

**E. Mohammadi
Dehcheshmeh**

PhD Candidate, School of
Civil Engineering, Iran
University Science and
Technology.

e-mail:

esmaeil_mohammadi@civileng.iust.ac.ir

V. Broujerdian *

Assistant Professor, School of
Civil Engineering, Iran
University Science and
Technology

e-mail: broujerdian@iust.ac.ir

Seismic Design Coefficients of Self-Centering Multiple Rocking Walls Subjected to Effect of Far and Near-Field Earthquakes

Nowadays, new and innovative methods have been proposed based on damage avoidance design (DAD) philosophy systems as the alternative conventional lateral load-resistant systems. These systems reduce damage to buildings and post-earthquake reconstruction costs. The self-centering rocking walls are one of them. In this research, multiple rocking wall systems have been investigated and designed. The effect of the number of self-centering blocks and the ratio of tendon prestressing in a 12-story structure examined. The structures have examined subjected to 22 far-field records and 28 near-field records, half of which have pulse. The modeling is done in two dimensions via OpenSees software. The design coefficients of rocking sections in different prestressings for each type of ground motions are specified. The results shown that rocking wall structures under near-field pulse-like ground motions need more design capacity than other records to control drift and capacity section. Furthermore, The design of base-rocking and multiple rocking structures has been done for specific drift that have similar drift profiles in height. Then, for this case design, it is not possible to expect the desired energy absorption and also the reduction of the effects of higher modes from the multiple rocking the system compared to the base-rocking system.

Keywords: Self-centering system, Rocking wall, Residual displacement, Prestressing ratio, Higher mode.

* Corresponding author

Received 09 June 2021, Revised 20 June 2021, Accepted 25 June 2021.

DOI: 10.22091/cer.2021.7025.1257

ارائه ضرایب طراحی لرزه‌ای دیوارهای مرکزگرای گهواره‌ای چندگانه تحت رکوردهای حوزه دور و نزدیک گسل

در سال‌های اخیر، روش‌های جدید و نوآورانه‌ای با فلسفه طراحی سیستم‌های آسیب‌گریز به‌جای سیستم‌های باربر جانبی متداول آیین‌نامه‌ای به‌منظور کاهش آسیب در ساختمان‌ها و کاهش هزینه‌های بازسازی بعد از زلزله، پیشنهاد شده است. سیستم‌های دیوارهای گهواره‌ای مرکزگرا از جمله سیستم‌های آسیب‌گریز نوین محسوب می‌گردند. این سیستم‌ها می‌توانند به‌عنوان جایگزین مناسب سیستم‌های باربر جانبی متداول آیین‌نامه‌ای انتخاب گردند. در این تحقیق، به بررسی و طراحی سیستم‌های گهواره‌ای چندگانه با بررسی تأثیر تعداد بلوک گهواره‌ای و مقدار پیش‌تنیدگی کابل‌ها در سازه ۱۲ طبقه، تحت ۲۲ رکورد لرزه‌ای دور و ۲۸ رکورد لرزه‌ای نزدیک گسل که نیمی از آن‌ها دارای پالس هستند، پرداخته شده است. مدل‌سازی به‌صورت دوبعدی در نرم‌افزار OpenSees انجام گرفته است. ضرایب طراحی مقاطع گهواره‌ای در پیش‌تنیدگی‌های مختلف برای هر نوع زلزله مشخص شده است. در این تحقیق نشان داده شده است که سازه‌های گهواره‌ای تحت رکوردهای نزدیک گسل با پالس بحرانی بوده و نیاز ظرفیتی طراحی نسبت به سایر رکوردها بیشتر برای کنترل دررفت و مقاومت دارند. طراحی سازه‌های پایه-گهواره‌ای و گهواره‌ای چندگانه برای دررفت مشخصی که دارای پروفیل دررفت مشابه در ارتفاع هستند، انجام شده است. برای این حالت نمی‌توان جذب انرژی مطلوب و هم‌چنین کاهش اثرات مودهای بالا را از سیستم گهواره‌ای چندگانه نسبت به سیستم پایه-گهواره‌ای انتظار داشت.

واژگان کلیدی: سیستم مرکزگرا، دیوار گهواره‌ای، تغییرشکل پسماند، پیش‌تنیدگی، مودهای بالا.

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

این دو مکانیزم در سازه، ایجاد منحنی‌های پرچمی‌شکل نیرو-جابجایی تحت بارهای جانبی رفت و برگشتی مطابق شکل ۱ 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. رفتار دوخطی نشان داده شده شکل ۱ مربوط به مکانیزم بازگرداندگی هست که در آن استهلاک انرژی سیستم تأمین نمی‌شود. برای تأمین مکانیزم جذب انرژی در سیستم، می‌بایست

سیستم‌های مرکزگرا تحت بارهای جانبی، با خصوصیات رفتاری مشخص برای تحمل بارهای جانبی در نظر گرفته می‌شوند که شامل تأمین مکانیزم نیروی بازگرداندگی^۱ و تأمین مکانیزم جذب انرژی^۲، است. هدف

* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۴۰۰/۰۳/۱۹، بازنگری ۱۴۰۰/۰۳/۳۰، پذیرش ۱۴۰۰/۰۴/۰۴.

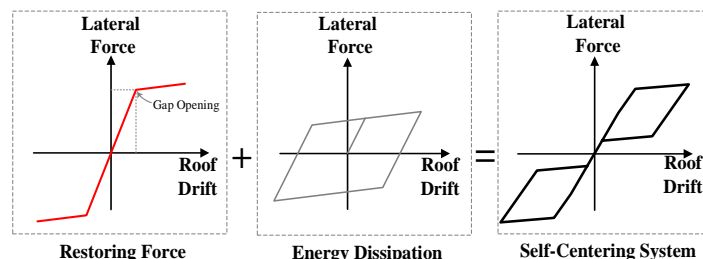
(DOI): 10.22091/cer.2021.7025.1257 شناسه دیجیتال

¹- Restoring Force Mechanism

²- Energy Dissipation Options

نمی‌کند. با ترکیب این دو مکانیزم رفتار پرچمی شکل مطابق شکل ایجاد می‌گردد.

المان‌های جذب انرژی تعبیه گردند. که نمودار جذب انرژی مطابق شکل ۱ رفتار مرکزگرایی در سیستم ایجاد



شکل ۱- رفتار سیستم مرکزگرا

ایجاد برش و لنگر در ارتفاع برای حالت تیر برشی و خمشی بررسی کردند. در این تحقیق نشان داده شد که در دو حالت تیر برشی و تیر خمشی، کاهش گیرداری و ایجاد رفتار مفصلی در پایه، اثرات مودهای بالاتر در ایجاد تلاش‌های اضافی در سازه بیشتر می‌شود [۱]. ویب و همکاران نشان دادند بیشتر پاسخ‌های ساختمان‌های میان‌مرتب با مود ۱ و ۲ کنترل می‌شود، ولی سازه‌های بلندمرتبه مودهای بالاتر نیز بر پاسخ‌های سازه تأثیرگذار است [۲].

پژوهشگران به اثرات مودهای بالا و کاهش این اثرات با استفاده از سیستم دیوار برشی چندگانه گهواره‌ای در ارتفاع، پرداختند. در حالت حرکت پایه- گهواره‌ای در سازه‌های بلند، نیروی برشی طبقات و لنگر ناشی از اثرات مودهای بالا، افزایش می‌یابد و توسعه سیستم گهواره‌ای چندگانه در ارتفاع، موجب کاهش لنگر در ارتفاع سازه می‌شود و نیز در پایان تحلیل‌ها بدون تغییر شکل ماندگاری در سازه و یا مقدار اندک ایجاد می‌شود. هم‌چنین نشان داده شده است که به‌کارگیری سیستم‌های گهواره‌ای چندگانه، باعث افزایش تقاضای نیروی پیش‌تنیدگی در کابل‌ها و نیز کاهش تقاضای چرخش در دیوارها می‌گردد. جابه‌جایی‌های پسماند و ضربه‌های ایجاد شده در سطوح تماس، قابل صرف‌نظر کردن است. هم‌چنین کشش ایجاد شده در قسمت میانی دیوار قابل چشم‌پوشی است. این موضوع برای ساختمان‌های بلند نسبت به ساختمان‌های کوتاه کمتر اهمیت دارد. توسعه

دیوارهای گهواره‌ای یکی از سیستم‌های متداول مرکزگرا می‌باشند 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 هسته 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.

۱-۱- مرور ادبیات تحقیق

ویب^۳، اثرات مودهای بالا در سازه‌ها با رفتار سیستم‌های گهواره‌ای را منفی دانسته و نیز این اثرات اگر در طراحی در نظر گرفته نشود ممکن است باعث خرابی سازه گردد. اگر سازه در مقابل این اثرات، طراحی شود ممکن است طراحی سازه غیراقتصادی گردد. پس می‌بایست اثرات مودهای بالا در سازه به نحوی کاهش پیدا نماید. محققان درصد مشارکت مودهای مختلف در

3- Wiebe

همکاران، درصد گیرداری پایه هسته گهواره‌ای و نسبت سختی هسته گهواره‌ای به قاب خمشی بر روی رفتار دینامیکی سیستم^{۱۰} RWMF را مورد بررسی قرار داده و جهت مدل‌سازی، به جای قاب خمشی و سیستم هسته گهواره‌ای به ترتیب از تیر برشی و تیر خمشی استفاده کردند. سپس به حل فرم بسته پرداخته و با نتایج نرم‌افزار اجزای محدود صحت‌سنجی نمودند. در این تحقیق سعی بر تعیین محدوده گیرداری پایه و نسبت سختی هسته گهواره‌ای به قاب که منجر به ایجاد یک توزیع یکنواخت جابه‌جایی نسبی و نیز کاهش اثرات مودهای بالا به دلیل آزادسازی پایه دیوار گهواره‌ای شده است [۷].

جهت تحلیل و طراحی سیستم‌های پایه-گهواره‌ای و چندگانه نیز تحقیقات مختلفی صورت گرفته است. بادیکا و ویجی‌ویکرما^{۱۱} به محاسبه نیروی برشی لرزهای سیستم‌های ترکیبی دیوارهای بتنی پیش‌ساخته پرداختند. آنها ابتدا به معادلات تعیین نیروی برشی دیوارهای پیش‌ساخته، دیوارهای پیش‌تنیده گهواره‌ای و نیز دیوارهای بتن مسلح معمولی پرداخته و سپس این معادلات را با استفاده از تحلیل تاریخچه زمانی مقایسه کردند. همچنین نیروهای برشی توزیع شده در ارتفاع را مورد ارزیابی قرار دادند [۸]. نجم و همکاران روشی ساده برای تحلیل مودال پوش‌آور جهت تخمین تقاضای غیرخطی لرزهای سازه‌های بلند دارای هسته گهواره‌ای را ارائه داده‌اند. این روش با هر مود ارتعاشی قابل توجه گسترش می‌یابد؛ در حالی که ضریب اصلاح جابه‌جایی هر مود با استفاده از نمودار پرچمی شکل هیستریزس دیوار گهواره‌ای محاسبه شده است. دقت این روش با استفاده از روش تقاضای لرزهای به‌دست آمده از پاسخ غیرخطی سازه ۲۰ طبقه دارای دیوار گهواره‌ای موردنظر، بررسی شده است. روش پیشنهادی برای پیش‌بینی هر دو روش

سیستم‌های گهواره‌ای چندگانه در ارتفاع برای ساختمان‌های کوتاه (کمتر از ۸ طبقه) مؤثر نیست. در ساختمان‌های بلند با افزایش تعداد بلوک گهواره‌ای در دیوار، راندمان دیوار بیشتر می‌شود. در این تحقیقات پروفیل دریافت سازه‌های گهواره‌ای چندگانه با پایه-گهواره‌ای کاملاً متفاوت بوده و حداکثر دریافت ایجاد شده در سازه‌ها برابر نبوده است [۳ و ۴]. سیستم‌های گهواره‌ای چندگانه کوتاه‌مرتبه برای ساخت به‌صورت پیش‌ساخته می‌توانند مورد استفاده قرار گیرند [۵]. در تحقیقی که بر روی این سیستم‌های کوتاه‌مرتبه انجام شده است نشان داده شد که استفاده از جاذب انرژی با مقطع کاهش‌یافته آرماتور طولی نچسبیده (BSR-UPC^۹)، ترک و خردشدگی بتن در دیوار مشاهده نمی‌گردد. این سیستم‌ها نسبت به سه نوع دیوار دیگر که شامل دیوار بتن مسلح متداول آیین‌نامه‌ای (ST-RC^۵)، دیوار ترکیبی پیش‌ساخته و درجا (HY-PC^۶) و دیوار پیش‌ساخته با مقطع کاهش‌یافته آرماتور طولی چسبیده (BSR-BPC^۷) می‌باشد، جذب انرژی و ظرفیت تغییرشکلی حداکثر و زوال سختی و مقاومت حداقل دارد. سیستم‌های گهواره‌ای همراه با سازه قاب خمشی می‌توانند مورد استفاده قرار گیرند. شوچان^۸ و همکاران نشان دادند که اثر مودهای بالا در سیستم‌های گهواره‌ای با پایه مفصل، غیرقابل صرف‌نظر است و نیز طراحی با مود اول غیرمحافظه‌کارانه در تخمین نیروهای برشی و لنگر خمشی است. همچنین جابه‌جایی‌ها مؤثر از مودهای بالا نمی‌باشند. علاوه بر این، سیستم دیوار گهواره‌ای در قاب‌ها تمایل ارتعاش سازه با مود گهواره‌ای را دارند و نیز متمایل به از بین بردن اثر مودهای بالاتر در قاب‌ها می‌باشند که این منجر به افزایش اثرات مودهای بالا می‌شود [۶]. وو^۹ و

4- Bar Section Reduction-Unbonded Precast Concrete wall

5- Standard-Reinforced Concrete wall

6- Hybrid-Precast Concrete wall

7- Bar Section Reduction-Bonded Precast Concrete wall

8- Shoujun

9- Wu

10- Rocking Wall-Moment Frames

11- Buddika and Wijeyewickrema

کمانش‌پذیر مهاربند در قسمت‌های مختلف، هسته گهواره‌ای نیز می‌تواند تأثیر مثبت در کاهش اثرات مودهای بالاتر داشته باشد [۱۴]. همچنین جهت جلوگیری از خرابی سازه ناشی از اثرات مودهای بالا بهتر است، سازه در سطح MCE^{16} طراحی گردد. از طرفی، این سیستم‌ها با دو ضریب رفتار متفاوت ۸ و ۲۰ مورد بررسی قرار گرفتند و نتایج نشان داد که در سازه‌های بلند طراحی شده با ضریب رفتار بزرگ‌تر از ۸، می‌توان جابه‌جایی نسبی سازه را در سطح زلزله MCE به $2/5$ درصد محدود نمود [۱۵]. پژوهشگران نشان دادند که مقاطع گهواره‌ای در نیمه پایین مقطع، مؤثرتر از نیمه بالایی مقطع است. همچنین اضافه کردن بلوک گهواره‌ای سوم در ساختمان ۳۰ طبقه مؤثرتر از ساختمان‌های ۲۰ طبقه است [۱۶].

بروگردیان و ده‌چشمه به بررسی رفتار احتمالاتی سازه‌های دیوار پایه- گهواره‌ای مرکزگرای کوتاه و میان‌مرتبه پرداختند. سازه‌ها تحت سه نوع رکورد لرزه‌ای دور از گسل، نزدیک گسل دارای پالس و بدون پالس، مورد بررسی قرار گرفت. تحلیل‌ها به صورت دینامیکی افزایشی غیرخطی بوده است. در این تحقیق، منحنی‌های شکنندگی استخراج گردید. هدف کلی این پژوهش، تعیین اثرات مودهای بالاتر به صورت خمش و برش در هسته دیوار پایه- گهواره‌ای بوده است. همچنین دیوارها در سطوح عملکردی مختلف مورد بررسی قرار گرفتند. نتایج نشان داد با افزایش ارتفاع، اثرات مودهای بالاتر، افزایش می‌یابد. دیوارهای کوتاه، تحت رکوردهای نزدیک گسل دارای پالس و دیوارهای بلند، تحت رکوردهای دور از گسل و نزدیک گسل بدون پالس با شتاب طیفی مود اول کوچک‌تر در سطوح عملکردی مختلف به احتمال میانه شکنندگی می‌رسند [۱۷].

در سایر سیستم‌های سازه‌ای نیز عملکرد هسته پایه- گهواره‌ای و چندگانه مطرح است. در سیستم پل‌ها با

تقاضای مود ترکیبی و تکی با دقتی قابل قبول می‌تواند به‌عنوان گزینه‌ای برای مناسب تحلیل برای طراحی و تعیین عملکرد سیستم‌های دیوار گهواره‌ای در سازه‌های بلند مورد استفاده قرار گیرد [۹]. پژوهشگران روش طراحی براساس عملکرد مختلف جهت کاهش تقاضای غیرخطی لرزه‌ای سازه‌ها ارائه کردند. در این تحقیق، ابتدا ساختمانی ۲۰ طبقه براساس روش تغییرمکان طراحی شد و سپس دو روش طراحی برای پیش‌بینی نیروهای ناشی از اثرات مودهای بالا استفاده گردید و جزییات هر روش در کاهش اثرات مودهای بالا مورد بررسی قرار گرفت. نتایج تحلیل تاریخچه زمانی برای مناطق با خطر لرزه‌ای متوسط و زیاد، اثربخشی روش طراحی براساس عملکرد در برآورد تقاضای جابه‌جایی را نشان می‌دهد؛ در حالی که، روش ساده شده^{۱۲} و روش اصلاح شده جمع آثار مودال^{۱۳}، برای برآورد ظرفیت طراحی، به‌ترتیب محافظه‌کارانه و غیر محافظه‌کارانه می‌باشند [۱۰].

اثر مودهای بالا در سیستم‌های گهواره‌ای مهاربندی نیز مطرح است که می‌تواند آثار نامطلوب و غیرقابل صرف‌نظری در این سیستم‌ها ایجاد نماید [۱۱]. ویب و همکاران در سیستم‌های مهاربندی گهواره‌ای نیز جهت کاهش اثرات منفی مودهای بالا، راهکارهای ایجاد بلوک گهواره‌ای در ارتفاع جهت کاهش خمش در هسته و همچنین ایجاد مستهلک کننده انرژی در پایین هسته جهت کاهش نیروی برشی ایجاد شده را توصیه کردند. آنها به بررسی رفتار تاریخچه زمانی به‌صورت دامنه کم^{۱۴} و زیاد^{۱۵} این سازه‌ها پرداختند و نشان دادند که این سازه‌ها تحت رکوردهای لرزه‌ای، با ایجاد دو مکانیزم حرکت گهواره‌ای چندگانه در ارتفاع و جاذب انرژی در پایین هسته، مؤثر تلقی می‌شود [۱۲ و ۱۳]. در پژوهشی دیگر، محققان نشان دادند، با اضافه کردن اعضای

12- Simplified Procedure

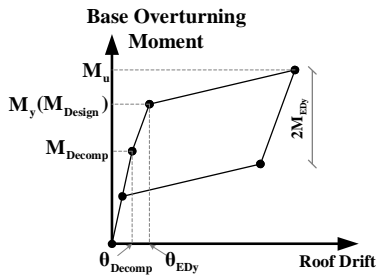
13- Modified Modal Superposition (MMS)

14- Low-amplitude shake table testing

15- Large-amplitude shake table testing

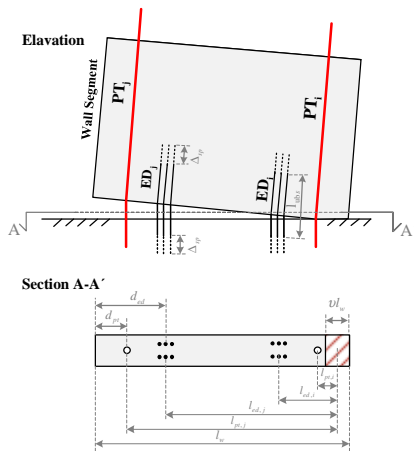
16- Maximum Considered Earthquake

جاذب‌های انرژی کاملاً تسلیم شده‌اند، M_u لنگر نهایی سیستم و M_{EDy} لنگر تسلیم جاذب‌های انرژی می‌باشد.



شکل ۲- رفتار پرجمی شکل سیستم‌های گهواره‌ای

برای تعیین مقاومت تسلیم سیستم‌های مرکزگرای گهواره‌ای، پارامترهای این سیستم در محل اتصال به فونداسیون در شکل ۳ نشان داده شده است. در این تحقیق، جاذب‌های انرژی و کابل‌های پیش‌تنیده در دو طرف مقطع استفاده شده است (ED_i, ED_j, PT_i, PT_j). طول کلی دیوار برابر با l_w است. همچنین l_{ubs} طول جاذب‌های انرژی، d_{ed} فاصله جاذب‌های انرژی از لبه و d_{pt} فاصله کابل‌های پیش‌تنیده از لبه می‌باشد که مقدار هرکدام به ترتیب، ۶۰ سانتیمتر، $0.125l_w$ و $0.125l_w$ در نظر گرفته شده است [۲۴]. ضریب ν برای تعیین عمق ناحیه فشاری بوده و محدوده آن بین $0.15-0.3$ در این سیستم‌ها متغیر است. در این تحقیق، مقدار ν برابر با 0.17 در نظر گرفته شده است [۲۴]. سایر پارامترها با تعیین مقادیر بیان شده در این قسمت قابل تعیین است.



شکل ۳- پارامترهای دیوار گهواره‌ای در محل اتصال به

فونداسیون [۲۴]

توجه به اینکه نیاز به بررسی اثر موده‌های بالا بیشتر بوده و نیز این سازه‌ها معمولاً برای کنترل بیشتر در کارخانه ساخته می‌شوند، سیستم سازه‌های پیش‌ساخته بیشتر قابل توجیه و قابل استفاده است [۱۸ و ۱۹]. سیستم‌های گهواره‌ای مرکزگرا در سازه‌های مصالح بنایی و سازه‌های چوبی همانند سازه‌های دیگر می‌تواند ویژگی‌های مطلوبی در سازه‌ها ایجاد نماید [۲۰-۲۳].

۲-۱- هدف تحقیق

بعضاً در تحقیقات مختلف در زمینه اثر موده‌های بالا مربوط به سیستم‌های گهواره‌ای، مدل رفتاری مقطع گهواره‌ای به صورت ساده‌سازی شده با فنر پیچشی به هسته گهواره‌ای اختصاص داده شده است [۳ و ۱۶]. مقدار پیش‌تنیدگی در بیشتر این تحقیقات به صورت ثابت در نظر گرفته است [۴]. این در حالی است که ظرفیت طراحی در ارتفاع‌های مختلف برای سطوح مختلف گهواره‌ای ارائه نشده است [۳]. در این تحقیق، اثر زلزله حوزه دور و نزدیک با و بدون پالس در طراحی مقاطع گهواره‌ای مدل شده با رفتار واقعی در نظر گرفته شده، ضرایب طراحی مقاطع گهواره‌ای در سیستم‌های با بلوک گهواره‌ای چندگانه منظم در ارتفاع برای زلزله‌های مورد نظر تعیین شده و حالت بهینه مقاطع گهواره‌ای با ضرایب پیش‌تنیدگی مختلف در این سیستم‌ها مشخص شده است.

۲- روش تحقیق

۲-۱- معرفی روش طراحی

در سیستم‌های دیوارهای پایه- گهواره‌ای و چندگانه برای تأمین رفتار پرجمی شکل کلی در این سیستم باید مقاطع این سیستم مشابه شکل ۲ دارای رفتار پرجمی شکل طراحی گردد. در این شکل، M_{Decomp} لنگر بازشدگی مقطع، M_y لنگر تسلیم مقطع که در این نقطه

مقاومت خمشی طراحی تسلیم سیستم گهواره‌ای (M_{Design}) مطابق رابطه (۱) تعیین می‌گردد:

$$M_{Design} = c(l_{pt,i}F_{in,pt,i} + l_{pt,i}F_{s,pt,i} + l_{pt,j}F_{in,pt,j} + l_{pt,j}F_{s,pt,j} + R_y l_{ed,i}F_{y,ed,i} + R_y l_{ed,j}F_{y,ed,j} + wl_w / 2) \quad (1)$$

تسلیم مورد انتظار به حداقل تنش تسلیم تعیین شده است. $F_{y,ed,i}$ و $F_{y,ed,j}$ نیروی تسلیم جاذب‌های انرژی نام و w وزن بار ثقلی روی دیوار است.

در طراحی هر مقطع برای اینکه بازگرداندگی اتفاق بیفتد و رفتار پرچمی شکل محقق گردد، می‌بایست مطابق شکل ۲، نسبت لنگر ناشی از کابل قبل از تسلیم به لنگر تسلیم جاذب‌های انرژی، ضریب بازگرداندگی (λ) ، در سیستم تعریف گردد. این ضریب مطابق رابطه (۲) به‌دست می‌آید:

$$\lambda = \frac{M_u - M_{EDy}}{M_{EDye}} = \frac{l_{pt,i}F_{in,pt,i} + l_{pt,i}F_{st,pt,i} + l_{pt,j}F_{in,pt,j} + l_{pt,j}F_{st,pt,j} + wl_w / 2}{R_y l_{ed,i}F_{y,ed,i} + R_y l_{ed,j}F_{y,ed,j}} \quad (2)$$

پایان تحلیل، جابه‌جایی‌های پسماند قابل مشاهده است. در این تحقیق، مقدار ضریب λ برابر با $1/25$ در نظر گرفته شده است [۲۴].

۲-۲- نحوه مدل‌سازی سیستم‌های گهواره‌ای

برای مدل‌سازی نرم‌افزاری می‌بایست یک سری فرضیات اولیه انجام شود و نیز مدل‌سازی به‌صورت ساده‌سازی تعریف گردد. شکل ۴- الف دیوار گهواره‌ای چندگانه را نشان داده است. در این دیوار، محل قرارگیری و اتصال جاذب‌های انرژی (ED^{17}) و کابل‌های پیش‌تنیده (PT^{18}) و همچنین اجزای دیوار نشان داده شده است. برای مدل‌سازی این سیستم در نرم‌افزار OpenSees از مصالح و المان‌های مختلف استفاده می‌شود. در شکل ۴- ب، مدل‌سازی هسته دیوار به‌صورت الاستیک در نظر گرفته شده است. با توجه به مراجع، چون در طراحی اجازه غیرخطی شدن بتنی داده نشده است، می‌توان این

مقادیر داخل پرانتز در رابطه (۱)، مربوط به مقاومت سیستم پایه- گهواره‌ای جهت طراحی تحت مود اول است. این مقاومت با ضریب c برای پیش‌تنیدگی‌های متفاوت، انواع رکوردها، تعداد بلوک گهواره‌ای مختلف و نیز کاهش دریافت پسماند اصلاح می‌گردد. پارامترهای طول (l) برای قسمت‌های مختلف در شکل ۳ نشان داده شده است. $F_{s,pt,i}$ و $F_{in,pt,i}$ به ترتیب نیروی پیش‌تنیدگی و نیروی اضافه ایجاد شده در کابل بعد از بلندشدگی تا نقطه تسلیم جاذب انرژی برای کابل‌های i است و برای سایر پارامترها با اندیس j نشان داده شده است. پارامتر R_y نسبت تنش

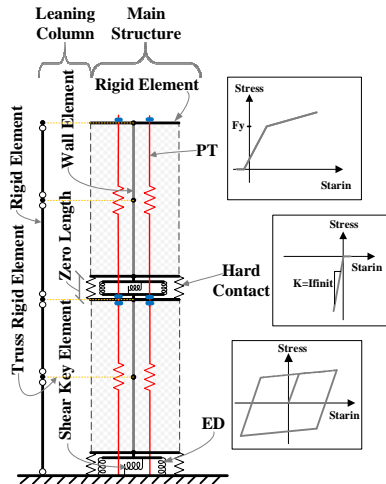
در این رابطه، $F_{st,pt,i}$ و $F_{st,pt,j}$ نیروی اضافه ایجاد شده در کابل نام و λ بعد از بلندشدگی تا نقطه نهایی مدنظر طراحی است. سایر پارامترها قبلاً بیان گردیده است. دقت شود در روابط فوق از R_y جهت تبدیل $F_{y,ed}$ به حالت مورد انتظار $(F_{y,ed,ed})$ استفاده شده است که به‌کارگیری این ضریب می‌تواند تخمین رفتار سیستم گهواره‌ای را دقیق‌تر پیش‌بینی کند.

در شرایط ایده‌آل در صورتی که این ضریب برابر با یک باشد، بازگرداندگی سیستم تأمین می‌گردد و با افزایش این ضریب، مقدار اطمینان از بازگرداندگی سیستم بیشتر تأمین می‌گردد. پس بهتر است مقدار این ضریب با توجه به امکان آسیب‌دیدگی‌های لبه‌های بتن، تسلیم کابل در زلزله‌های شدید و افزایش مقاومت احتمالی جاذب‌های انرژی یا رسیدن آن‌ها به تنش نهایی، بزرگ‌تر از یک در نظر گرفته شود. با بزرگ‌تر از یک در نظر گرفتن این ضریب، اطمینان از بازگرداندگی حاصل می‌گردد. در صورتی که این ضریب کوچک‌تر از یک در نظر گرفته شود، بازگرداندگی در سیستم اتفاق نمی‌افتد و در

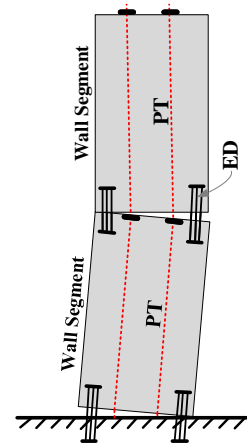
17- Energy Dissipation

18- Post Tension

کابل‌های پیش‌تنیده استفاده شده، دارای رفتار مصالح بدون تحمل فشار و از نوع ElasticPPGap با گپ صفر و پیش‌تنیدگی اولیه استفاده می‌شود. المان‌های ED به صورت فنر Zero Length جهت جذب انرژی بین بلوک‌های گهواره‌ای و بلوک گهواره‌ای و پایه به کار رفته است.



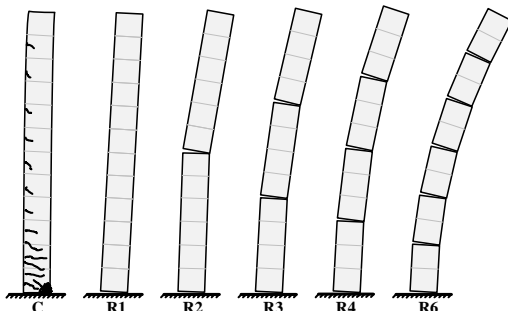
(ب)



(الف)

شکل ۴- مدل نرم‌افزاری دیوار گهواره‌ای مرکزگرایی چندگانه، (الف) مدل واقعی و (ب) مدل عددی در نرم‌افزار OpenSees

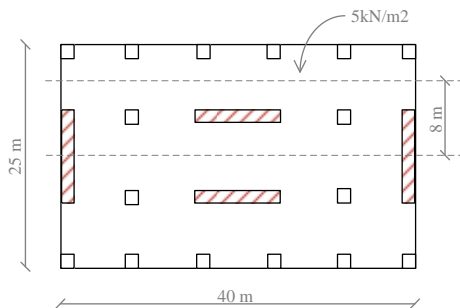
برابر ۴۰ مگاپاسکال و ۳۰ گیگاپاسکال است. مشخصات جاذب‌های انرژی، f_y برابر ۳۰۰ مگاپاسکال و E_s برابر ۲۱۰ گیگاپاسکال و همچنین کابل‌های پیش‌تنیده دارای f_y برابر ۱۵۶۰ مگاپاسکال و E_s برابر ۱۹۵ گیگاپاسکال می‌باشند. ضخامت و طول دیوار به ترتیب برابر با ۴۰۰ و ۷۴۰۰ میلی‌متر است. همچنین ارتفاع طبقات برابر با ۳۵۰۰ میلی‌متر در نظر گرفته شده است.



شکل ۶- دیوارهای گهواره‌ای چندگانه منظم در ارتفاع موردنظر این تحقیق

۲-۳- مشخصات مدل‌های عددی

مدل‌های عددی مورد بررسی در این مقاله، دارای ساختمان مشابه پلان شکل ۵ و دارای تعداد طبقات ۱۲ است [۲۴]. مدل‌ها با قطعات گهواره‌ای منظم در ارتفاع مطابق شکل ۶ در نظر گرفته شده‌اند.



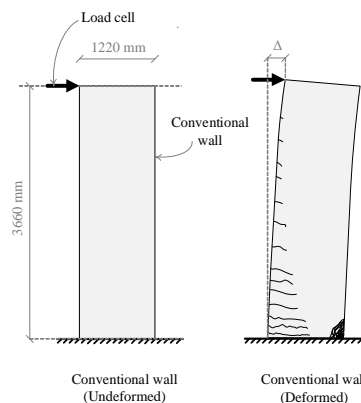
شکل ۵- پلان سازه با دیوارهای دارای رفتار گهواره‌ای [۲۴]

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 و E_c هر کدام

۴-۲- صحت‌سنجی روند مدل‌سازی عددی

صحت‌سنجی سیستم گهواره‌ای در تحقیق [۱۷] و مطابق تحقیق [۲۵] انجام شده است. مشخصات نمونه آزمایشگاهی شامل ضخامت دیوار ۱۲۵ میلی‌متر و مقاومت فشاری بتن، (f'_c) ، ۴۵ مگاپاسکال، آرماتورهای طولی و عرضی با f_y ۴۶۰ مگاپاسکال و E_s ۲۰۰ گیگاپاسکال بوده؛ همچنین کابل‌های پیش‌تنیده دارای f_y برابر ۱۴۳۵ مگاپاسکال و E_s برابر ۱۸۰ گیگاپاسکال می‌باشند. در تحقیق [۱۷] نتایج، حاکی از دقت مناسب مدل‌سازی است.

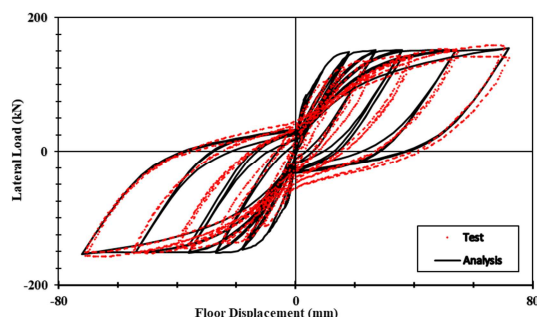
صحت‌سنجی سیستم متداول آیین‌نامه‌ای، مطابق تحقیق [۲۶] انجام می‌شود. مشخصات نمونه آزمایشگاهی مطابق شکل ۷ در نظر گرفته شده است. در این نمونه، ضخامت دیوار ۱۰۲ میلی‌متر می‌باشد. همچنین مشخصات مکانیکی بتن شامل f'_c و E_c به ترتیب برابر ۴۲/۸ مگاپاسکال و ۳۱/۰۳ گیگاپاسکال است. آرماتورهای طولی و عرضی نیز با f_y ۴۳۴ مگاپاسکال و E_s ۲۰۰ گیگاپاسکال استفاده شده است. در این مدل‌سازی، مقطع فایبر جهت مدل‌سازی مقطع دیوار به کار برده شده و در نواحی المان مرزی از بتن محصورشده استفاده گردیده است.



شکل ۷- دیوار متداول آیین‌نامه‌ای آزمایشگاهی [۲۶]

در سیستم متداول آیین‌نامه‌ای، ترک‌هایی در دیوار ایجاد شده و همچنین جاری شدن آرماتورهای طولی، نقش جذب انرژی در سیستم را ایفا می‌کنند. در مدل عددی بعد از قرارگیری این دیوارهای تحت بارهای

چرخه‌ای، نمودار برش پایه- جابه‌جایی بام، مطابق شکل ۸ با نتایج آزمایشگاهی مورد مقایسه قرار گرفته است [۲۶]. مقایسه نمودارهای حاصل از مدل نرم‌افزاری و مدل آزمایشگاهی حاکی از دقت نسبتاً خوب مدل‌سازی است.



شکل ۸- مقایسه رفتار چرخه‌ای مدل آزمایشگاهی و عددی دیوار متداول آیین‌نامه‌ای [۲۶]

۵-۲- رکوردهای لرزهای مورد بررسی

در این تحقیق از سه دسته رکورد دور و نزدیک‌گسل با و بدون پالس، براساس دستورالعمل FEMAP695 استفاده شده است [۲۷]. این رکوردها به تفکیک با مشخصات مربوطه در مقاله بروجدیان و ده‌چشمه نشان داده شده است [۱۷]. با توجه به اینکه رکوردهای افقی دارای دو مؤلفه می‌باشند و تحلیل‌های موردنظر این تحقیق دوطرفه است، یک رکورد در تحلیل‌ها مورد استفاده قرار گرفته است. برای استفاده از رکوردهای دور از گسل در تحلیل‌ها، از رکورد با مؤلفه PGA بیشتر و رکوردهای نزدیک‌گسل، مؤلفه جهت عمود بر گسل انتخاب شده است [۲۸].

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

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

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

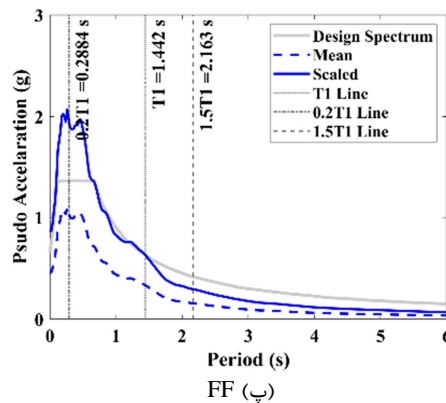
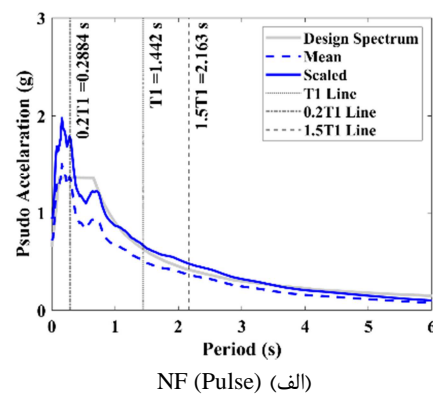
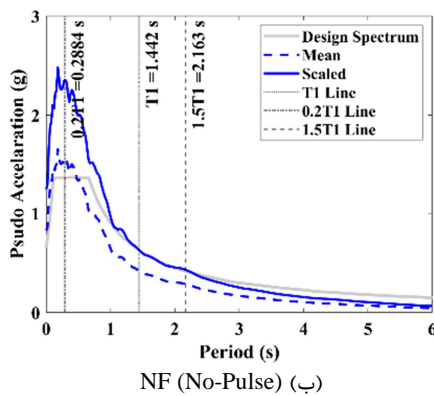
لرزه‌ای، تعیین می‌گردد. بنابراین ضریب مقیاس کلی برای هر رکورد به صورت رابطه (۴) محاسبه می‌گردد:

$$SF_i = NM_i * \text{Max.} \left(\frac{S_{a,T1,DesignSpec.}}{S_{a,T1,Mean}}, \frac{A_{0.2T1-1.5T1,DesignSpec.}}{A_{0.2T1-1.5T1,Mean}} \right) \quad (4)$$

که در آن، SF_i ضریب کلی مقیاس هر رکورد، $S_{a,T1,DesignSpec.}$ و $A_{0.2T1-1.5T1,DesignSpec.}$ به ترتیب شتاب طیفی مود اول و مساحت محدوده $0.2T_1$ تا $1.5T_1$ طیف طراحی و $S_{a,T1,Mean}$ و $A_{0.2T1-1.5T1,Mean}$ به ترتیب شتاب طیفی مود اول و مساحت محدوده $0.2T_1$ تا $1.5T_1$ طیف میانگین رکوردهای لرزه‌ای می‌باشد.

در شکل ۹ طیف مقیاس شده از روش پیشنهادی موردنظر به طیف طرح برای سه ست رکورد زلزله و محدوده‌های موردنظر بررسی طیف $0.2T_1$ ، T_1 و $1.5T_1$ نشان داده شده است. با بررسی و مقایسه طیف میانگین زلزله‌ها در این محدوده، می‌توان گفت میانگین طیف، تخمین نسبتاً خوبی از طیف طرح به دست می‌دهد.

در شبیه‌سازی‌های دوبعدی، برای مقیاس‌سازی رکوردها، معمولاً مطابق آیین‌نامه ASCE7 در محدوده $0.2T_1$ تا $1.5T_1$ میانگین طیف رکوردها به طیف طراحی، مقیاس می‌گردد [۲۹]. طیف مربوط به رکوردهای دورگسل معمولاً دارای مقادیر شتاب طیفی کوچکی در ناحیه پریودهای بیش از یک ثانیه است و برعکس رکوردهای نزدیک‌گسل در این ناحیه دارای مقادیر شتاب طیفی نسبتاً بزرگی می‌باشند. این موضوع در مقیاس‌سازی به طیف طراحی ASCE7، ضریب مقیاس رکوردها دور از گسل نسبت به رکوردهای نزدیک گسل، ضریب مقیاس برای سازه‌های نسبتاً بلند بسیار افزایش می‌یابد. نهایتاً باعث عدم تخمین صحیح در مقایسه این رکوردها با یکدیگر می‌شود. برای اینکه بتوان اثر رکوردهای مختلف را به صورت دقیق‌تر بر سازه‌ها مورد بررسی قرار داد، ضریب مقیاس رکوردها به صورت ماکزیمم نسبت مساحت طیف طرح به طیف میانگین زلزله در محدوده $0.2T_1$ تا $1.5T_1$ و نسبت $S_{a,T1}$ طراحی به $S_{a,T1}$ طیف میانگین رکوردهای



شکل ۹- مقیاس میانگین رکوردهای لرزه‌ای به طیف طرح

۲-۶- ضرایب مطلوبیت سیستم‌های دیوار گهواره‌ای

مرکزگرا

برای تعیین حالت بهینه سازه‌ها در این قسمت سه ضریب برای بررسی سازه‌ها تعیین شده است که این ضرایب به ترتیب عبارتند از:

(۱) مطلوبیت کاهش خمش سیستم گهواره‌ای دوگانه

نسبت به سیستم پایه- گهواره‌ای،

(۲) مطلوبیت کاهش برش سیستم گهواره‌ای دوگانه

نسبت به سیستم پایه- گهواره‌ای و

(۳) مطلوبیت سازه گهواره‌ای از نظر تأمین کاهش

دریافت پسماند نسبت به سازه دیوار برشی

متداول آیین‌نامه‌ای.

(۶)

$$DC = \frac{1}{n}(dc_1 + dc_2 + \dots + dc_n) \quad (۵)$$

ضرایب dc_1 ، dc_2 و dc_n ، ضرایب مطلوبیت سیستم می‌باشند که توسط طراح می‌توانند با توجه به انتظارات در نظر گرفته شوند. این ضرایب به صورت روابط زیر تعریف شده‌اند:

$$dc_1 = \text{Max} \left(\frac{\overline{\text{Max. Moment R}_{1i}} - \overline{\text{Max. Moment R}_{ji}}}{\overline{\text{Max. Moment R}_{1i}}} \right)_{ns}$$

$$dc_2 = \text{Max} \left(\frac{\overline{\text{Max. Shear R}_{1i}} - \overline{\text{Max. Shear R}_{ji}}}{\overline{\text{Max. Shear R}_{1i}}} \right)_{ns}$$

$$dc_3 = \text{Max} \left(\frac{\overline{\text{Max. Residual Drift of Fixed}_i} - \overline{\text{Max. Residual Drift R}_{ji}}}{\overline{\text{Max. Residual Drift of Fixed}_i}} \right)_{ns} \quad (۸)$$

تعیین ضرایب مطلوبیت در سطح DBE^{20} مدنظر بوده است.

۳- نتایج تحقیق و بحث در نتایج

برای بررسی سازه‌ها با پیش‌تئیدگی‌های مختلف و تعیین ضرایب تقویت مقاطع، ابتدا به بررسی یکی از طراحی‌های موجود براساس جابه‌جایی مستقیم پرداخته شده و سپس تعیین حالت بهینه و نیز تعریف و تعیین ضرایب موردنیاز تقویت مقاطع گهواره‌ای مورد مطالعه قرار گرفته است.

۳-۱- بررسی ظرفیت مقاطع سازه به دست آمده از روش

طراحی براساس جابه‌جایی

در روابط فوق dc_1 ، dc_2 و dc_3 به ترتیب ضرایب مطلوبیت جزئی مربوط به خمش، برش و جابه‌جایی نسبی پسماند بعد از زلزله در سیستم است. این مقادیر، به‌عنوان حداکثر ایجاد شده در طبقات انتخاب می‌گردد. مقدار $\overline{\text{Max. Moment R}_{1i}}$ و $\overline{\text{Max. Moment R}_{ji}}$ میان‌مقادیر حداکثر لنگر خمشی ایجاد شده در طبقه i ام به ترتیب مربوط به دیوار R_1 و R_j است. دیوار R_j دیوار پایه- گهواره‌ای و یا گهواره‌ای دوگانه مورد بررسی است. همچنین اندیس i ، نشان‌دهنده رکورد مورد مطالعه می‌باشد. همین‌طور برای تعریف ضریب مطلوبیت برش از کلمه Shear در روابط استفاده شده است. $\overline{\text{Max. Residual Drift of Fixed}_i}$ و $\overline{\text{Max. Residual Drift R}_{ji}}$ به ترتیب میان‌مقادیر حداکثر جابه‌جایی نسبی پسماند ایجاد شده در طبقه i ام مربوط به دیوار پایه‌گیردار و R_j است. دقت شود در این تحقیق، مقادیر تقاضاها جهت

19- Design-Basis Earthquake

برش در طبقات به دلیل تأثیر مودهای بالا در سیستم‌های پایه- گهواره‌ای به شدت افزایش یافته است و با استفاده از بلوک گهواره‌ای، می‌توان این اثرات نیرویی ایجاد شده را کاهش داد. تقاضای نیروی لنگر و برش تحت رکوردهای دور از گسل بیشتر از نزدیک‌گسل با و بدون پالس است. این تقاضاها در رکوردهای نزدیک‌گسل بدون پالس بیشتر از پالس‌دار می‌باشد.

شکل ۱۰- ت مربوط به میانگین ضرایب مطلوبیت سازه‌ها تحت سه نوع رکورد مورد بررسی است. با توجه روابط (۶) و (۷)، مقادیر ضرایب مطلوبیت سیستم گهواره‌ای حالت R_1 تعیین می‌شود، مقادیر ضرایب مطلوبیت dc_1 و dc_2 برابر با صفر است. سازه R_1 از نظر مطلوبیت کاهش دریافت بسیار مؤثر است. در کاهش دریافت نسبت به سیستم متداول آیین‌نامه‌ای (ضرایب dc_3) در سه تیپ رکورد لرزه‌ای نتایج مطلوبی ارائه شده است و تحت رکوردهای نزدیک‌گسل با پالس نتایج بهتری رقم می‌خورد. در بررسی R_2 در این نمودار مشاهده می‌شود که dc_1 و dc_2 برای انواع مختلف رکورد، دارای نتایج مطلوبی است، ولی با توجه به اینکه مقاطع گهواره‌ای براساس ظرفیت طراحی مود اول به دست آمده است و از نظر ظرفیت دریافت و دریافت پسماند بعد از زلزله ضعیف است، ضرایب مطلوبیت dc_3 منفی به دست آمده است. مقادیر این ضرایب در نمودار میله‌ای مربوطه با رنگ قرمز نشان داده شده است.

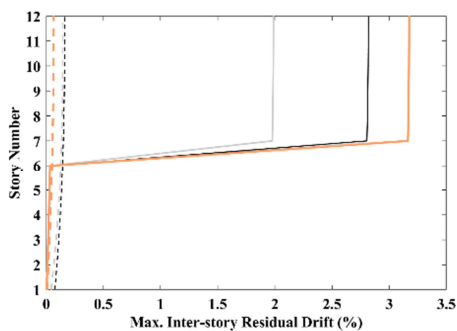
پس می‌توان نتیجه گرفت که عملکرد دیوارهای مرکزگرای گهواره‌ای در ارتفاع، وابسته به نوع رکورد لرزه‌ای و نیز محل مقطع گهواره‌ای در ارتفاع است. همان‌طور که نشان داده شده است، در صورتی که پایه به صورت سیستم دارای هسته پایه- گهواره‌ای (R_1) باشد و ظرفیت طراحی براساس مود اول استفاده شود، با افزایش تلاش‌های برشی و نیز لنگر خمشی در هسته، ماکزیمم دریافت‌های طبقات و دریافت‌های پسماند، کنترل می‌شود. همچنین اگر از حالت سیستم گهواره‌ای چندگانه

در این مقاله، ظرفیت طراحی سازه ۱۲ طبقه از روش طراحی براساس جابه‌جایی (مطابق مود اول) تعیین شده است. در این قسمت به بررسی کفایت ظرفیت سازه مورد نظر در حالت پایه- گهواره‌ای (R_1) و سیستم گهواره‌ای چندگانه (R_2) تحت رکوردهای دور و نزدیک‌گسل با پالس و بدون پالس پرداخته شده است. در طراحی هر مقطع برای تأمین بازگرداندگی مقطع، λ ۱/۲۵ در نظر گرفته شده است. در این طراحی، مقادیر پیش‌تنیدگی برابر با ۰/۵۲ انتخاب شده است. ضریب c در رابطه (۱) برابر ۱ برای طراحی مطابق مود اول، فرض گردیده است.

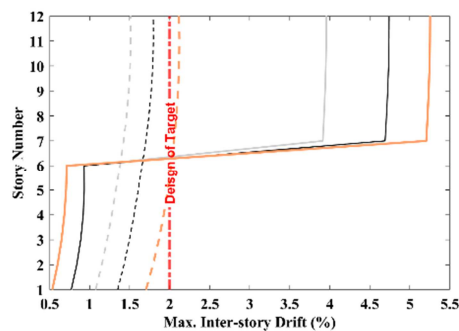
۱۰۰، به بررسی دریافت، لنگر و برش طبقه، دریافت پسماند مقطع گهواره‌ای و همچنین ضرایب مطلوبیت این دو سازه تحت رکوردهای مورد بررسی پرداخته است. شکل ۱۰- الف، میانگین حداکثر جابه‌جایی‌های ایجاد شده در طبقات را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشخص است در دو سازه، تقاضای ایجاد جابه‌جایی در رکورد نزدیک‌گسل بیشتر از دور از گسل در سازه است. همچنین در سازه‌های تحت نزدیک‌گسل دارای پالس، تقاضاها بیشتر از نزدیک‌گسل بدون پالس است. مطابق این شکل، ظرفیت دریافت سازه اصلاً برای مقاطع طراحی شده سیستم‌های گهواره‌ای چندگانه در ارتفاع با توجه به عبور از سطح دریافت مجاز طراحی، مناسب نیست. می‌توان گفت ظرفیت طراحی مقطع برای سیستم‌های پایه- گهواره‌ای تحت رکوردهای دور و نزدیک‌گسل بدون پالس مناسب است. این موارد را نیز در شکل ۱۰- ب که مربوط به میانگین ماکزیمم دریافت‌های پسماند ایجاد شده در طبقات است، می‌توان مشاهده نمود. تحت سه نوع رکورد زلزله مورد نظر، دریافت‌های پسماند زیادی در سیستم گهواره‌ای چندگانه در مقایسه با سیستم گهواره‌ای ساده ایجاد شده است. شکل ۱۰- پ و ت به ترتیب میانگین حداکثر لنگر و برش ایجاد شده در طبقات را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، مقادیر لنگر و

دریافت سازه‌ها را برابر در نظر گرفت و سپس سازه‌ها را از نظر کنترل برش، خمش و کاهش دریفت پسماند مقایسه نمود. بعضاً در بیشتر تحقیقات به این موضوع توجه نشده و نیز سازه‌ها با ظرفیت دریفت‌های مختلف با هم مقایسه شده اند [۳ و ۴].

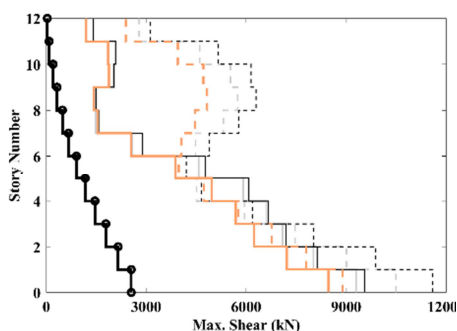
(R₂) با ظرفیت طراحی براساس مود اول استفاده شود، لنگرهای خمشی و نیروی برشی در هسته کاهش می‌یابد و نزدیک به حالت مود اول می‌شود، ولی ماکزیمم دریفت‌ها و جابه‌جایی‌های پسماند طبقات، بسیار افزایش یافته و از حد مجاز عبور می‌کند. لازم به ذکر است، در صورت نیاز به مقایسه دو سیستم، می‌بایست ظرفیت



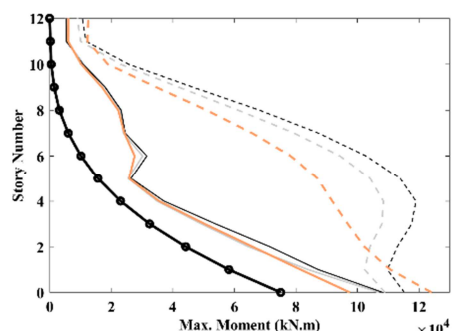
(ب)



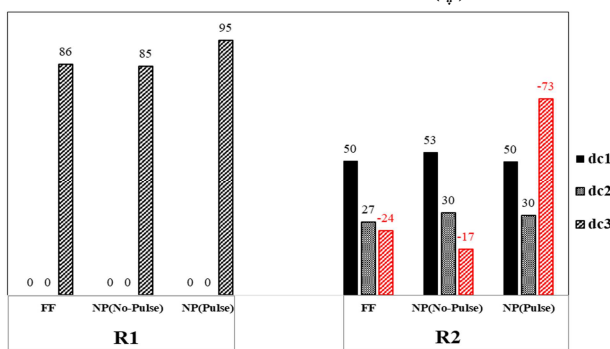
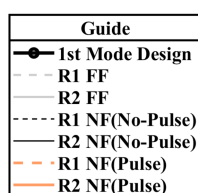
(الف)



(ت)



(پ)



(ث)

شکل ۱۰- نتایج تحلیل سازه‌های مورد بررسی طراحی شده از روش جابه‌جایی براساس مود اول

دریافت این سازه‌ها، می‌بایست ضریب c در رابطه (۱) را تعریف نمود، که به صورت رابطه (۹) می‌باشد:

$$c = \alpha\beta\gamma \quad (۹)$$

در این رابطه، ضریب c مربوط به کنترل جابه‌جایی‌های نسبی مقاطع مختلف طراحی است، ضریب

۲-۳- بررسی ظرفیت مقاطع سازه به دست آمده از روش طراحی براساس جابه‌جایی

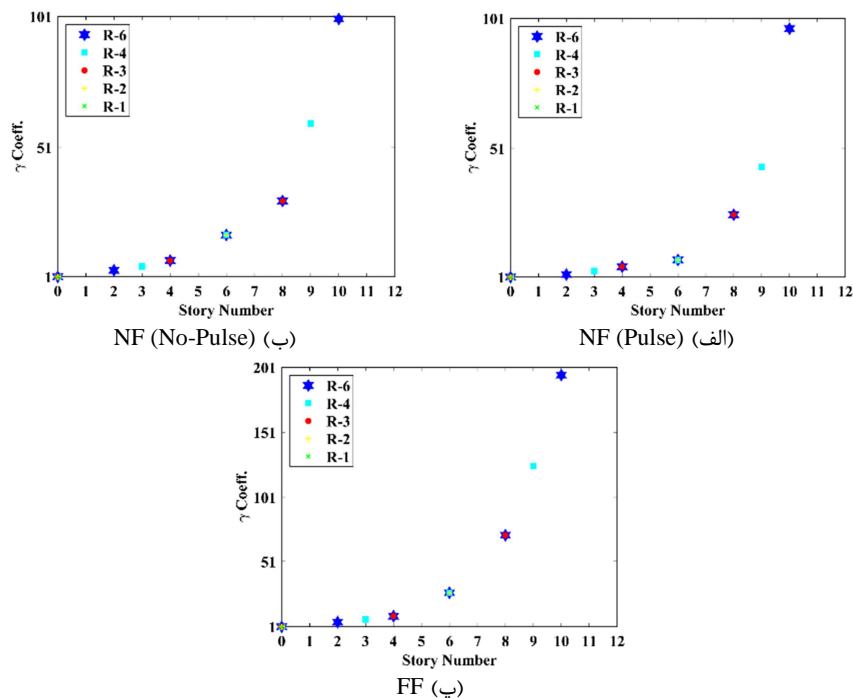
همان‌طور که در قسمت قبل نشان داده شد، مقاطع گهواره‌ای مختلف تحت رکوردهای لرزه‌ای می‌توانند پاسخ‌های مختلفی داشته و برای برابر کردن ظرفیت

α ، اثر نوع زلزله بر مقاومت طراحی مقطع، ضریب β ، اعمال اثر پیش‌تنیدگی‌های مختلف و سختی ثانویه در طراحی مقاطع و ضریب γ مربوط به اضافه مقاومت مقاطع مختلف در ارتفاع می‌باشد. برای تعیین ضریب α ، ابتدا سازه‌های پایه-گهواره‌ای در پیش‌تنیدگی مشخص را تحت رکوردهای مختلف قرار داده و این ضریب، طوری با سعی و خطا تعیین می‌شود که مقدار دریافت حداکثر از حد مجاز طراحی، بیشتر نشود. ضریب β نیز متأثر از پیش‌تنیدگی و نوع زلزله اعمالی است. با افزایش پیش‌تنیدگی، سختی ثانویه نمودار پوش‌آور کاهش می‌یابد. این ضریب، جهت جبران کاهش مقاومت ثانویه، مقدار مقاومت اولیه را افزایش می‌دهد. مقادیر آن برای زلزله‌های N-F(Pulse) نسبت به N-F(No-Pulse) و

در یک پیش‌تنیدگی مشخص، مقاطع مختلف طراحی را مورد بررسی قرار داده و این مقاطع در ارتفاع با این ضریب تقویت می‌شوند. همچنین ظرفیت طراحی شده مقاطع گهواره‌ای با افزایش ارتفاع، افزایش می‌یابد. ضریب γ برای پیش‌تنیدگی‌های مختلف نیز بررسی شده است. ضرایب α و β در جدول ۴ نشان داده شده است. ضرایب γ نیز در شکل ۱۱ در ارتفاع برای مقاطع مختلف گهواره‌ای مشاهده می‌شود. بنابراین با استفاده از ضریب c هر مقطع گهواره‌ای این ساختمان ۱۲ طبقه، قابل طراحی است و همان‌طور که در شکل ۱۱ نشان داده شده است می‌توان گفت ضریب γ در هر ارتفاع بلوک گهواره‌ای وابسته به تعداد بلوک گهواره‌ای نیست.

جدول ۲- ضرایب α و β

NF (Pulse)					NF (No-Pulse)					FF					رکورد
۰/۶	۰/۵	۰/۴	۰/۳	۰/۲	۰/۶	۰/۵	۰/۴	۰/۳	۰/۲	۰/۶	۰/۵	۰/۴	۰/۳	۰/۲	پیش‌تنیدگی
۱/۱۶	۱/۱۴	۱/۱۲	۱/۰۸	۱	۱/۳۲	۱/۲۴	۱/۱۶	۱/۰۸	۱	۱/۴	۱/۳	۱/۲	۱/۱	۱	α
۱					۰/۴۵					۰/۲					β

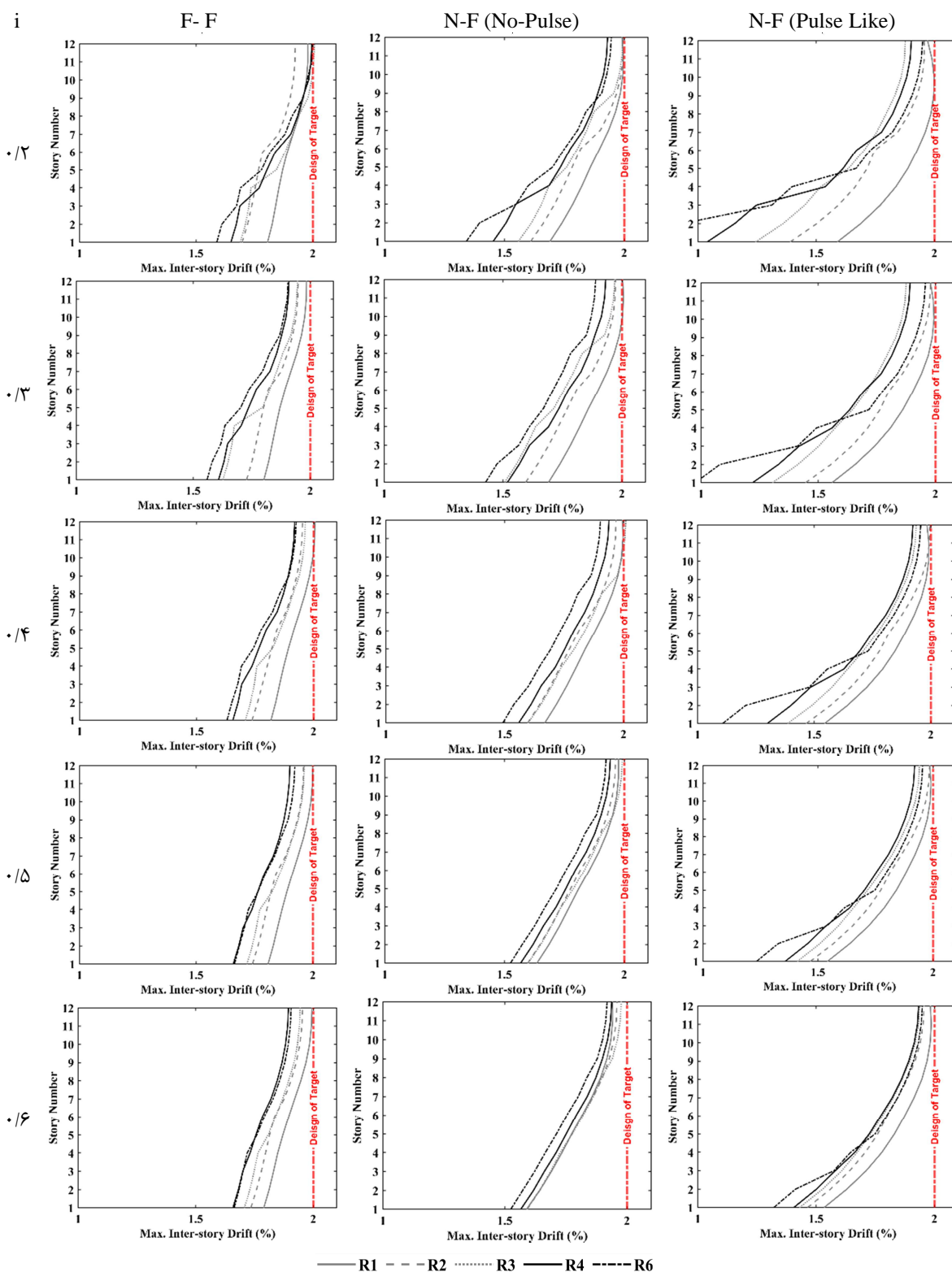
شکل ۱۱- ضرایب γ جهت تقویت مقاطع گهواره‌ای در ارتفاع

در شکل ۱۳ مقادیر میانگین دریافت ماکزیمم با استفاده از اعمال ضرایب در مقاطع گهواره‌ای ساختمان

۱۲ طبقه دارای پیش‌تنیدگی‌های مختلف به‌دست آمده است. همان‌طور که در این شکل مشخص است، ضرایب

است در طراحی سازه‌ها ضرایب طوری تعیین شود که پروفیل دررفت جانبی مشابه هم باشد.

تعیین شده برای سازه‌های دارای پیش‌تنیدگی‌های متفاوت تحت رکوردهای لرزه‌ای مختلف، دارای مطلوبیت لازم در کنترل ماکزیمم دررفت طبقات است. سعی شده



شکل ۱۲- جابه‌جایی‌های نسبی سازه تحت رکوردهای دور و نزدیک با پالس و بدون پالس و پیش‌تنیدگی‌های مختلف

۳-۳- ضرایب افزایش مطلوبیت دریفت پسماند

جدول ۳- ضرایب ρ

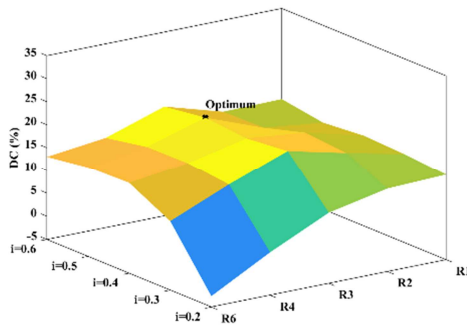
NF (Pulse)	NF (No-Pulse)	FF	ρ
۱	۲	۳	

۴-۳- تعیین حالت بهینه سازه‌ها

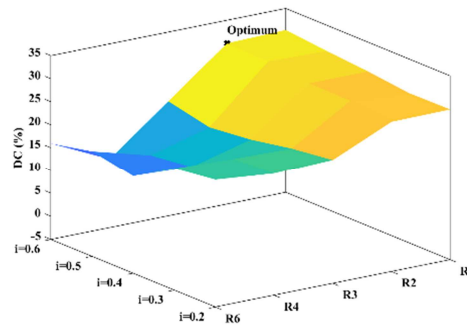
برای حالت بهینه، از ضریب مطلوبیت (DC) تعیین شده در قسمت ۲-۶ استفاده شده است. در شکل ۱۳ ضریب DC برای سازه‌های ۱۲ طبقه موردنظر با پیش‌تنیدگی و تعداد بلوک گهواره‌ای مختلف، سه نوع رکورد لرزه‌ای موردنظر تعیین شده است. حالت بهینه تحت رکوردهای FF، NF(No-Pulse) و NF(Pulse) به ترتیب سازه R_3 ، R_2 و R_3 دارای پیش‌تنیدگی به ترتیب ۰/۳، ۰/۵ و ۰/۶ است. ضرایب مطلوبیت برای سه سازه بهینه تحت رکوردهای FF، NF(No-Pulse) و NF(Pulse) به ترتیب برابر با ۲۱، ۲۰ و ۳۰ درصد است.

در قسمت قبل سازه‌ها برای دریفت ماکزیمم مشخص طراحی شده است. همچنین نشان داده شد که این ضرایب برای این سازه‌ها به‌درستی تخمین زده شده و میانگین دریفت‌های ماکزیمم در طبقات کمتر از دریفت مدنظر طراحی است، ولی در بعضی از سازه‌ها با بررسی ضریب مطلوبیت، ماکزیمم دریفت پسماند مشاهده شده است. بنابراین سازه‌ها از نظر دریفت پسماند جوابگو نبودند. یکی از راه‌حل‌های افزایش ضریب مطلوبیت دریفت پسماند، افزایش مقاومت طراحی مقاطع است. در این قسمت، ضریب ρ برای افزایش مقاومت طراحی ارائه شده است. این ضریب، مطابق جدول ۳ پیشنهاد شده است. ضریب اضافه مقاومت در مقاطع گهواره‌ای به‌صورت زیر اصلاح می‌گردد:

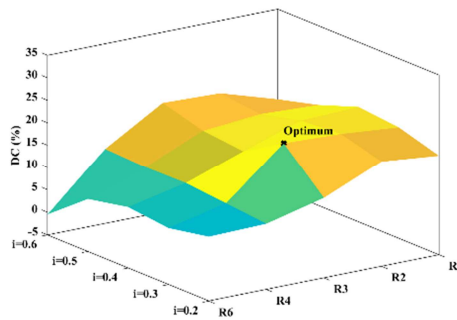
$$c = \alpha\beta\gamma\rho \quad (10)$$



NF (No-Pulse) (ب)



NF (Pulse) (الف)



FF (پ)

شکل ۱۳- ضرایب کلی مطلوبیت بهینه سازه‌های گهواره‌ای چندگانه تحت رکوردهای مختلف و پیش‌تنیدگی‌های متفاوت در سطح BDE مشخص است مقادیر dc_1 و dc_2 نسبت به dc_3 دارای مقدار کمتری است. در اصل، این اختلاف برخلاف قسمت

در شکل ۱۴، مقادیر ضرایب مطلوبیت dc_1 ، dc_2 و dc_3 برای سه حالت بهینه تعیین شده است. همان‌طور که

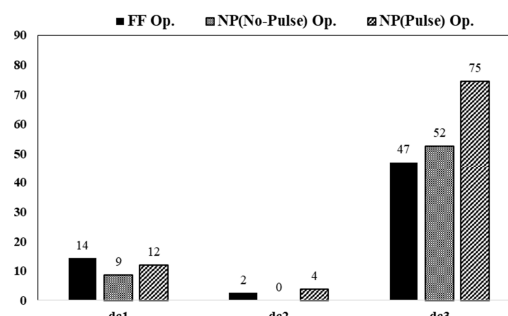
۴- نتیجه‌گیری

سیستم‌های گهواره‌ای امروزه جزو سیستم‌های نوین لرزه‌ای جهت کنترل آسیب‌پذیری تحت بارهای لرزه‌ای به‌صورت گسترده مورد تحقیق و بررسی قرار می‌گیرد. این سیستم‌ها علاوه بر ویژگی‌های منحصربه‌فرد از جمله، کاهش جابه‌جایی‌های پسماند بعد از زلزله، تمرکز کردن آسیب‌ها در فیوزها و جلوگیری از گسترش آسیب در کل سازه، تعویض‌پذیری فیوز و قابلیت اطمینان بالا، می‌توانند معایبی نیز داشته باشند، مانند افزایش لنگر و برش در هسته گهواره‌ای. یکی از راهکارهای کاهش لنگر و برش در هسته گهواره‌ای استفاده از سیستم‌های گهواره‌ای چندگانه است. تأثیر انواع رکورد بر سیستم‌ها می‌تواند متفاوت باشد. در این تحقیق به بررسی سیستم گهواره‌ای چندگانه ساختمان ۱۲ طبقه پرداخته شده و شبیه‌سازی در نرم‌افزار اجزای محدود OpenSees به‌صورت دوبعدی انجام شده است. نتایج کلی این تحقیق به‌صورت زیر است:

(۱) مقاومت طراحی دیوار ۱۲ طبقه پایه-گهواره‌ای طراحی شده براساس جابه‌جایی و مود اول، تحت رکوردهای FF (No-Pulse) و NF (No-Pulse) از نظر کنترل دررفت ماکزیمم و پسماند مناسب است، ولی برای رکوردهای NF (Pulse) مناسب نمی‌باشد.

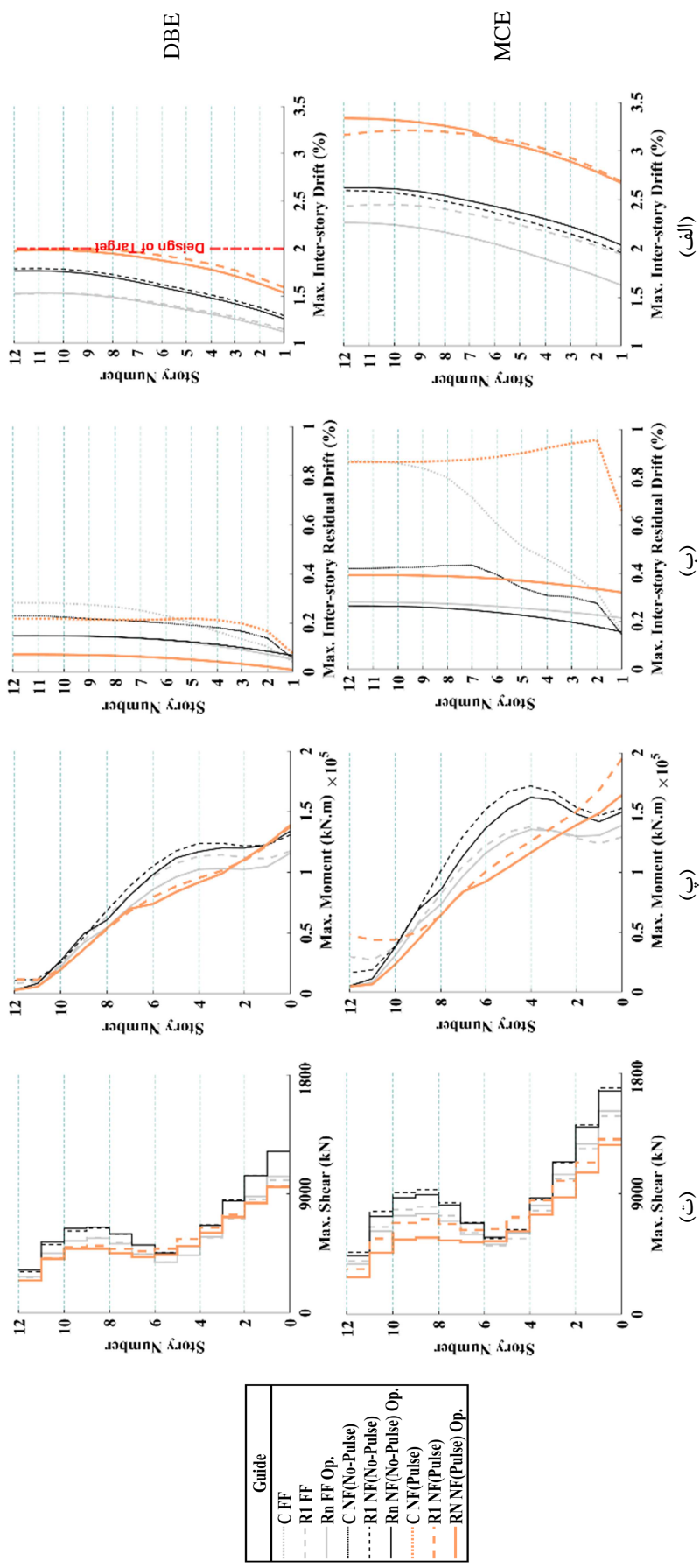
(۲) مقاومت طراحی دیوار ۱۲ طبقه گهواره‌ای چندگانه براساس طراحی با توجه به جابه‌جایی و مود اول، تحت رکوردهای FF، NF (No-Pulse) و NF (Pulse) از نظر کنترل دررفت ماکزیمم و پسماند مناسب نیست، ولی با توجه به افزایش جابه‌جایی‌ها در کاهش تلاش‌های برشی و خمشی در سیستم بسیار مؤثر است.

۲-۳، افزایش مقاومت در هسته‌های گهواره‌ای در ارتفاع و همچنین طراحی نسبتاً دقیق براساس دررفت ماکزیمم است. با این اوصاف هرچه دررفت‌های طراحی دو سازه مورد مقایسه به یکدیگر نزدیک باشند، مقادیر کاهش لنگر و برش ناشی اثرات موده‌های بالا کمتر است. همچنین می‌توان گفت همچنان مطلوبیت این سیستم از نظر کاهش دررفت پسماند قابل قبول است.



شکل ۱۴- ضرایب مطلوبیت جزئی سازه‌های گهواره‌ای چندگانه بهینه طراحی شده تحت انواع رکورد لرزه‌ای در سطح BDE

شکل ۱۵ به بررسی و مقایسه سازه‌های انتخابی بهینه گهواره‌ای چندگانه پرداخته شده است. در شکل ۱۵- الف، جابه‌جایی نسبی میان طبقه‌ای نشان داده شده است. در این شکل پروفیل R_1 و R_n سازه بهینه انتخاب شده، مشابه یکدیگر است. این موضوع با توجه به اینکه سازه دقیق برای دررفت مشخصی طراحی شده است، با تبدیل سازه پایه-گهواره‌ای به چندگانه، انتظار افزایش مقادیر کاهش برش و خمش در سه نوع زلزله طراحی، مطابق شکل ۱۵- پ و ث نمی‌رود. همچنین می‌توان گفت در سطح DBE، طراحی‌ها مطلوب بوده و سطح دررفت مجاز را رد نمی‌کنند. در سطح MCE، دررفت سازه طراحی شده برای رکورد NF (Pulse) از حد $2/5$ درصد عبور کرده و نمی‌تواند مطلوبیت کافی را داشته باشد. مطلوبیت سازه‌های گهواره‌ای در کاهش دررفت پسماند و همچنین خمش و برش در سطح زلزله MCE مؤثرتر از DBE است که این موضوع به دلیل عبور مقاطع گهواره‌ای از حد M_{Design} بوده و این موضوع باعث کاهش تلاش‌ها در اعضا می‌گردد.



شکل ۱۵ - بررسی مقادیر پاسخ و تلاش در سازه‌های بهینه‌ی گهوارهای چندگانه، (الف) میانگین ماکزیمم جابه‌جایی نسبی طبقات، (ب) ماکزیمم جابه‌جایی نسبی پسماند طبقات، (پ) میانگین ماکزیمم خمشی ایجادشده در هسته و (ت) میانگین ماکزیمم برش ایجاد شده در هسته

و برش می‌تواند تأثیر زیادی داشته باشد. توصیه می‌شود که در یافت در تمامی طبقات به صورت حدی (حد مجاز) طراحی نگردد. در قسمت‌هایی که نیاز به کاهش تلاش‌های خمشی و برشی بیشتری است (قسمت‌های میانی) سازه نرم‌تر عمل کرده و در یافت این سازه نسبت به این قسمت کنترل گردد.

سیستم‌های پایه- گهواره‌ای و گهواره‌ای چندگانه می‌توانند جزو سیستم‌های نوین لرزه‌ای، جایگزین مناسب سیستم‌های سازه‌ای متداول آیین‌نامه‌ای باشند. در این تحقیق، رفتار بهینه سازه ۱۲ طبقه پایه- گهواره‌ای و گهواره‌ای چندگانه مورد بررسی و مقایسه قرار گرفته شد. ضرایب طراحی با توجه با روش طراحی براساس مود اول برای این سیستم‌ها تحت رکوردهای مختلف لرزه‌ای پیشنهاد شده است. این سازه‌ها امروزه می‌توانند مورد توجه بیشتر مهندسان برای استفاده در طراحی‌ها قرار گیرند.

جهت ادامه تحقیقات در رابطه با دیوارهای مرکزگرای گهواره‌ای موارد ذیل پیشنهاد می‌گردد:

- تعیین ضرایب طراحی لرزه‌ای سیستم‌های مورد نظر از روش‌های احتمالاتی.

- تعیین ضرایب طراحی لرزه‌ای سیستم‌های مورد نظر با مطالعه پارامتریک.

- تعیین محل بهینه قطع بلوک‌های گهواره‌ای در ارتفاع‌های مختلف.

- طراحی بهینه مبتنی بر قابلیت اعتماد سیستم‌های مورد نظر

(۳) رفتار دیوارهای ۱۲ طبقه پایه- گهواره‌ای و گهواره‌ای چندگانه، وابستگی زیادی به نوع رکورد از نظر دور از گسل بودن و یا نزدیک گسل بودن و همچنین دارای پالس و بدون پالس بودن رکورد نزدیک گسل دارد. به طوری که رفتار سیستم‌های پایه- گهواره‌ای تحت رکوردهای نزدیک گسل به مقاومت بیشتری نسبت به دور از گسل نیاز است. در سیستم‌های گهواره‌ای چندگانه در قطعات گهواره‌ای بالاتر از پایه، مقاومت بیشتری جهت طراحی سیستم نیاز است.

(۴) مقاومت دیوار ۱۲ طبقه گهواره‌ای چندگانه در ارتفاع، وابسته به تعداد بلوک گهواره‌ای نیست. در یک تراز مشخص می‌توان مقاومت سیستم مورد نظر با تعداد بلوک مختلف را برابر در نظر گرفت.

(۵) مقدار پیش‌تنیدگی در طراحی سیستم دیوار گهواره‌ای ۱۲ طبقه می‌تواند در نتایج طراحی مؤثر باشد. همچنین با توجه به نوع رکورد، می‌توان مقدار متفاوتی برای سیستم انتخاب نمود.

(۶) حالت بهینه دیوار گهواره‌ای چندگانه ۱۲ طبقه، تحت رکوردهای FF، NF(No-Pulse) و NF(Pulse) به ترتیب سازه در R_2 و R_3 ، دارای پیش‌تنیدگی 0.03 ، 0.05 و 0.06 است.

(۷) افزایش پیش‌تنیدگی برای تأمین نیروی مشخص بازگرداندگی در سیستم گهواره‌ای ۱۲ طبقه، می‌تواند حجم کابل مصرفی را کاهش دهد.

(۸) در طراحی سیستم دیوار ۱۲ طبقه گهواره‌ای چندگانه، انتخاب پروفیل دریافت در کاهش لنگر

مراجع

- [1] Wiebe, L. D. A. (2013). *Design of controlled rocking steel frames to limit higher mode effects*. Doctoral dissertation.
- [2] Wiebe, L., & Christopoulos, C. (2015). "A cantilever beam analogy for quantifying higher mode effects in multistorey buildings", *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 44(11), 1697-1716.

- [3] Wiebe, L., & Christopoulos, C. (2009). "Mitigation of higher mode effects in base-rocking systems by using multiple rocking sections", *Journal of Earthquake Engineering*, 13(S1), 83-108.
- [4] Khanmohammadi, M., & Heydari, S. (2015). "Seismic behavior improvement of reinforced concrete shear wall buildings using multiple rocking systems", *Engineering Structures*, 100, 577-589.
- [5] SKang, S. M., Kim, O. J., & Park, H. G. (2013). "Cyclic loading test for emulative precast concrete walls with partially reduced rebar section", *Engineering Structures*, 56, 1645-1657.
- [6] Shoujun, W., Peng, P., & Dongbin, Z. (2016). "Higher mode effects in frame pin-supported wall structure by using a distributed parameter model", *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 45(14), 2371-2387.
- [7] Wu, D., Zhao, B., & Lu, X. (2018). "Dynamic behavior of upgraded rocking wall-moment frames using an extended coupled-two-beam model", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 115, 365-377.
- [8] Buddika, H. S., & Wijeyewickrema, A. C. (2018). "Seismic shear forces in post-tensioned hybrid precast concrete walls", *Journal of Structural Engineering*, 144(7), 04018086.
- [9] Najam, F. A., Qureshi, M. I., Warnitchai, P., & Mehmood, T. (2018). "Prediction of nonlinear seismic demands of high-rise rocking wall structures using a simplified modal pushover analysis procedure", *The Structural Design of Tall and Special Buildings*, 27(15), e1506.
- [10] Qureshi, M. I., & Warnitchai, P. (2017). "Reduction of inelastic seismic demands in a mid-rise rocking wall structure designed using the displacement-based design procedure", *The Structural Design of Tall and Special Buildings*, 26(2), e1307.
- [11] Hasan, M. R. (2012). *Parametric Study and Higher Mode Response Quantification of Steel Self-Centering Concentrically-Braced Frames*. Doctoral dissertation, University of Akron.
- [12] Wiebe, L., Christopoulos, C., Tremblay, R., & Leclerc, M. (2013). "Mechanisms to limit higher mode effects in a controlled rocking steel frame. 1: Concept, modelling, and low-amplitude shake table testing", *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 42(7), 1053-1068.
- [13] Wiebe, L., Christopoulos, C., Tremblay, R., & Leclerc, M. (2013). "Mechanisms to limit higher mode effects in a controlled rocking steel frame. 2: large-amplitude shake table testing", *Earthquake engineering & structural dynamics*, 42(7), 1069-1086.
- [14] Steele, T. C., & Wiebe, L. D. (2018). "Reducing the Forces in Controlled Rocking Steel Braced Frames Using Partial Ductile Behavior", *Eleventh U.S. National Conference on Earthquake Engineering*, Los Angeles, California.
- [15] Steele, T. C., & Wiebe, L. D. (2016). "Dynamic and equivalent static procedures for capacity design of controlled rocking steel braced frames", *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 45(14), 2349-2369.
- [16] Li, T., Berman, J. W., & Wiebe, R. (2017). "Parametric study of seismic performance of structures with multiple rocking joints", *Engineering Structures*, 146, 75-92.
- [17] Broujerdian, V., & Mohammadi Dehcheshmeh, E. (2021). "Development of fragility curves for self-centering rocking walls subjected to far and near field ground motions", *Sharif Journal of Civil Engineering*. doi: 10.24200/j30.2021.57279.2897.
- [18] Zhou, Y. L., Han, Q., Du, X. L., & Jia, Z. L. (2019). "Shaking table tests of post-tensioned rocking bridge with double-column bents", *Journal of Bridge Engineering*, 24(8), 04019080.
- [19] Ahmadi, E., & Kashani, M. M. (2020). "Numerical investigation of nonlinear static and dynamic behaviour of self-centring rocking segmental bridge piers", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 128, 105876.
- [20] Ali, M. (2018). "Role of post-tensioned coconut-fibre ropes in mortar-free interlocking concrete construction during seismic loadings", *KSCE Journal of Civil Engineering*, 22(4), 1336-1343.
- [21] Yassin, A., Ezzeldin, M., Steele, T., & Wiebe, L. (2020). "Seismic Collapse Risk Assessment of Posttensioned Controlled Rocking Masonry Walls", *Journal of Structural Engineering*, 146(5), 04020060.
- [22] Pilon, D. S., Palermo, A., Sarti, F., & Salenikovich, A. (2019). "Benefits of multiple rocking segments for CLT and LVL Pres-Lam wall systems", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 117, 234-244.
- [23] Hashemi, A., & Quenneville, P. (2020). "Large-scale testing of low damage rocking Cross Laminated Timber (CLT) wall panels with friction dampers", *Engineering Structures*, 206, 110166.
- [24] Pennucci, D., Calvi, G. M., & Sullivan, T. J. (2009). "Displacement-based design of precast walls with additional dampers", *Journal of Earthquake Engineering*, 13(S1), 40-65.
- [25] Restrepo, J. I., & Rahman, A. (2007). "Seismic performance of self-centering structural walls incorporating energy dissipators", *Journal of Structural Engineering*, 133(11), 1560-1570.
- [26] Orakcal, K., & Wallace, J. W. (2006). "Flexural modeling of reinforced concrete walls-experimental verification", *ACI Materials Journal*, 103(2), 196.
- [27] Applied Technology Council, & United States. Federal Emergency Management Agency. (2009). *Quantification of building seismic performance factors*. US Department of Homeland Security, FEMA.
- [28] Archila, M. (2014). *Directionality effects of pulse-like near field ground motions on seismic response of tall buildings*. Doctoral dissertation, University of British Columbia.

[29] American Society of Civil Engineers. (2013). *Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures* (ASCE/SEI 7-10). American Society of Civil Engineers.