌شود ولی تحت رکوردهای NF-Pulselike در تمامی سازه‌ها تسلیم در کابل‌ها مشاهده می‌شود. همچنین تحت رکوردهای NF-non Pulselike در یک سازه، تسلیم در کابل‌ها مشاهده شده است. اثر پی-دلتا در افزایش نسبت تنش کابل‌ها تاثیر زیادی ندارد و مقدرا اثرگذاری آن ناچیز است.

۳-۵- نسبت تنش تاندن‌ها

حداکثر نسبت تنش در تاندن‌ها، در شکل ۹ 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 (به جز یک مورد تحت زلزله NF-Pulselike). در سطح MCE مقادیر نسبت تنش کابل‌ها در بیشتر سازه‌ها بزرگتر از عدد یک است. در این سطح زلزله، تحت



(ب)



(الف)

شکل ۹- میانه حداکثر نسبت تنش تاندن‌ها تحت رکوردهای مختلف لرزه‌ای در سطح زلزله (الف) DBE و (ب) MCE

بیشتر از سایر رکوردها است. همچنین اثر پی-دلتا در تمامی رکوردهای لرزه‌ای ناچیز است.

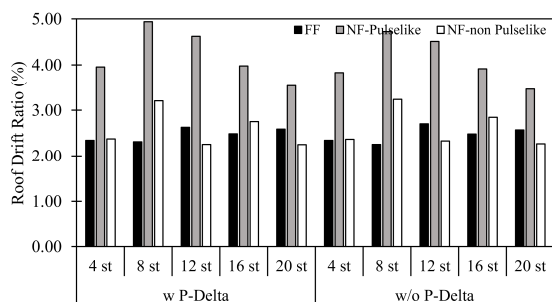
۳-۶- حداکثر جابجایی نسبی بام

حداکثر جابجایی نسبی بام، در شکل ۱۰ در سازه‌ها مختلف و تحت رکوردهای مختلف در دو سطح زلزله DBE و MCE نشان داده شده است. در دو سطح زلزله دررفت پسماند بام تحت رکوردهای NF-Pulselike

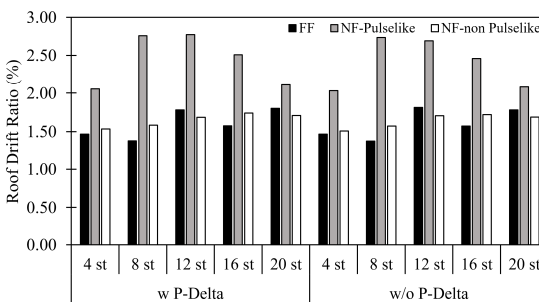
۴- بحث در نتایج

در جدول ۱، تاثیر ستون پی-دلتا بر پاسخهای سازه‌های مورد بررسی را نشان می‌دهد. همانطور که نشان

کلی تاثیر اثر پی-دلتا تحت زلزله‌های شدیدتر بیشتر است. بیشتر اثر پی-دلتا تحت رکوردهای MCE حدود ۱۲ درصد تحت NF-Pulselike، پاسخ خمش‌ها را افزایش می‌دهد.



(ب)



(الف)

شکل ۱۰- میانه حداکثر جابجایی نسبی بام تحت رکوردهای مختلف لرزه‌ای در سطح زلزله (الف) DBE و (ب) MCE

جدول ۱- تاثیر ستون پی- دلتا بر پاسخهای سازه‌های مورد بررسی

پاسخ	حداکثر درصد افزایش تلاش ناشی از اثر پی-دلتا		
	NF-non Pulselike	NF-Pulselike	FF
دریفت	۲	۴	۳
	۱	۵	۳
خمش	۳	۵	۲
	۴	۱۲	۲
برش	۳	۳	۵
	۴	۴	۵

در نوع تلاش خمشی بوده است. همچنین در بیشتر تلاش‌های مورد نظر، اثر پی-دلتا تحت رکوردهای NF-Pulselike بیشتر باعث افزایش پاسخهای سازه می‌شود. به طور کلی می‌توان گفت که در تحلیل‌های سازه‌های گام‌بردار مرکزگرا با توجه به حجم محاسباتی بالا و نیز پیچیدگی ستون پی-دلتا، می‌توان از آن صرف نظر کرد و پاسخ‌ها با دقت بالایی قابل قبول است.

سیستم‌های دوگهواره‌ای و گهواره‌ای چندگانه می‌توانند جزو سیستم‌های نوین لرزه‌ای و جایگزینی مناسب سیستم‌های سازه‌ای متداول آیین‌نامه‌ای و حتی دیوارهای پایه-گهواره‌ای انتخاب گردند. اثر پی-دلتا در این سیستم‌ها نیز می‌تواند در نتایج تاثیرگذار باشد. سعی می‌شود در تحقیقات آتی به این موضوع پرداخته شود.

۵- نتیجه‌گیری

در این تحقیق به بررسی رفتار دیوارهای بتنی پایه-گهواره‌ای ۴، ۸، ۱۲، ۱۶ و ۲۰ طبقه پرداخته شده است. 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 دوبعدی با در نظر گرفتن خواص غیرخطی مصالح و هندسه انجام شده است. سازه‌های مورد نظر در دو سطح زلزله DBE و MCE مورد تحلیل قرار گرفته‌اند. مدل‌ها در دو صورت با و بدون در نظر گرفتن اثر پی-دلتا مورد بررسی قرار گرفته‌اند. به طور کلی اثرات پی-دلتا در افزایش پاسخهای سازه‌های گام‌بردار مرکزگرا ناچیز است. بیشترین تاثیر در پاسخهای سازه در سطح زلزله MCE

مراجع

- [1] 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.
- [2] G. W. Housner, "The behavior of inverted pendulum structures during earthquakes," *Bull. Seismol. Soc. Am.*, vol. 53, no. 2, pp. 403–417, 1963.
- [3] 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.
- [4] M. J. N. Priestley, "Overview of PRESSS research program," *PCI J.*, vol. 36, no. 4, pp. 50–57, 1991.
- [5] Y. Kurama, D. Ph, S. Pessiki, and D. Ph, "Seismic Behavior and Design of Unbonded Post-Tensioned Precast Concrete Walls," *PCI J.*, no. May-June, p. 18, 1999.
- [6] R. S. Henry, S. Aaleti, S. Sritharan, and J. M. Ingham, "Concept and Finite-Element Modeling of New Steel Shear Connectors for Self-Centering Wall Systems," *J. Eng. Mech.*, vol. 136, no. 2, pp. 220–229, Feb. 2010, doi: 10.1061/(ASCE)EM.1943-7889.0000071.
- [7] A. Wada, Z. Qu, H. Ito, S. Motoyui, H. Sakata, and K. Kasai, "Seismic retrofit using rocking walls and steel dampers," in *Improving the seismic performance of existing buildings and other structures*, 2010, pp. 1010–1021.
- [8] R. S. Henry, N. J. Brooke, S. Sritharan, and J. M. Ingham, "Defining concrete compressive strain in unbonded post-tensioned walls," *ACI Struct. J.*, vol. 109, no. 1, pp. 101–112, 2012.
- [9] T. Holden, J. Restrepo, and J. B. Mander, "Seismic Performance of Precast Reinforced and Prestressed Concrete Walls," *J. Struct. Eng.*, vol. 129, no. 3, pp. 286–296, 2003, doi: 10.1061/(ASCE)0733-9445(2003)129:3(286).
- [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/pcj.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] A. Gu, Y. Zhou, Y. Xiao, Q. Li, and G. Qu, "Experimental study and parameter analysis on the seismic performance of self-centering hybrid reinforced concrete shear walls," *Soil Dyn. Earthq. Eng.*, vol. 116, pp. 409–420, 2019.
- [15] X. Hu, Q. Lu, and Y. Yang, "Rocking Response Analysis of Self-Centering Walls under Ground Excitations," *Math. Probl. Eng.*, 2018.
- [16] H. A. D. S. Buddika and A. C. Wijeyewickrema, "Seismic Performance Evaluation of Posttensioned Hybrid Precast Wall-Frame Buildings and Comparison with Shear Wall-Frame Buildings," *J. Struct. Eng.*, vol. 142, no. 6, 2016, doi: 10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0001466.
- [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. 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.
- [20] Q. Liu, C. W. French, and S. Sritharan, "Performance of a Precast Wall with End Columns Rocking-Wall System with Precast Surrounding Structure," *Struct. J.*, vol. 117, no. 3, p. 103, 2020.
- [21] J. J. Ajrab, G. Pekcan, and J. B. Mander, "Rocking wall-frame structures with supplemental tendon systems," *J. Struct. Eng.*, vol. 130, no. 6, pp. 895–903, 2004.
- [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] E. Mohammadi Dehcheshmeh and V. Broujerdian, "Probabilistic Evaluation of Self-Centering Birocking Walls Subjected to Far-Field and Near-Field Ground Motions," *J. Struct. Eng.*, vol. 148, no. 9, p. 4022134, 2022.
- [24] 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.

[25] 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.jobbe.2021.103509>.

[26] 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.

[27] 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.

[28] Mazzoni S, McKenna F, Scott MH, Fenves GL, "Open System for earthquake engineering simulation (OpenSEES) user command-language manual," *Pacific Earthq. Eng. Res. Center, Berkeley, CA, USA*, 2009.

[29] 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.

[30] 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.

[31] T. Li, J. W. Berman, and R. Wiebe, "Parametric study of seismic performance of structures with multiple rocking joints," *Eng. Struct.*, vol. 146, pp. 75–92, 2017.

[32] 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.

[33] 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).

[34] K. Orakcal and J. W. Wallace, "Flexural modeling of reinforced concrete walls-experimental verification," *ACI Mater. J.*, vol. 103, no. 2, p. 196, 2006.

[35] FEMA, *FEMA P695: Quantification of building seismic performance factors*. US Department of Homeland Security, FEMA, 2009.

[36] M. Archila, "Directionality effects of pulse-like near field ground motions on seismic response of tall buildings." University of British Columbia, 2014.

[37] ASCE/SEI 7, "Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures (ASCE/SEI 7-10).," 2010.

[38] 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.