

تأثیر مودهای بالاتر ارتعاشی در ساختمان‌های دارای جداگر پایه «پاندولی تکی» با پلان نامنظم

مهدی امری (دانشجوی دکتری)

گروه مهندسی عمران، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات، تهران

عبدالرضا سروقد مقدم* (دانشیار)

پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله، تهران

آرمین عظیمی‌نژاد (استادیار)

محمدرضا منصوری (استادیار)

گروه مهندسی عمران دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات، تهران

مهندسی عمران شریف، تابستان ۱۴۰۲ (دوره ۳، شماره ۲، صص. ۱۱۴-۱۰۳، پژوهشی)

کارایی یک ساختمان با سیستم جداسازی پایه، از مودهای بالاتر تأثیر می‌پذیرد. با توجه به نبود مطالعات برای بسیاری از انواع پلان‌های نامنظم در ساختمان‌های دارای جداساز پایه پاندولی، در مطالعه‌ی حاضر به پوشش طیف وسیعی از میزان نامنظمی چیدمان‌های مختلف جداگرها پرداخته شده است. به منظور بررسی تأثیر مودهای بالاتر ارتعاشی در ساختمان‌های دارای جداگر پایه پاندولی، یک مطالعه‌ی پارامتریکی روی مدل‌های ساختمانی با پلان‌های مختلف در ساختمان‌های ۲، ۴ و ۶ طبقه با پلان L شکل، همچنین از ۴ ساختمان یک طبقه با خروج از مرکزیت‌های متفاوت مرکز جرم و سختی و ساختمان‌های U و S شکل در مطالعه‌ی حاضر انجام شده است. در هر کدام از ساختمان‌ها از ۸ چیدمان مختلف جداگر پایه پاندولی استفاده شده است. زمان تناوب مودهای مختلف ارتعاشی، درصد مشارکت جرمی مودها و تغییرات متوسط بیشینه‌ی جابه‌جایی تراز پایه تحت ۱۲ شتاب‌نگاشت مقایسه شده است. نتایج کلی تحلیل‌ها نشان می‌دهد که در صورت انطباق مرکز سختی تمامی جداگرهای پایه بر مرکز جرم تجمعی در تراز پایه از درصد مشارکت جرمی مود اول کاسته و در عوض، به درصد مشارکت جرمی مودهای دوم یا سوم و بالاتر اضافه می‌شود. لذا، مود دوم و یا بالاتر، تعیین‌کننده‌ی پاسخ‌های سازه می‌شود و تغییر مکان تراز پایه به میزان قابل توجهی کاهش می‌یابد.

واژگان کلیدی: مودهای بالاتر ارتعاشی، درصد مشارکت جرمی، سیستم جداگر پایه پاندولی تکی، مرکز سختی و مرکز جرم تجمعی در تراز پایه، مرکز سختی و مرکز شعاع انحناء جداگر پایه پاندولی.

mehdi_amri@yahoo.com
moghadam@iies.ac.ir
arminaziminejad@srbiau.ac.ir
mman@srbiau.ac.ir

۱. مقدمه

مشاهده کرد، که در آنها زمان تناوب مود اول در ناحیه‌ی حساس به سرعت یا جابه‌جایی طیف و زمان تناوب مود دوم در ناحیه‌ی حساس به شتاب قرار می‌گیرد که در برش تأثیرگذار است. همچنین جرم مؤثر مودی در مود دوم بزرگ‌تر از مود اول است. لذا مود دوم، تعیین‌کننده‌ی مقدار برش پایه است.^[۱،۲] پدیده‌ی دوم، افزایش شتاب‌های غیرمنتظره‌ی کف طبقات به مقدار بیش از مقادیر ارزیابی شده توسط مدل‌های تحلیلی است. برای مثال، در طول زمین‌لرزه‌ی نورتریج، بیشینه‌ی شتاب طبقات بیش از ۴ برابر بیشینه‌ی شتاب زمین اندازه‌گیری شده است. نیروهای

مطالعات محدودی در سیستم‌های سازه‌یی با قاب‌های سازه‌یی وجود دارند که امکان تأثیرگذاری حالت غیرخطی ناشی از آسیب ساختمان در مودهای بالا را نشان می‌دهند و تاکنون دو پدیده از این لحاظ ارزیابی شده است.^[۱،۲] اولین پدیده را می‌توان در افزایش مقدار برش پایه در سازه‌های دارای دیوار بتنی لاغر

* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۴۰۱/۸/۱۶، اصلاحیه ۱۴۰۱/۱۲/۱۳، پذیرش ۱۴۰۱/۱۲/۲۳.

DOI:10.24200/J30.2023.61073.3147

استناد به این مقاله:

امری، مهدی، سروقد مقدم، عبدالرضا، عظیمی‌نژاد، آرمین و منصوری، محمدرضا، ۱۴۰۲. تأثیر مودهای بالاتر ارتعاشی در ساختمان‌های دارای جداگر پایه «پاندولی تکی» با پلان نامنظم. مهندسی عمران شریف، ۳۹(۲)، صص. ۱۱۴-۱۰۳.

اینرسی وارد بر کف به شتاب کف مرتبط است، لذا ارزیابی نادرست از شتاب طبقه، تخمین نادقیقی از نیروهای اینرسی طبقه را نشان خواهد داد که در طراحی اجزاء سازه‌ای و غیرسازه‌ای متعدد تأثیرگذار خواهد بود.^[۵] از سوی دیگر، حتی با توجه به استفاده‌ی آیین‌نامه‌های مدرن کنونی از تحلیل‌های چند مودی دوکاستی هنوز باقی‌مانده است. یکی آنکه، از ضریب رفتار واحدی برای تمامی مودهای مؤثر ارتعاشی استفاده می‌شود و دیگر آنکه، مقادیر طیف طراحی با استفاده از زمان تناوب کشسان، بدون در نظر گرفتن تغییر سختی در محدوده‌ی غیرخطی محاسبه می‌شود.^[۲]

بررسی ادبیات فنی نشان می‌دهد که تاکنون مطالعه‌ی چندانی بر روی تأثیر مودهای مختلف ارتعاشی در سازه‌های دارای جداگر پایه پاندولی انجام نشده است. از طرف دیگر، عملکرد سازه‌های دارای جداگر پایه پاندولی براساس افزایش زمان تناوب صورت می‌پذیرد و تأثیر مودهای بالتر ارتعاشی در سازه‌هایی با زمان تناوب بالا بیشتر مشهود است. لذا در پژوهش حاضر سعی شده است اثر مودهای بالتر در ساختمان‌های نامنظم در پلان با چیدمان مختلف جداگر پایه پاندولی تکی بررسی شود. از سوی دیگر، دو شاخص مرکز شعاع انحناء تمامی جداگرهای پایه پاندولی و مرکز سختی تمامی جداگرهای پایه پاندولی تعریف و مطالعه‌ی بر روی تأثیر نقاط مذکور در پاسخ سازه‌ها انجام شده است. همچنین بررسی مبنی بر بهینه‌سازی نحوه‌ی چیدمان‌های مختلف جداگرهای پایه پاندولی صورت گرفته است.

۲. مروری بر چند نمونه از مطالعات پیشین

مطالعه‌ی عددی بر روی تأثیر مودهای بالتر ارتعاشی در ساختمان‌های برشی، که در آنها میراگر ویسکوکشسان به صورت غیریکنواخت توزیع شده بود، توسط تسای و چانگ^[۲۰۲] بررسی شده و نشان داده است که اثر مودهای بالتر در ساختمان‌های دارای میراگر ویسکوکشسان با زمان تناوب طولانی قابل توجه است. همچنین، تأثیر آن در مقدار برش پایه، کمتر از شتاب طبقات بوده و در طبقات بالا این تفاوت بیشتر مشاهده شده است.^[۷]

دانشجو و گرامی^[۲۰۳]، براساس تحلیل طیفی و تحلیل دینامیکی تاریخیچه‌ی زمانی خطی و غیرخطی به بررسی آثار مودهای بالتر در پاسخ لرزه‌ی قاب‌های خمشی فولادی چنددرجه آزادی با تعداد طبقات ۴، ۱۰، ۱۵، ۲۰ و ۲۵ طبقه، تحت زمین‌لرزه‌های: السنترو، طیس، ناغان و منجیل پرداخته و برای اعمال تأثیر مودهای بالتر در تبدیل سازه‌ی یک درجه آزادی به چند درجه آزادی، ضرایب اصلاحی برای پاسخ‌های دررفت، جابه‌جایی، برش و شکل‌پذیری ارائه داده‌اند.^[۸] تسای و همکاران^[۲۰۴]، در رابطه با توزیع نیروی جانبی در ارتفاع سازه‌ی بالای جداگر پایه پرداخته و دریافته‌اند که رابطه‌ی مربوط به آیین‌نامه‌ی UBC-۹۷ بسیار محافظه‌کارانه است و رابطه‌ی برای آن ارائه داده‌اند.^[۹] نقش تحلیل‌های پوش‌آور با مودهای بالتر در تحلیل لرزه‌ی ساختمان‌ها توسط راکش کی گوئل و همکاران^[۲۰۵]، بررسی شده است.

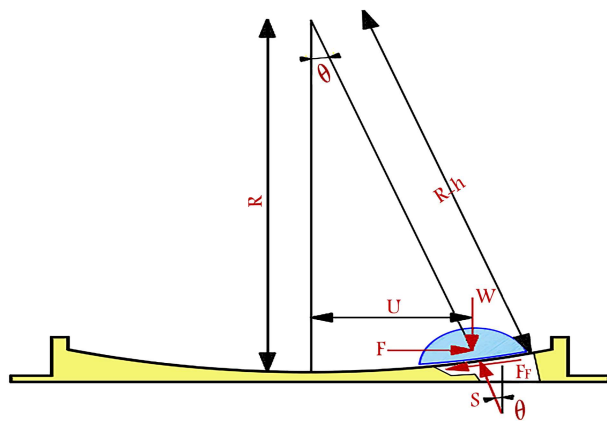
مانیاناکیس^۲ و همکاران^[۲۰۱۳]، نتایج حاصل از پاسخ‌های تحلیل طیفی مودال با تحلیل تاریخیچه‌ی زمانی غیرخطی را در ساختمان ۹ طبقه‌ی بتنی که انتظار می‌رفت مود اول بر آن غالب باشد، مقایسه کرده و نتیجه گرفته‌اند که نیروهای اینرسی طبقه و شتاب همه‌ی طبقات و نیروهای برشی در طبقات بالتر با روش‌هایی که مودهای بالتر نادیده می‌گیرند، به درستی محاسبه نمی‌شوند، حتی برای سازه‌هایی که مد اول بر آنها حاکم است، به طور قابل توجهی دست‌کم گرفته می‌شوند و سهم

مودهای بالتر به ویژگی‌های حرکت زمین، مقاومت مازاد هر مود و کمیت پاسخ مورد بررسی بستگی دارد.^[۱۰] خوشنودیان و نوزادی^[۲۰۱۳]، توزیع عمودی نیروی برش پایه در ارتفاع سازه‌های دارای جداگر پایه‌ی الاستومتری را با در نظر گرفتن آثار مد بالتر تحت زلزله‌های حوزه‌ی نزدیک بررسی کردند و دریافته‌اند که رفتار غیرخطی سیستم‌های دارای جداگر پایه باعث تغییر بسامدهای ارسالی به سازه‌ی فوقانی می‌شود و آثار مودهای بالتر را باید در نظر گرفت و رابطه‌ی برای توزیع برش پایه در ارتفاع سازه‌های دارای جداگر پایه، که شامل ویژگی‌های سیستم جداگر پایه‌ی الاستومتری تحت زمین‌لرزه‌های حوزه‌ی نزدیک بود، را ارائه کردند.^[۱۱] سیاپلو و همکاران^[۲۰۱۷]، پی بردند که تأثیر مودهای بالتر تحت زلزله‌های حوزه‌ی نزدیک در راستای موازی با گسل بیشتر از زلزله‌های عمود بر راستای گسل است و طبقات فوقانی سازه‌ها بیشتر تحت تأثیر مودهای بالتر قرار می‌گیرند، به طوری که تقریباً اثر مودهای بالتر در ۲۰ الی ۴۰ درصد ارتفاع طبقات فوقانی حاکم است و طبقات میانی و تحتانی سازه‌ها بیشتر تحت تأثیر مود اول هستند. همچنین نتایج نشان داده است که آثار مودهای بالتر با افزایش زمان تناوب سازه‌ها افزایش یافته است.^[۱۲]

بهنودگنجوی و همکاران^[۲۰۱۶]، نشان دادند که در موارد کشسان و غیرکشسان، آثار مودهای بالتر برای سیستم‌های خاک - سازه در مقایسه با ساختمان‌هایی بر پایه‌ی تکیه‌گاه ثابت بیشتر مشاهده می‌شود.^[۱۳]

قلهکی و سلیم بهرامی^[۲۰۱۹]، به بررسی نسبت انرژی چرخه‌ی بی به کل انرژی تلف شده در سازه‌های قاب خمشی بتنی به همراه دیوار برشی فولادی پرداختند و نشان دادند در سیستم‌های چنددرجه آزادی، تغییرات نسبت انرژی چرخه‌ی بی به کل انرژی تلف شده مستقل از زمان تناوب است؛ به طوری که اثر مودهای بالتر چندان در آن قابل توجه نیست. همچنین برای سیستم چنددرجه آزادی با افزایش ضریب شکل‌پذیری، این نسبت به نتایج سیستم یک درجه آزادی نزدیک‌تر می‌شود، به طوری که افزایش ضریب شکل‌پذیری منجر به کاهش آثار مودهای بالتر می‌شود.^[۲] فاطمی^۳ و همکاران^[۲۰۲۰]، در یک مطالعه‌ی آزمایشگاهی بر روی سازه‌ی دارای دیوار برشی نشان دادند که ضریب تقویت برشی ناشی از آثار مودهای بالتر غیرخطی می‌تواند بیشتر از ۱/۵ برابر باشد. طبق نتایج آزمایشگاهی به نظر می‌رسد در محاسبه‌ی مقاومت نیروی برشی وارد بر دیوارهای بتنی سازه‌ی بی، آیین‌نامه‌های مدرن سازه‌ی بی به صورت محافظه‌کارانه عمل می‌کنند.^[۱۴] رفیعی و همکاران^[۲۰۱۹]، در بررسی تأثیر مودهای بالتر در ضریب کاهش مقاومت سازه‌های قاب خمشی به همراه دیوار برشی بتنی دریافته‌اند که مقدار ضریب رفتار توصیه شده توسط آیین‌نامه‌ها، برای ساختمان‌های بلند ناسازگار است و باید برای آنها اصلاح شود.^[۱۵]

سلیم بهرامی و قلهکی^[۲۰۲۱]، نیز با مطالعه بر روی سازه‌های بتنی به همراه دیوار برشی فولادی پی بردند که در سیستم‌های چنددرجه آزادی، مستقل از زمان تناوب، اثر مودهای بالتر چندان قابل توجه نیست.^[۱] ژیاوی و کی^[۲۰۲۲]، به ارائه‌ی روش جدیدی برای محاسبه‌ی طیف میانگین پرداخته‌اند، به طوری که از ضرایب وزنی نسبت‌های مشارکت جرمی هر مود استفاده کرده و اثر مودهای بالتر را در نظر گرفته‌اند.^[۱۶] بررسی تعامل بین مودهای بالتر سازه دارای سقف‌های مشبک با سازه‌ی تحتانی توسط نایر^۵ و همکاران^[۲۰۲۱] انجام پذیرفته و نسبت جدیدی از سهم هر مود سازه‌ی تحتانی از پاسخ کلی سازه ارائه شده است.^[۱۷] وانگ^۶ و همکاران^[۲۰۲۱]، با مطالعه بر روی قاب‌های فولادی مهاربندی شده پی بردند در طراحی قاب‌های مهاربندی شده هم‌محور، تأثیر مودهای بالتر را نباید نادیده گرفت. نتایج عددی نشان داده‌اند که مودهای بالتر به مقدار برش پایه نسبت به جابه‌جایی بیشتر مؤثرتر هستند.^[۱۸]



شکل ۱. تصویر تغییر شکل یافته‌ی جداگر پاندولی.

همچنین، زاویه‌ی تغییر شکل جداگر از حالت اولیه و S نیروی عکس العمل سطحی است که به دلیل وجود لنگر در محل اثر نیرو و خروج از مرکزیت θ ایجاد می‌شود (رابطه‌ی ۶).

$$S = \frac{W}{\cos \theta} \cong W \quad (6)$$

که با قرار دادن مقدار اخیر (S) در رابطه‌ی ۵، مقدار F_f مطابق رابطه‌ی ۷ محاسبه می‌شود:

$$F_f = \mu W \operatorname{sgn}(\dot{u}) \quad (7)$$

که در آن، $\operatorname{sgn}(\dot{u})$ تابع علامت است و u مقدار جابه‌جایی افقی محل اثر نیرو است که از رابطه‌ی ۸ به دست می‌آید: [۱۹]

$$u = (R - h) \sin \theta = R_{eff} \sin \theta \quad (8)$$

که در آن، R شعاع انحنا جداگر، h مقدار ارتفاعی است که لغزنده بالا آمده و جابه‌جایی قائم لغزنده از حالت اولیه بوده است، و R_{eff} شعاع انحنا مؤثر جداگر است.

با استفاده از رابطه‌های ۴ تا ۸، رابطه‌ی نیرو - جابه‌جایی جداگر پاندولی تکی از رابطه‌ی ۹ به دست می‌آید:

$$F = \frac{W}{R_{eff} \cos \theta} u + \frac{F_f}{\cos \theta} \quad (9)$$

با توجه به زیاد بودن شعاع انحنا و به تبع آن کوچک بودن زاویه، می‌توان مقدار زاویه‌ی جابه‌جایی را صفر فرض کرد. برای مقادیر $u < \frac{1}{2} R$ ، مقدار θ عدد کوچکی است و خطای ۲٪ در مقدار جابه‌جایی دارد. [۲۰] و در صورتی که جابه‌جایی جداگر کمتر از $\frac{1}{3}$ شعاع انحنا جداگر باشد، خطایی در حدود ۵٪ خواهد داشت. [۲۰] لذا رابطه‌ی نیرو - جابه‌جایی مطابق رابطه‌ی ۱۰ خواهد بود که در شکل ۲ نشان داده شده است.

$$F = \frac{W}{R_{eff}} u + \mu W \operatorname{sgn}(\dot{u}) = F_r + F_f = \text{restoring} + \text{friction} \quad (10)$$

باربری برای F_r و R ‌های بزرگ انجام می‌شود. یعنی در صورتی که $(u < \mu R)$ یا $F_r < F_f$ باشد، انتقال باری انجام نخواهد پذیرفت. سختی مؤثر جداگر پاندولی

۳. مفهوم مودهای بالاتر

معادله‌ی حرکت حاکم بر سازه‌های n درجه آزادی در صورت رفتار غیرخطی مطابق معادله‌ی ۱ است: [۱۰]

$$[m]\{\ddot{u}\} + [C]\{\dot{u}\} + \{f_s\}(\{u\}, \operatorname{sign}\{\dot{u}\}) = -[m]\{i\}\ddot{u}_g(t) \quad (1)$$

که در آن، $[m]$ ، $[C]$ ، $\{f_s\}$: ماتریس‌های جرم، میرایی و سختی؛ $\{u\}$ ، $\{\dot{u}\}$ ، $\{\ddot{u}\}$: بردارهای جابه‌جایی، سرعت و شتاب؛ $\{i\}$: بردار واحد؛ $\ddot{u}_g$: شتاب زمین هستند که در تحلیل تاریخی‌چهی زمانی غیرخطی استاندارد (NLRHA) به صورت عددی حل می‌شود.

آنالیز تاریخی‌چهی زمانی مودال غیرهمبسته (UMRHA)، روشی با ارزش برای محاسبه‌ی آثار مودهای بالاتر است، زیرا امکان بررسی پاسخ‌های حاصل از تحلیل تاریخی‌چهی زمانی را بدون در نظر گرفتن رفتار غیرخطی برای هر مود به صورت جداگانه فراهم می‌کند و معادله‌ی حرکت آن بر مود n ام مطابق رابطه‌ی ۲ محاسبه می‌شود:

$$\ddot{D}_n(t) + 2\xi_n \omega_n \dot{D}_n(t) + \frac{F_{sn}}{L_n} D_n(t) = -\ddot{u}_g(t) \quad (2)$$

که در آن، $D_n(t)$ مقدار تغییر مکان در هر لحظه‌ی زمانی، ξ_n و ω_n درصد میرایی و بسامد طبیعی در مود n ام، L_n ضریب مشارکت مود n ام و F_{sn} از رابطه‌ی ۳ به دست می‌آیند:

$$\Gamma_n = \frac{L_n}{M_n} \quad L_n = \sum_{j=1}^n m_j \phi_{jn} \quad M_n = \sum_{j=1}^n m_j \phi_{jn}^2 \quad (3)$$

در روش‌های تحلیل مودال مرسوم، معمولاً فقط چند مود غالب برای توصیف رفتار دینامیکی ساختمان‌های چنددرجه آزادی مورد نیاز است. تعداد مودهای مورد نیاز در تحلیل دینامیکی به سهم مودهای بالاتر در پاسخ سازه بستگی دارد که به آن اثر مودهای بالاتر گفته می‌شود.

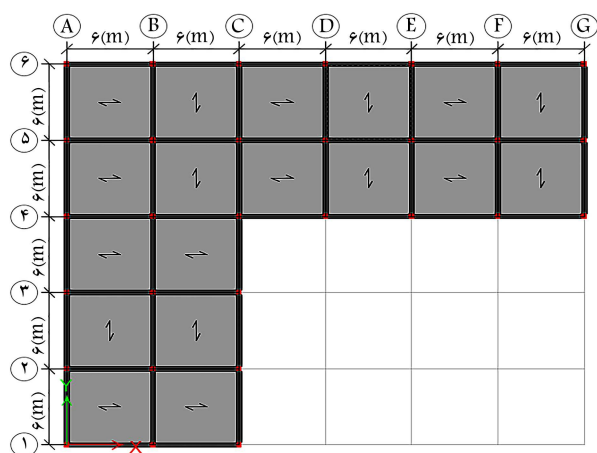
۴. سختی و سختی مؤثر جداگر پاندولی تک

از جمله مهم‌ترین پارامترهایی که برای مدل کردن جداگرهای پایه پاندولی وجود دارد، عبارت از: سختی مؤثر، سختی سکانت و شعاع انحنا جداگر پایه پاندولی هستند. لذا گذرا به نحوه‌ی محاسبه‌ی آنها پرداخته شده است. در شکل ۱، جداگر پاندولی تکی تغییر شکل یافته مشاهده می‌شود که روابط تعادل نیرویی در آن مطابق رابطه‌ی ۴ هستند: [۱۹]

$$\begin{aligned} F - S \sin \theta - F_f \cos \theta &= 0 \\ W - S \cos \theta + F \sin \theta &= 0 \end{aligned} \quad (4)$$

که در آن، F نیروی جانبی زلزله است که توسط لغزنده به جداگر وارد می‌شود و W بار قائم (بارهای ثقلی) و F_f نیروی اصطکاک در سطح تماس است که از رابطه‌ی ۵ به دست می‌آید:

$$F_f = \mu S \operatorname{sgn}(\dot{u}) \quad (5)$$



شکل ۴. پلان سازه‌ی بررسی شده در مدل اول.

مرده‌ی پشت‌بام ۵۶°، بار زنده‌ی طبقات ۲۰۰ و بار زنده‌ی پشت‌بام ۱۵۰ کیلوگرم بر مترمربع و ابعاد تیرها ۴۵cm × ۳۵cm و ستون‌ها ۴۵cm × ۴۵cm در نظر گرفته شده‌اند.

برای هر کدام از ساختمان‌های ۲، ۴ و ۶ طبقه‌ی مذکور، علاوه بر مرکز جرم تجمعی پایه و مرکز سختی و مرکز هندسی پلان طبقه‌ی اول، مرکز شعاع انحناء و مرکز سختی تمامی جداگرهای پایه تعریف شده‌اند. سپس از ۸ چیدمان متفاوت جداگر پایه پاندولی مطابق شرایط زیر استفاده شده است:

چیدمان اول: حالت مرسوم است که در آن شعاع انحناء تک‌تک جداگرهای پاندولی با هم برابر و سختی آنها براساس تیپ‌بندی ستون‌ها (براساس مقدار بار ثقلی وارده) تغییر می‌یابد.

چیدمان دوم: شعاع انحناء یک یا چند جداگر پایه پاندولی تغییر می‌کند، به طوری که محل «مرکز شعاع انحناء» تمامی آنها بر مرکز هندسی سقف اول منطبق شود. بدیهی است که مطابق رابطه‌ی ۱۲، زمانی که شعاع انحناء جداگری تغییر می‌یابد، سختی آن جداگر نیز تغییر می‌کند.

چیدمان سوم: شعاع انحناء یک یا چند جداگر پایه پاندولی تغییر می‌کند، به طوری که مرکز شعاع انحناء تمامی آنها بر مرکز جرم تجمعی پایه منطبق شود.

چیدمان چهارم: شعاع انحناء یک یا چند جداگر پایه پاندولی تغییر می‌کند، به طوری که مرکز شعاع انحناء تمامی آنها بر مرکز سختی طبقه‌ی اول منطبق شود.

چیدمان پنجم: سختی یک یا چند جداگر پایه پاندولی تغییر می‌کند، به طوری که مرکز سختی تمامی آنها بر مرکز هندسی سقف اول منطبق شود.

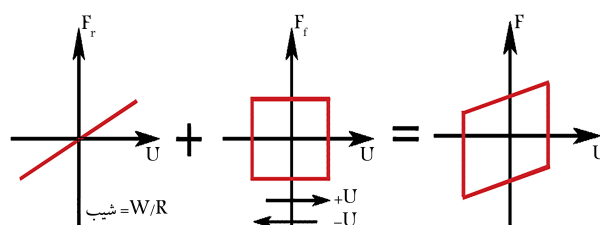
چیدمان ششم: سختی یک یا چند جداگر پایه پاندولی تغییر می‌کند، به طوری که مرکز سختی تمامی آنها بر مرکز جرم تجمعی پایه منطبق شود.

چیدمان هفتم: سختی یک یا چند جداگر پایه پاندولی تغییر می‌کند، به طوری که منطبق شدن مرکز سختی تمامی آنها بر مرکز سختی طبقه‌ی اول منطبق شود.

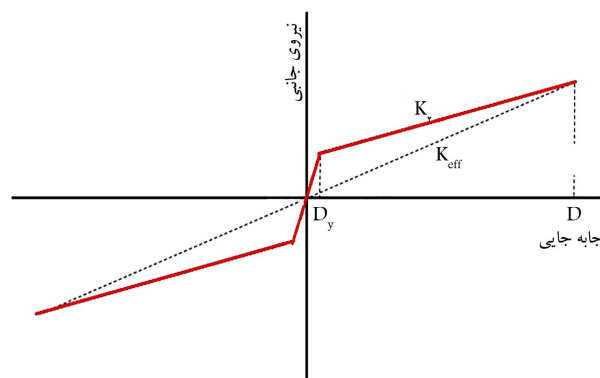
چیدمان هشتم: سختی یک یا چند جداگر پایه پاندولی تغییر می‌کند، به طوری که مرکز سختی تمامی جداگرهای پایه پاندولی بر مرکز شعاع انحناء تمامی آنها منطبق شود.

در چیدمان‌های اول تا هشتم، مرکز شعاع انحناء و مرکز سختی تمامی جداگرهای پایه پاندولی از روابط ۱۴ و ۱۵ محاسبه می‌شوند:

$$X_{RPI} = \frac{\sum_{i=1}^n R_{pi} \bar{X}_i}{\sum_{i=1}^n R_{pi}}, \quad Y_{RPI} = \frac{\sum_{i=1}^n R_{pi} \bar{Y}_i}{\sum_{i=1}^n R_{pi}} \quad (14)$$



شکل ۲. نمودار نیرو - جابه‌جایی جداگر پاندولی تکی.



شکل ۳. سختی مؤثر و سختی سکانت جداگر پاندولی تکی.

تکی مطابق رابطه‌های ۱۱ و ۱۲ خواهد بود: [۸۶]

$$K_{eff} = \frac{W}{R_{eff}} + \frac{F_f}{u} \quad (11)$$

$$K_{eff} = \frac{W}{R_{eff}} + \frac{\mu W}{u} = W \left(\frac{1}{R_{eff}} + \frac{\mu}{u} \right) \quad (12)$$

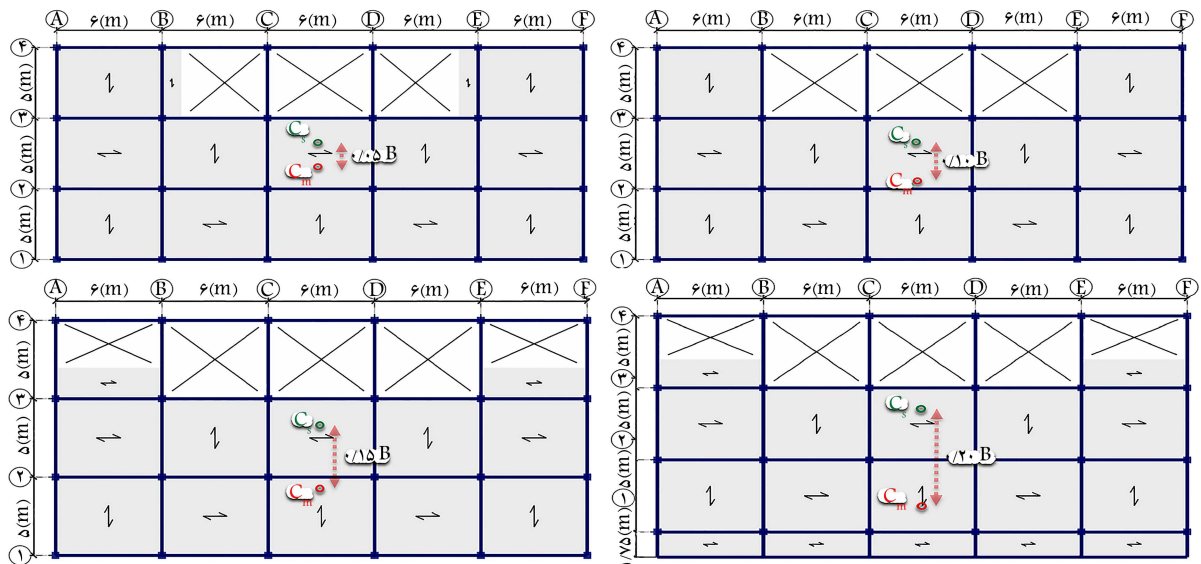
سختی ثانویه و زمان تناوب جداگر مطابق رابطه‌ی ۱۳ خواهد بود: [۱۴]

$$K_2 = \frac{W}{R_{eff}}, \quad T = 2\pi \sqrt{\frac{R}{g}} \quad (13)$$

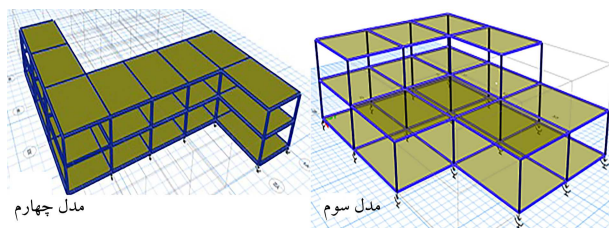
در شکل ۳، نمودار تغییرات سختی مؤثر و سختی ثانویه مشاهده می‌شود، که مدلی برای بیان رفتار غیرخطی (دو خطی) کشسان - خمیری با زوال سختی سیستم‌های جداسازی شده از پایه است.

۵. مدل‌های بررسی شده

مدل‌های بررسی شده به نحوی انتخاب شده‌اند که فرم‌های هندسی و نامنظمی‌ها، محدوده‌ی وسیعی از ساختمان‌های متداول را پوشش دهند. به عنوان مدل‌های پایه از ۴ مدل ساختمانی با پلان‌هایی به شکل‌های L در دو حالت U و S استفاده شده است. ابتدا مطابق شکل ۴، از ساختمانی با پلان L شکل، با تعداد طبقات ۲، ۴ و ۶ طبقه استفاده شده است که فاصله‌ی دهانه‌ها در دو جهت به طور یکسان، ۶ متر و ارتفاع طبقات ۳/۲ متر در نظر گرفته شده است. ابعاد مقطع تیرها و ستون‌ها براساس طراحی سازه مطابق آیین‌نامه‌ی ACI 318-14 به دست آمده و رفتار جداگرها به صورت غیرخطی مدل شده است. همچنین مقاومت بتن 210 Kg/cm^2 در نظر گرفته شده است. سیستم سازه‌ی قاب خمشی بتنی با شکل‌پذیری متوسط بوده است که در یک محل با پارامترهای لرزه‌ی $S_s = 1/25g$ و $S_1 = 0.4g$ و در سایت کلاس C مطابق آیین‌نامه‌ی ASCE 7-16 قرار گرفته و میرایی آن ۵٪ بوده است. در تمامی مدل‌ها، بار مرده‌ی طبقات ۵۱°، بار تیغه‌بندی ۱۰۰°، بار



شکل ۵. پلان سازی بررسی شده در مدل دوم.



شکل ۶. پلان سازی بررسی شده در مدل‌های سوم و چهارم.

بار و سازه مثل مدل‌های قبلی بوده است (شکل ۶). تحلیل خطی، شبیه مدل اول در هر کدام از سازه‌ها، با ۸ چیدمان مختلف جداگر پایه پاندولی، انجام شده است، زمان تناوب مودهای اول و دوم و درصد مشارکت جرمی مودهای اول و دوم و بقیه مودهای ارتعاشی، محاسبه و با روش مرسوم (چیدمان اول) مقایسه شده‌اند.

بدون تغییر در مقدار بارها و مشخصات سازه‌یی، هریک از سازه‌های مذکور تحت ۱۲ شتاب‌نگاشت زمین‌لرزه‌ی دو مؤلفه‌یی حوزه‌ی دور قرار گرفته است (جدول ۱). PGA استفاده شده در شتاب‌نگاشت‌های مذکور بین $0.25g$ و $0.64g$ و نسبت PGA/PGV آنها بین $0.36-0.47$ و با بزرگای گشتاوری بیش از $6/5$ بوده‌اند. در هر کدام از سازه‌ها، تحلیل تاریخیچه‌ی زمانی خطی انجام شده است. سپس مقدار بیشینه‌ی تغییرمکان تراز پایه تحت هر کدام از شتاب‌نگاشت‌ها به دست آمده و متوسط بیشینه‌ی تغییرمکان‌ها برای مجموعه‌ی شتاب‌نگاشت‌ها محاسبه و در نهایت، نحوه‌ی آرایش چیدمان دوم تا هشتم جداگر پایه با چیدمان اول مقایسه شده است.

۶. بررسی پاسخ‌ها

۶.۱. بررسی تغییرات زمان تناوب اصلی سازه

زمان تناوب سازه‌ها، یکی از خصوصیات مهم دینامیکی سازه‌ها محسوب می‌شود. در مطالعه‌ی حاضر، تغییرات زمان تناوب مود اول محاسباتی در مدل‌های مختلف ساختمانی نشان داده شده‌اند. در مدل اول ساختمانی با تعداد طبقات مختلف،

$$X_{KPi} = \frac{\sum_{i=1}^n K_{eff,pi} \bar{X}_i}{\sum_{i=1}^n K_{eff,pi}}, \quad Y_{KPi} = \frac{\sum_{i=1}^n K_{eff,pi} \bar{Y}_i}{\sum_{i=1}^n K_{eff,pi}} \quad (15)$$

که در آنها، R_{pi} شعاع انحناء جداگر پاندولی پایه‌ی i ام؛ $K_{eff,pi}$ سختی مؤثر جداگر پاندولی پایه‌ی i ام؛ $\bar{X}_i, \bar{Y}_i$ فاصله‌ی هر جداگر از محورهای مختصات؛ X_{Rpi}, Y_{Rpi} مختصات مرکز شعاع انحناء تمامی جداگرهای پایه پاندولی و X_{KPi}, Y_{KPi} مختصات مرکز سختی تمامی جداگرهای پایه پاندولی هستند.

مدل دوم از ۴ مدل ساختمانی استفاده شده در پژوهش حاضر، خود در ۴ حالت در نظر گرفته شده است (شکل ۵). فاصله‌ی دهانه‌ها به طور یکسان در جهت طولی ۶ متر، جهت عرضی ۵ متر و ارتفاع طبقه، ۳/۵ متر بوده است. مدل‌ها طوری انتخاب شده‌اند که خروج از مرکزیت‌ها برابر با ۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ درصد بُعد عرضی سازه در نظر گرفته شوند. ولی ابعاد و مشخصات سازه در تمامی مدل‌ها با یک خروج از مرکزیت یکسان هستند. برای اعمال خروج از مرکزیت بین مرکز جرم و سختی در سقف طبقه، بازو ایجاد شده و توزیع جرم تغییر کرده است. به عبارت دیگر، در هر کدام از مدل‌ها، ممان اینرسی جرمی با تغییر خروج از مرکزیت عوض شده است.

همانند مدل قبلی، ابعاد مقطع تیرها $40cm \times 40cm$ و ستون‌ها $45cm \times 45cm$ براساس طراحی سازه مطابق با آیین‌نامه‌ی ACI 318-14 به دست آمده و جداگرها با رفتار غیرخطی مدل شده و مقاومت بتن $210kg/cm^2$ در نظر گرفته شده است. سیستم سازه‌یی قاب خمشی بتنی با شکل‌پذیری متوسط بوده است و که در یک محل فرضی با پارامترهای لرزه‌یی $S_s = 1/25g$ و $S_1 = 0.4g$ در سایت کلاس C مطابق آیین‌نامه‌ی ASCE 7-16 قرار داشته و با میرایی ۵٪ در نظر گرفته شده است. در مدل‌های سوم و چهارم ساختمانی، طول دهانه‌ها به طور یکسان در جهت طولی $10/67$ متر، در جهت عرضی $7/62$ متر و ارتفاع طبقات ۴ متر، ابعاد تیرها و ستون‌ها به ترتیب برابر با $90cm \times 60cm$ و $60cm \times 60cm$ و بقیه‌ی مشخصات شبیه دو مدل قبلی بوده است. در مدل سوم، پلان سازی L شکل در ۲ طبقه و جرم طبقه‌ی دوم حدوداً ۵٪ جرم طبقه‌ی اول بوده و در مدل چهارم، از ساختمان دو طبقه با پلان S شکل استفاده شده است که مشخصات

جدول ۱. شتاب نگاشت‌های استفاده شده.

رتبه	رکوردهای زلزله	سال	مرکز زلزله	شدت گشتاوری	عمق (کیلومتر)	کمینه فرکانس (هرتز)	ضریب تصحیح	شتاب دامنه (g)	بیشینه دامنه سرعت (m/s)	نسبت بیشینه دامنه سرعت به بیشینه دامنه شتاب
۱	Northridge California, USA	۱۹۹۴	Beerly Hills	۶/۷	۱۷/۵	۰/۲۵	۰/۶۵۱	۰/۳۴	۰/۴۱	۰/۸۲۹
۲	Hector Mine California, USA	۱۹۹۹	Hector	۷/۱	۲۰	۰/۰۴	۱/۰۹۲	۰/۳۷	۰/۴۶	۰/۸۰۴
۳	Im perial Valley California, USA	۱۹۷۹	Delta	۶/۵	۱۱/۶	۰/۰۶	۱/۳۱۱	۰/۳۴۸	۰/۳۳۴	۱/۰۴۲
۴	Kobe Japon	۱۹۹۵	Nishi	۶/۹	۱۷/۶	۰/۱۳	۱/۰۳	۰/۵۳	۰/۳۹	۱/۳۵۹
۵	Kocaeli Izmit, Turkey	۱۹۹۹	Duzce	۷/۶	۱۵/۰	۰/۲۴	۰/۶۹	۰/۲۵	۰/۴۱	۰/۶۱۰
۶	Landers California, USA	۱۹۹۲	Yerme	۷/۳	۱/۰۹	۰/۰۷	۰/۹۹	۰/۲۴	۰/۵۱	۰/۴۷۱
۷	Elcentro, USA	۱۹۴۰	California	۷/۱	۱۶	۰/۲۵	۱/۰۹	۰/۶۴	۰/۵۰	۱/۲۸
۸	Cape Mexico California, USA	۱۹۹۲	Rio.Dell	۷/۲	۱۰/۵	۰/۰۷	۰/۸۲	۰/۴۵	۰/۳۶	۱/۲۵
۹	Supersition Hills	۱۹۸۷	El.Centr	۶/۶	۱۰/۹	۰/۱۳	۰/۸۷	۰/۳۱	۰/۴۰	۰/۷۷۵
۱۰	Duzce, Turkey	۱۹۹۹	Bolu	۷/۲	۱۳/۷	۰/۰۶	۰/۶۲۹	۰/۵۲	۰/۳۹	۱/۳۳۳
۱۱	Manjil, IRAN	۱۹۹۰	Abhar	۷/۴	۱۵/۰	۰/۱۳	۰/۷۹	۰/۴	۰/۴۳	۰/۹۳
۱۲	SanFernado California, USA	۱۹۷۰	La.Haliwood	۶/۶	۸/۴	۰/۲۵	۲/۱	۰/۴۹	۰/۴۸۷	۱/۰۰۷

مودهای ارتعاشی تغییر یافته و کم و زیاد شده است. در تمامی ۴ مدل ساختمانی در حالت انطباق مرکز سختی تمامی جداگر پایه با مرکز جرم تجمعی سازه، زمان تناوب اصلی سازه و زمان تناوب مود دوم محاسباتی، روند کاهش داشته است.

بیشترین کاهش تغییراتی در چیدمان ششم جداگر پایه، یعنی انطباق مرکز سختی کل جداگرهای پایه با مرکز جرم تجمعی پایه رخ داده است. مقدار کاهش زمان تناوب مود اول ارتعاشی در مدل ساختمانی اول در صورت افزایش طبقات از ۲ تا ۶ طبقه به ترتیب ۱۲ تا ۱۹ درصد بوده و در مدل ساختمانی دوم با افزایش خروج از مرکزیت بین مرکز جرم و سختی سازه از ۵ تا ۲۰ درصد بعد عرضی، از ۱ تا ۵ درصد کاهش مشاهده می‌شود. برای مدل‌های ساختمانی سوم و چهارم، به ترتیب کاهش حدود ۱۰ و ۷ درصد به دست آمده است.

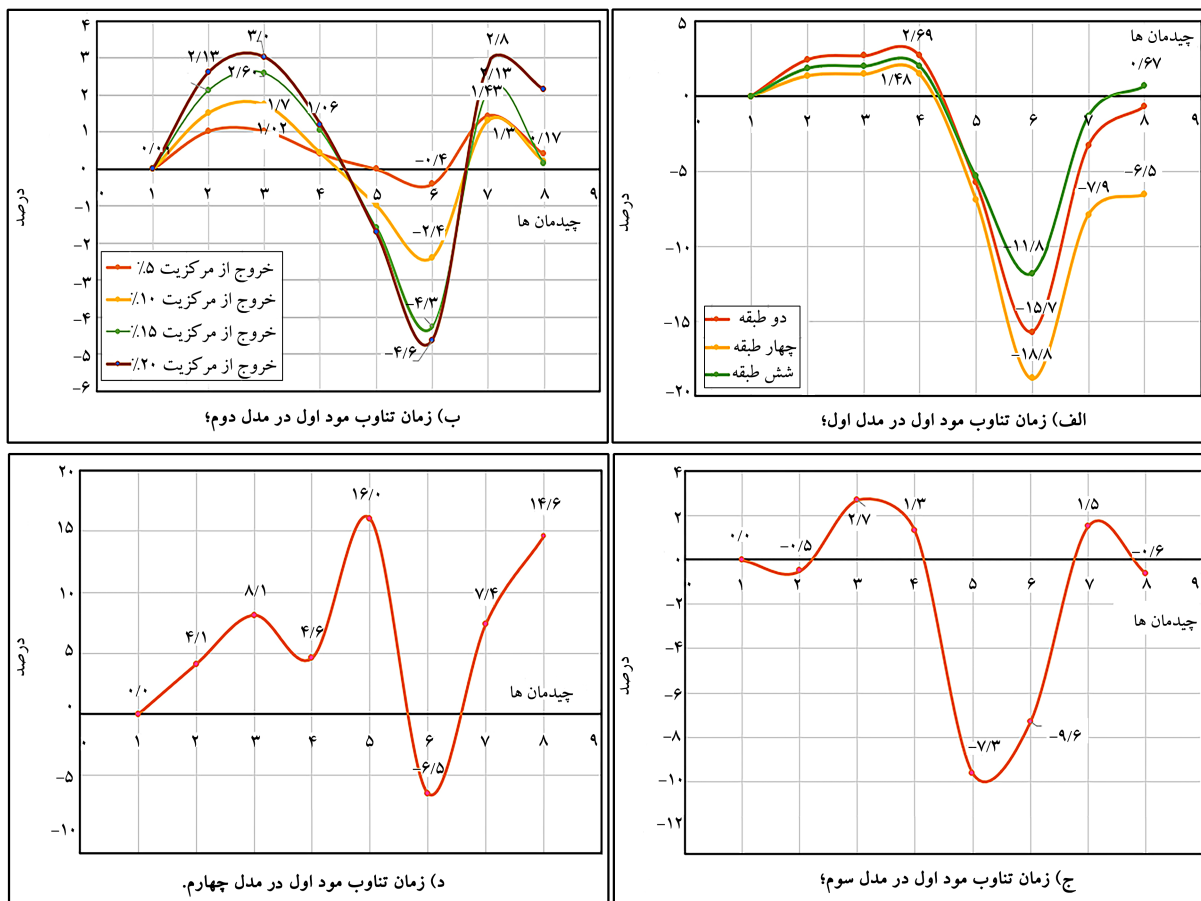
همچنین در مدل ساختمانی اول با افزایش تعداد طبقات، زمان تناوب مود دوم محاسباتی، کاهش در حدود ۱ تا ۵ درصد را نشان می‌دهد و در مدل دوم با افزایش خروج از مرکزیت، کاهش در حدود ۲ تا ۸۵ درصد مشاهده می‌شود. برای خروج از مرکزیت ۵٪، تغییرات زمان تناوب مودهای اول و دوم ناچیز به نظر می‌رسد.

درصد تغییرات زمان تناوب سازه‌ها در چیدمان‌های مختلف جداگر پایه پاندولی نسبت به چیدمان اول (حالت مرسوم)، در مدل دوم در ۴ ساختمان با خروج از مرکزیت ۵ تا ۲۰ درصد مرکز جرم و سختی، در مدل سوم در ساختمانی با نامنظمی جرمی و در مدل ساختمانی چهارم در ساختمانی با نامنظمی هندسی مقایسه شده‌اند.

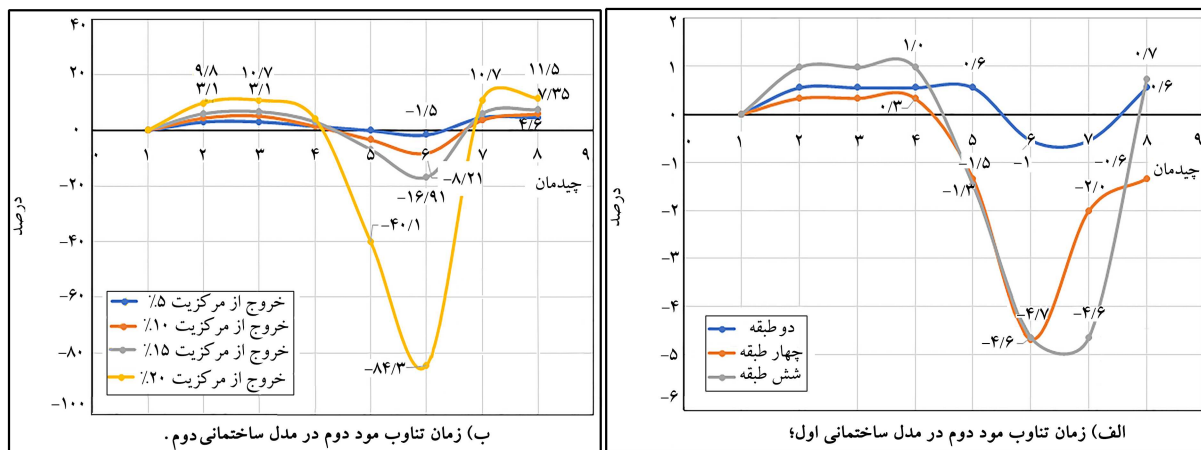
با توجه به این‌که با تغییر شعاع انحنا، سختی جداگر پایه پاندولی نیز تغییر می‌کند، لذا تغییرات اخیر می‌تواند در ماتریس سختی سازه اثر کند و به تبع آن زمان تناوب سازه تغییر خواهد کرد.

تغییرات زمان تناوب مود اول ارتعاشی در کلیه‌ی مدل‌های ساختمانی در چیدمان‌های مختلف جداگر پایه پاندولی نسبت به چیدمان اول جداگر پایه در شکل ۷ و تغییرات زمان تناوب مود دوم ارتعاشی در ساختمان‌های اول و دوم در شکل ۸ مشاهده می‌شود.

مطابق شکل‌های ۷ و ۸ مشاهده می‌شود که در سازه‌های دارای جداگر پایه پاندولی تکی در چیدمان‌های در نظر گرفته شده، شامل انطباق مرکز سختی طبقه‌ی اول یا مرکز جرم تجمعی پایه یا مرکز هندسی (در سازه‌ی فوقانی) با مرکز شعاع انحنا تمامی جداگرهای پایه یا مرکز سختی تمامی جداگرهای پایه، مقادیر زمان تناوب



شکل ۷. تغییرات زمان تناوب اصلی مدل‌های مختلف سازه‌یی با آرایش‌های مختلف جداگرهای پایه پاندولی.



شکل ۸. تغییرات زمان تناوب مود دوم در مدل‌های اول و دوم.

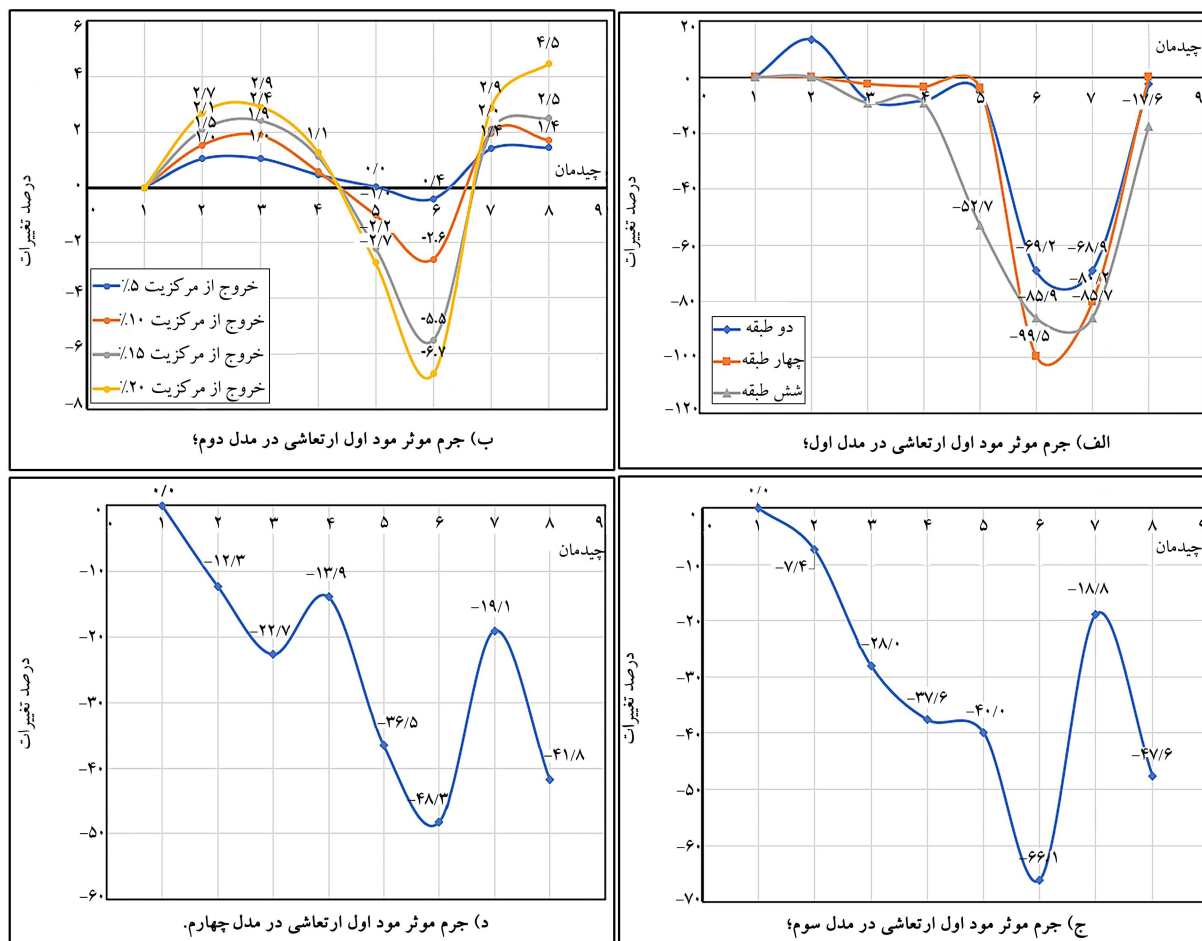
ساختمانی در چیدمان‌های دوم تا هشتم، جداگر پایه پاندولی با چیدمان اول در شکل ۹ مشاهده می‌شود.

همچنان که مشاهده می‌شود، مقدار مشارکت جرم مؤثر مود اول در چیدمان ششم جداگر پایه در ساختمان‌های ۲، ۴ و ۶ طبقه (مدل ساختمانی اول) نسبت به چیدمان اول جداگرهای پایه، ۶۹، ۸۶ و ۹۹ درصد کاهش داشته است. در مدل ساختمانی دوم، برای خروج از مرکزیت ۵٪، کاهش مشارکت جرمی مود اول ناچیز بوده و برای خروج از مرکزیت‌های بیشتر از ۵٪، ۳ تا ۷ درصد کاهش مشاهده

۲.۶. مقایسه‌ی درصد مشارکت جرمی مودها

درصد مشارکت جرمی مودها به تعبیری اندازه‌یی از انرژی موجود در هر حالت تشدید را ارائه می‌دهد، زیرا نشان‌دهنده‌ی مقدار جرم سیستم شرکت‌کننده در یک مود خاص است. مودهایی که جرم مؤثر بیشتری دارند، معمولاً نقش مهم‌تری در پاسخ سیستم دارند.

مقایسه‌ی تغییرات درصد مشارکت جرمی مود اول ارتعاشی در مدل‌های مختلف



شکل ۹. تغییرات جرم مؤثر مود اول با آرایش مختلف جداگرها در تمامی مدل‌های ساختمانی.

درصد، جرم مؤثر مود سوم ارتعاشی افزایش یافته است. همچنین مشاهده می‌شود که مقدار درصد افزایش مشارکت مود سوم تقریباً نزدیک به مود دوم است.

در مدل ساختمانی دوم، تغییرات درصد مشارکت جرمی در مود سوم برای خروج از مرکزیت‌های ۱۰، ۱۵ و ۲۰ درصد فقط در چیدمان ششم جداگرهای پایه، زمانی که مرکز سختی کل جداگر پایه منطبق بر مرکز جرم تجمعی می‌شود، از ۱۱ تا ۳۱ درصد افزایش می‌یابد و برای خروج از مرکزیت ۵٪، این تغییرات ناچیز است. مود سوم ارتعاشی در مدل سوم ساختمانی نیز در چیدمان‌های دوم و ششم، روند افزایشی داشته است که بیشترین درصد افزایش در چیدمان ششم برابر با ۴۰٪ بوده است.

در مدل چهارم ساختمانی، مود سوم ارتعاشی در تمامی چیدمان‌ها نسبت به چیدمان اول جداگر پایه پاندولی، روند افزایشی داشته است؛ که بیشترین آن در چیدمان ششم برابر با ۳۷٪ افزایش بوده است.

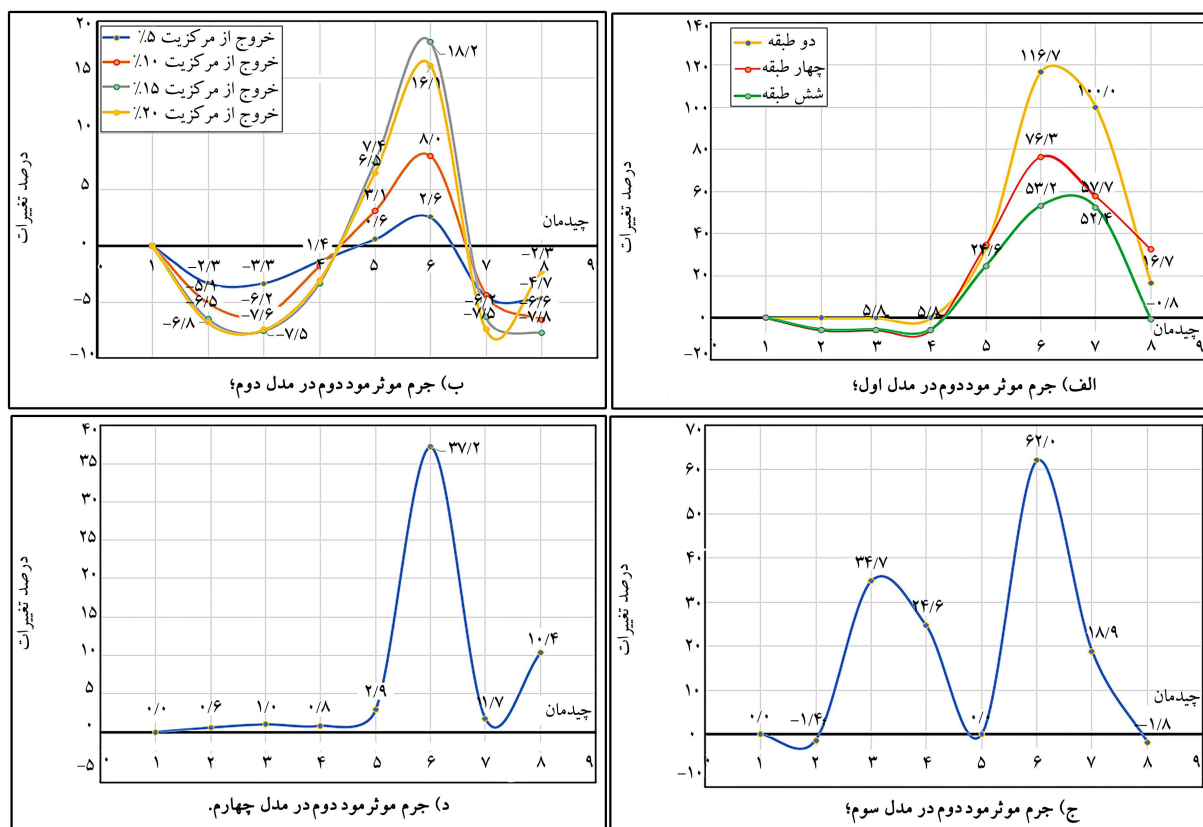
۳.۶. مقایسه‌ی تغییرات درصد مشارکت مود اول و تغییرمکان تراز پایه

یکی از مهم‌ترین عیوب جداگرهای پایه، تغییرمکان زیاد آنها در تراز پایه است؛ لذا استفاده از راهکاری که بتواند مقدار تغییرمکان تراز پایه را کاهش دهد، می‌تواند فوق‌العاده مفید واقع شود.

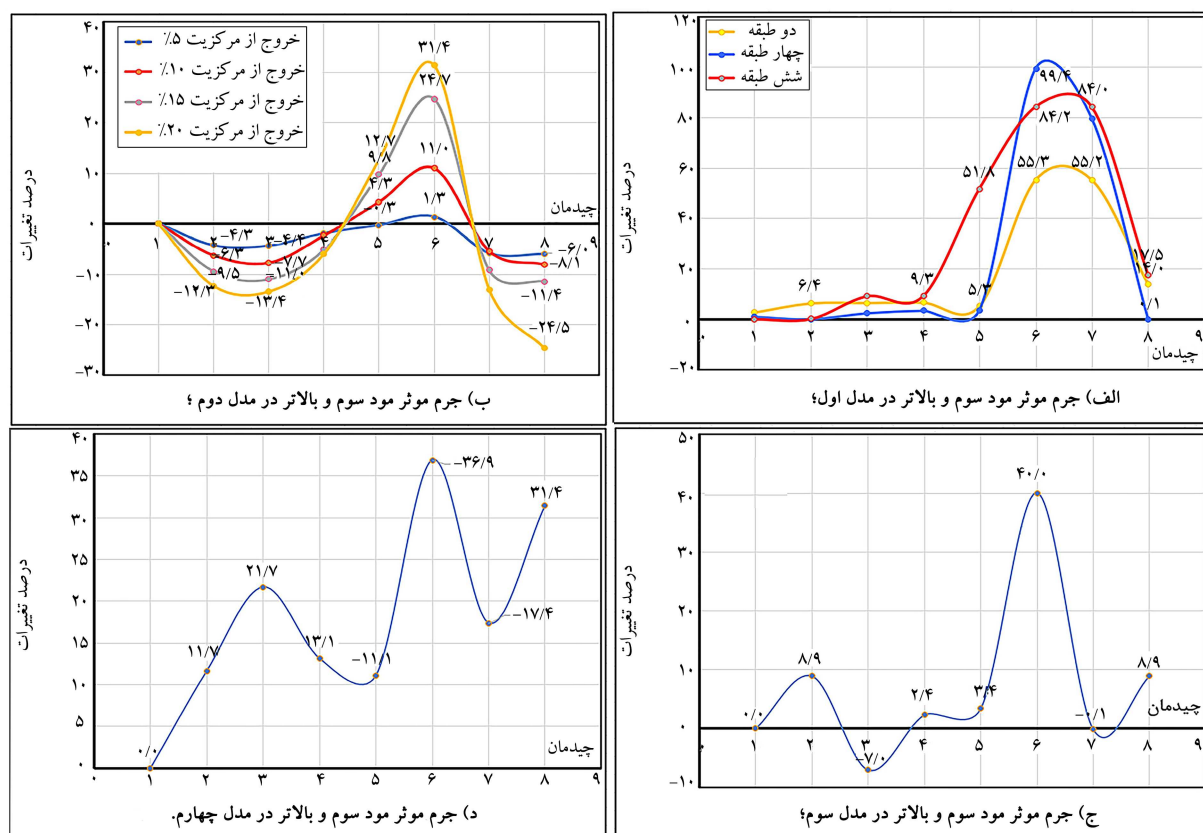
می‌شود. مطابق مدل اول ساختمانی، کاهش درصد مشارکت جرمی مود اول در صورت انطباق مرکز سختی کل جداگرهای پایه بر مرکز جرم تجمعی پایه و یا انطباق مرکز سختی کل جداگرهای پایه با مرکز سختی طبقه‌ی اول سازه حدوداً یکسان است. در مدل‌های ساختمانی سوم و چهارم، در تمامی چیدمان‌ها، کاهش مشارکت جرمی مود اول مشاهده می‌شود، که بیشترین کاهش در چیدمان ششم رخ داده است که برای مدل ساختمانی سوم، ۶۶٪ و در مدل ساختمانی چهارم، ۴۸٪ کاهش به دست آمده است.

تغییرات جرم مؤثر مود دوم ارتعاشی با آرایش مختلف جداگرهای پایه پاندولی در شکل ۱۰ مشاهده می‌شود. در حالی که بیشترین کاهش درصد مشارکت جرمی در مود اول ارتعاشی، که در چیدمان ششم جداگر پایه پاندولی رخ داده بود، بیشترین مقدار درصد افزایش جرم مشارکت مود دوم ارتعاشی نیز در همان چیدمان دیده می‌شود؛ که این مقدار برای مدل ساختمانی اول از ۵۳ تا ۱۱۶ درصد، برای مدل دوم ساختمانی از ۳ تا ۱۸ درصد، و برای مدل‌های سوم و چهارم ساختمانی، به ترتیب ۶۲ و ۳۷ درصد افزایش مشاهده می‌شود.

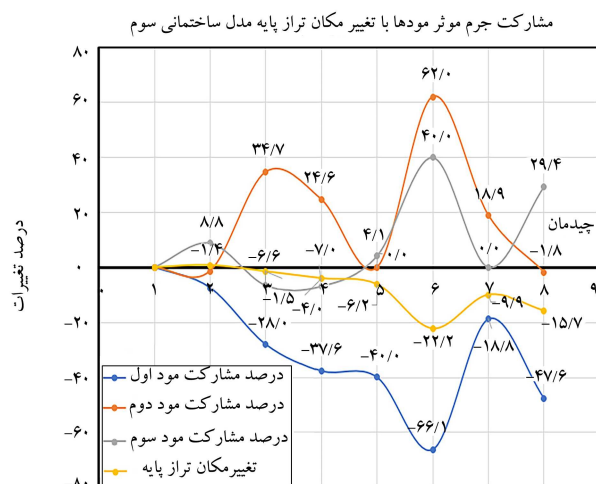
همچنین در شکل ۱۱، تغییرات جرم مؤثر مود سوم و بالاتر با آرایش مختلف جداگرهای پایه نشان داده شده است. درصد مشارکت جرمی مود ارتعاشی سوم و بالاتر در مدل ساختمانی اول، در چیدمان‌های ششم و هفتم برخلاف مود اول (و مانند مود دوم ارتعاشی)، روند افزایشی داشته است که این روند در چیدمان ششم بیشتر از چیدمان هفتم دیده می‌شود. در ساختمان‌های ۲ تا ۶ طبقه از ۵۵ تا ۹۹



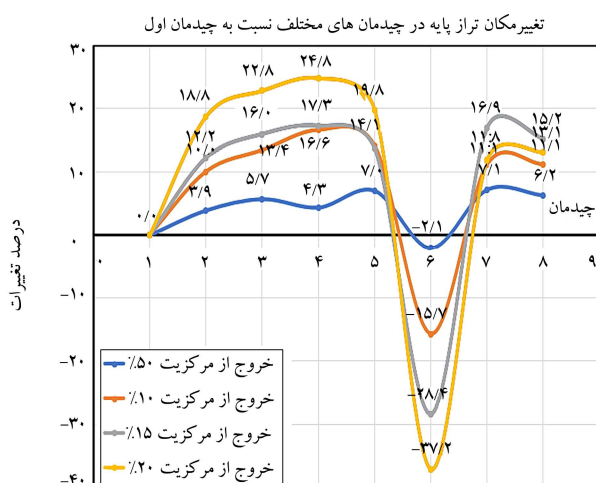
شکل ۱۰. تغییرات جرم موثر مود دوم با آرایش مختلف جداگرها در مدل‌ها.



شکل ۱۱. تغییرات جرم موثر مود سوم و بالاتر با آرایش مختلف جداگرها در مدل دوم.



شکل ۱۳. تغییرات درصد مشارکت جرمی مودها و تغییر مکان تراز پایه با آرایش مختلف جداگرها در مدل ساختمانی سوم.



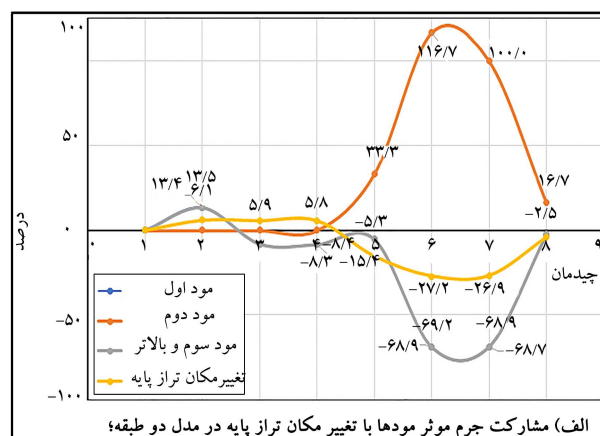
شکل ۱۴. تغییرات درصد مشارکت جرمی مودها و تغییر مکان تراز پایه با آرایش‌های مختلف جداگرها در مدل ساختمانی دوم.

مودها، فقط در چیدمان ششم جداگرهای پایه پاندولی، مقدار تغییر مکان تراز پایه حدود ۲۳٪ کاهش یافته است. در مدل اخیر با کاهش جرم مؤثر مود اول، مود دوم و بالاتر روند افزایشی داشته‌اند.

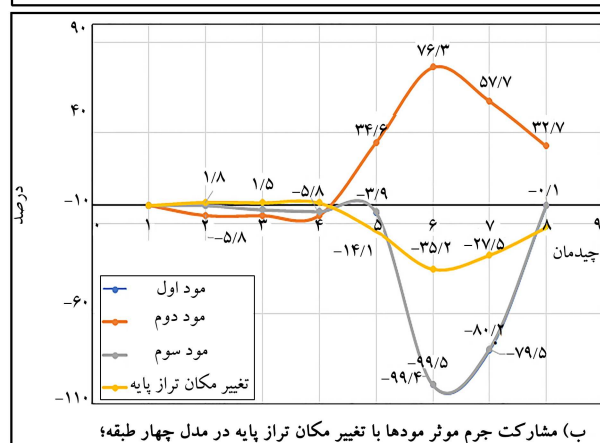
تغییرات تغییر مکان تراز پایه در مدل ساختمانی دوم برای خروج از مرکزیت ۵٪ به مقدار ناچیز (۲٪) کاهش یافته است و در خروج از مرکزیت‌های بالاتر، از ۱۶ تا ۳۷ درصد کاهش مشاهده می‌شود (شکل ۱۴).

۷. نتیجه‌گیری

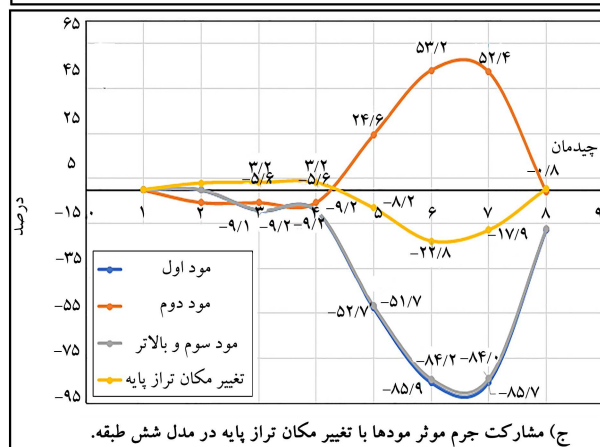
به منظور بررسی تأثیر مودهای بالاتر ارتعاشی در ساختمان‌های دارای جداگر پایه پاندولی با پلان نامنظم، یک مطالعه‌ی پارامتریک روی طیف وسیعی از عوامل نامنظمی در ساختمان‌های متداول انجام شده است؛ که در این رابطه ۴ تیپ پلان مختلف، که مجموعاً ۹ سازه را شکل داده‌اند، تحت ۱۲ زمین‌لرزه‌ی دو مؤلفه‌ی در حوزه‌ی دور انجام پذیرفته است. علاوه بر این، در مورد هر کدام از ۹ سازه، ۸ چیدمان



الف) مشارکت جرم مؤثر مودها با تغییر مکان تراز پایه در مدل دو طبقه؛



ب) مشارکت جرم مؤثر مودها با تغییر مکان تراز پایه در مدل چهار طبقه؛



ج) مشارکت جرم مؤثر مودها با تغییر مکان تراز پایه در مدل شش طبقه.

شکل ۱۵. تغییرات درصد مشارکت جرمی مودها و تغییر مکان تراز پایه با آرایش‌های مختلف جداگرها در مدل ساختمانی اول.

در شکل‌های ۱۲ و ۱۳، تغییرات هم‌زمان درصد مشارکت مودها و تغییر مکان تراز پایه در مدل‌های ساختمانی اول و سوم مشاهده می‌شود؛ که مطابق آنها، در مدل ساختمانی اول در چیدمان ششم و هفتم جداگر پایه، هم‌زمان با کاهش درصد مشارکت جرمی مودهای اول و سوم، درصد مشارکت جرمی مود دوم افزایش قابل ملاحظه‌ی داشته است که باعث کاهش تغییر مکان تراز پایه در چیدمان‌های اخیر جداگر پایه شده و مقدار آن در چیدمان ششم بیش از چیدمان هفتم بوده است و کاهش بین ۲۳ تا ۳۵ درصد در تغییر مکان تراز پایه مشاهده می‌شود. در مدل ساختمانی سوم، همانند مدل ساختمانی اول با تغییرات درصد مشارکت

- در مدل دوم ساختمانی با کاهش ۲ تا ۷ درصدی مشارکت مود اول ارتعاشی، به میزان ۸ تا ۱۱ درصد به مشارکت مود دوم ارتعاشی و ۱۱ تا ۳۱ درصد به مشارکت مود سوم ارتعاشی و بالاتر اضافه شده است. در مدل‌های سوم و چهارم از مشارکت مود اول به میزان ۶۶ و ۴۸ درصد کاسته شده است، در عوض ۶۲ و ۳۷ درصد به مشارکت مود دوم، ۴۰ و ۳۷ درصد به مشارکت مود سوم اضافه شده است. لذا مود دوم و بالاتر، تعیین‌کننده‌ی پاسخ‌های سیستم سازه‌یی در چیدمان ششم بوده‌اند.
- برای خروج از مرکزیت ۵٪، تغییرات ذکرشده ناچیز بوده است.
- در حالت انطباق مرکز سختی تمامی جداگرهای پایه بر مرکز جرم تجمعی (چیدمان ششم)، تغییرمکان تراز پایه، کمترین مقدار خود را داشته است. در مدل اول سازه‌یی، ۲۳ تا ۳۵ درصد، در مدل دوم ۱۶ تا ۳۷ درصد و در مدل سوم، ۲۲٪ نسبت به چیدمان متعارف جداگر پایه پاندولی، کاهش مشاهده شده است.
- در نهایت، به عنوان جمع‌بندی کلی در حالت انطباق مرکز سختی تمامی جداگرهای پاندولی پایه با مرکز جرم تجمعی پایه (چیدمان ۶)، مود دوم و بالاتر، تعیین‌کننده‌ی پاسخ‌های ساختمان‌های با پلان نامتقارن بوده و سازه بهینه شده است.

- جداگر پایه پاندولی استفاده شده است. با انطباق مرکز سختی تمامی جداگرهای پایه یا مرکز شعاع انحناء تمامی جداگرهای پایه با مرکز هندسی سقف اول یا مرکز جرم تجمعی در تراز پایه یا سختی طبقه‌ی اول و مقایسه‌ی پاسخ‌ها با حالت متعارف چیدمان جداگر پایه، این نتایج به دست آمده است:
- برای چیدمان‌های مختلف جداگر پایه پاندولی با تغییر زمان تناوب مودها، مقدار درصد مشارکت جرمی مودها و تغییرمکان تراز پایه نیز تغییر کرده است.
- در حالت انطباق مرکز سختی تمامی جداگرهای پاندولی پایه با مرکز جرم تجمعی پایه (چیدمان ۶) از زمان تناوب مود اول ارتعاشی کاسته شده است. این مقدار در مدل ساختمانی اول با افزایش تعداد طبقات، ۱۲ تا ۱۹ درصد، در مدل ساختمانی دوم با افزایش خروج از مرکزیت ۱ تا ۵ درصد، در مدل سوم ۱۰٪ و در مدل چهارم ۷٪ مشاهده شده است.
- در مدل اول ساختمانی، با افزایش تعداد طبقات از ۲ تا ۶ طبقه در چیدمان ششم جداگر پایه پاندولی، از مشارکت جرم مود اول ۶۹ تا ۹۹ درصد، همچنین از مشارکت مود سوم به میزان ۵۵ تا ۹۹ درصد کاسته شده است، در عوض به مشارکت مود دوم به مقدار ۵۳ تا ۱۱۷ درصد اضافه شده است. لذا در مدل حاضر، مود دوم ارتعاشی، تعیین‌کننده‌ی پاسخ‌های سیستم سازه‌یی بوده است.

پانویس‌ها

1. Tsai & Chang
2. Maniatakis
3. Fatemi
4. Jia-wei & Ke
5. Nair
6. Wang

منابع (References)

1. Salimbahrami, S.R. and Gholhaki, M. "Effects of higher modes and degrees of freedom on energy requirement in reinforced concrete structures with steel shear wall", *Amirkabir Journal of Civil Engineering*, **53**(10), pp. 4143-4160 (2021).
2. Salimbahrami, S.R. and Gholhaki, M. "Analytical study to evaluate the effect of higher modes of reinforced concrete moment-resisting frames with thin steel shear wall under simple pulse", *Advances in Structural Engineering*, **21**(15), pp. 2311-2325 (2018).
3. Housner, G.W. "Limit design of structures to resist earthquakes", In *Proc. of 1st WCEE* (1956).
4. Uang, C.-M. and Bertero, V.V. "Use of energy as a design criterion in earthquake-resistant design", *88, Earthquake Engineering Research Center*, University of California Berkeley (1988).
5. Ghodrati, A.G., Abdollahzade, D.G. and Khan, Z.M. "Earthquake duration and damping effects on input energy", *Interbational Journal of Civil Engineering*, **5**(1), pp. 14-29 (2007).
6. Standard, B., "Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance", Part 1, pp. 1998-2001 (2005).
7. Tsai, M.-H. and Chang, K.-C. "Higher-mode effect on the seismic responses of buildings with viscoelastic dampers", *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, **1**(1), pp. 119-129 (2002).
8. Daneshjoo, F. and Gerami, M. "Higher mode effects on seismic behavior of MDOF steel moment resisting frames", *Journal of Seismology and Earthquake Engineering*, **5**(3), pp. 41-54 (2003).
9. Tsai, C., Chen, B.-J., Chiang, T.-Ch. and et al. "Higher mode effect on lateral force distributions for base-isolated structures", In *13th World Conference on Earthquake Engineering*, Vancouver, BC, Canada (2004).
10. Maniatakis, C.A., Psycharis, I.N. and Spyarakos, C.C. "Effect of higher modes on the seismic response and design of moment-resisting RC frame structures", *Engineering Structures*, **56**, pp. 417-430 (2013).
11. Khoshnoudian, F. and Nozadi, O. "Effects of higher modes on vertical distribution of isolated structures under near field earthquakes", *International Journal of Civil Engineering*, **11**(2), pp. 115-124 (2013).
12. Gerami, M., Siahpolo, N. and Vahdani, R. "Effects of higher modes and MDOF on strength reduction factor of elastoplastic structures under far and near-fault ground motions", *Ain Shams Engineering Journal*, **8**(2), pp. 127-143 (2017).

13. Ganjavi, B., Hao, H. and Hajirasouliha, I. "Influence of higher modes on strength and ductility demands of soil-structure systems", *Journal of Earthquake and Tsunami*, **10**(4), pp.1793-4311, 1650006.ISSN (2016). <https://doi.org/10.1142/S1793431116500068>.
14. Fatemi, H., Paultre, P. and Lamarche, C.-P. "Experimental evaluation of inelastic higher-mode effects on the seismic behavior of RC structural walls", *Journal of Structural Engineering*, **146**(4), p. 04020016 (2020).
15. Rafiei, E., Danesh, F.A., Matou, F. and et al. "The effects of higher modes on the response modification factor of tall RC buildings", *International Journal of Engineering and Technology*, **11**(1), p. 45 (2019).
16. Jia-wei, G. and Ke, D. "A model conditional mean target spectrum method to consider higher mode effect", **39**(3), pp. 23-32 (2022). DOI: 10.6052/j.issn.1000-4750.2021.01.0029.
17. Nair, D. and et al., "Higher mode effects of multistorey substructures on the seismic response of double-layered steel gridshell domes", *Engineering Structures*, **243**, 112677 (2021). <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2021.112677>.
18. Wang, Y., Zhou, Zh., Zhang, L. and and et al. "Quantification of higher mode effects of steel frame and control method using dual self-centering variable friction damper brace", *Engineering Structures*, **240**, p. 112368 (2021).
19. Jangid, R. and Datta, T. "Nonlinear response of torsionally coupled base isolated structure", *Journal of Structural Engineering*. **120**(1), pp. 1-22 (1994).
20. Adibrameza, M., Moghadam, A. and Ziyaeifar, M. "Assessment of a technique for the torsional response reduction of seismic isolated asymmetric structures", *Journal of Applied Sciences*, **9**(15), pp. 2653-2670 (2009).