

چکیده

سیستم‌های نوین باربر جانبی مرکز‌گرا، با متمرکز کردن خرابی‌ها در اعضای فیوز، باعث کاهش هزینه‌های تعمیر شده و امکان بهره‌برداری بدون وقفه را فراهم می‌آورند. دیوار برشی بتنی مرکز‌گرای گهواره‌ای جزو این سیستم‌ها محسوب می‌شود. در تحقیق حاضر، رفتار دیوارهای پایه-گهواره‌ای مرکز‌گرا تحت ۲۵ شتاب‌نگاشت نزدیک گسل پالس مانند بررسی شد. اثر شتاب‌نگاشت‌های مزبور بر روی سازه‌ها در دو حالت با و بدون مؤلفه دورانی زلزله مورد بررسی قرار گرفت. به منظور مقایسه و در نظر گرفتن مؤلفه‌های دورانی، شش ترکیب بارگذاری لرزه‌ای در نظر گرفته شده است. برای تحلیل تاریخچه زمانی غیرخطی، سازه‌های دارای ۴، ۸، ۱۲، ۱۶ و ۲۰ طبقه انتخاب شدند. مدل‌سازی‌ها در نرم‌افزار OpenSees به صورت دو بعدی انجام شدند. نتایج نشان داد لحاظ مؤلفه دورانی زلزله می‌تواند پاسخ‌های سازه را افزایش دهد. به طوری که حداکثر شتاب، جابه‌جایی نسبی، خمش، برش طبقات، جابه‌جایی نسبی پسماند بام و نسبت تنش حداکثر کابل به ترتیب برابر با ۲۴/۶، ۹/۳، ۱۰/۴، ۹/۶، ۶۲۳ و ۱۱ درصد با لحاظ مؤلفه دورانی زلزله به صورت حداکثر، افزایش یافته است. در سیستم‌های دیوار پایه-گهواره‌ای مورد بررسی، حداکثر جابه‌جایی پسماند برابر با ۰/۰۱ درصد بود. در پایان می‌توان گفت در سیستم‌های پایه-گهواره‌ای مرکز‌گرا، زاویه شتاب‌نگاشت با مؤلفه گهواره‌ای حداکثر نسبت به زاویه شتاب‌نگاشت با مؤلفه افقی حداکثر، ممکن است پاسخ‌های بیشتری را ایجاد کند.

واژگان کلیدی: سیستم مرکز‌گرا، دیوار گهواره‌ای، زلزله حوزه نزدیک، مؤلفه دورانی زلزله، تحلیل دینامیکی غیرخطی.

اثر مؤلفه دورانی شتاب‌نگاشت‌های لرزه‌ای حوزه نزدیک گسل بر رفتار دیوارهای پایه-گهواره‌ای مرکز‌گرا

اسماعیل محمدی ده‌چشمه

دانشجوی دکتری مهندسی زلزله، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران

وحید بروجرديان (نویسنده مسئول)

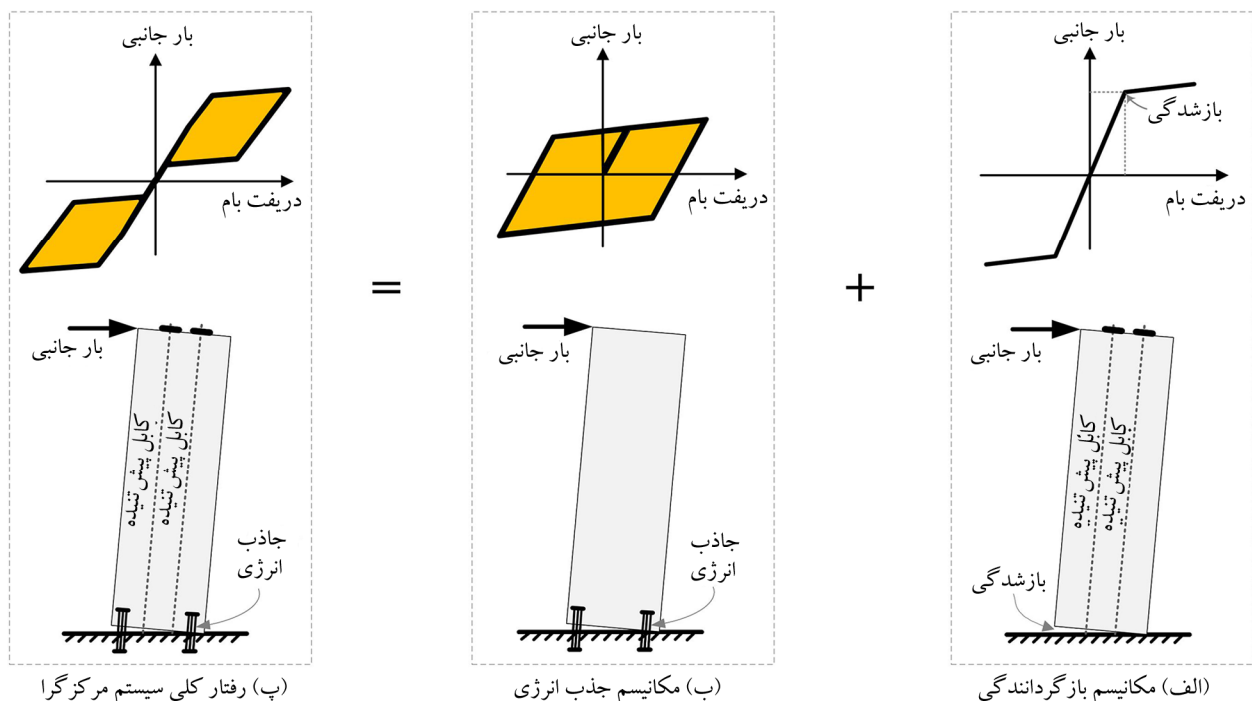
استادیار، مهندسی سازه، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران، broujerdian@iust.ac.ir

۱- مقدمه

بازگرداندگی همراه با بازشوندگی است. رفتار دو خطی نشان داده شده در شکل (۱) مربوط به مکانیسم بازگرداندگی است که در آن استهلاک انرژی وجود ندارد. برای تأمین مکانیسم جذب انرژی در سیستم، می‌بایست المان‌های جاذب انرژی تعبیه شود. مطابق شکل (۱)، خاصیت جذب انرژی، رفتار مرکز‌گرایی در سیستم ایجاد نمی‌کند. با ترکیب این دو مکانیسم، رفتار پرچمی مطابق شکل (۱) ایجاد می‌شود [۳-۴].

دیوار برشی گهواره‌ای یکی از سیستم‌های متداول مرکز‌گرا است که در آن هر دو مکانیسم نیروی بازگرداندگی و جذب انرژی

سیستم‌های مرکز‌گرا با تأمین دو خصوصیات رفتاری شامل مکانیسم نیروی بازگرداندگی^۱ و مکانیسم جذب انرژی^۲، برای تحمل بارهای جانبی در نظر گرفته می‌شوند [۱-۲]. هدف این دو مکانیسم در سازه، ایجاد منحنی‌های پرچمی شکل نیرو-جابه‌جایی تحت بارهای جانبی رفت و برگشتی مطابق شکل (۱) است. هدف استفاده از مکانیسم نیروی بازگرداندگی در سیستم، بازگرداندن سازه تغییر شکل یافته تحت بارهای جانبی به موقعیت اولیه خود است. در سیستم‌های مرکز‌گرا برای تولید منحنی‌های نیروی جانبی-تغییر مکان دو خطی نیاز به مکانیسم مهم نیروی



شکل (۱): منحنی رفتاری پریمی شکل سیستم مرکز‌گرا.

در سیستم تأمین می‌شود. مکانیسم نیروی بازگرداندندگی در سیستم با پیش‌تنیده کردن کابل‌های رابط دیوار (بلوک‌های گهواره‌ای) و فونداسیون تأمین می‌شود. بعد از غلبه نیروی جانبی به نیروی بازگرداندندگی، با چرخش دیوار یا بلوک‌های دیوار نسبت یکدیگر و نسبت به فونداسیون، بازشدگی در سیستم ایجاد می‌شود. فیوزهای جاذب انرژی در سیستم‌های گهواره‌ای در محل بازشدگی‌ها استفاده می‌شوند (شکل ۱). برای این فیوزها می‌توان از میلگرد معمولی، فیوز پروانه‌ای شکل، میراگر ویسکوز و ... استفاده کرد [۵].

سیستم‌های گهواره‌ای مرکز‌گرا امروزه مورد توجه بسیاری از محققین کشورهای مختلف قرار گرفته است. به‌طور کلی این سیستم‌ها می‌توانند با هسته‌ی بتنی [۶] و یا هسته‌ی مهاربندی [۷] مورد استفاده قرار گیرند و حتی می‌توانند با سیستم‌های دیگر مانند قاب خمشی ترکیب شوند [۸] و سیستم دوگانه را ایجاد کنند. گاهی اوقات برای کاهش اثرات موده‌های بالا، این سیستم‌ها به‌صورت چندگانه در ارتفاع مورد استفاده قرار می‌گیرند [۹].

دیوارهای گهواره‌ای مرکز‌گرا می‌توانند با دو روش درز قائم

افقی اجرا شوند. برای جلوگیری از خردشدگی بتن در لبه‌ها، می‌توان با استفاده از خاموت‌های اسپیرال، محصورشدگی ایجاد کرد. استفاده از درزهای قائم در دیوارهای بتنی و همچنین قرارگیری جاذب‌های انرژی در میان درزهای قائم می‌تواند تا حدود ۹۳ درصد جذب انرژی کل سیستم را تأمین کند [۶].

سیستم گهواره‌ای برای دیوار برشی پیش‌ساخته پیش‌تنیده به‌راحتی قابلیت اجرا دارد [۱۰]. استفاده از میراگرهای اصطکاکی نیز در سیستم‌های دیوار برشی پیش‌تنیده مرکز‌گرا مورد مطالعه قرار گرفته است [۱۱]. در دیوارهای گهواره‌ای مرکز‌گرا تا وقوع دررفت ۳ درصد، مفصل پلاستیک تشکیل نمی‌شود و لذا آسیب قابل توجهی رخ نمی‌دهد [۱۲-۱۳]. در تحقیقات گذشته، تلاش‌هایی برای حل فرم بسته رفتار دیوار گهواره‌ای مرکز‌گرا انجام شده است و معیارهایی برای طراحی این سیستم‌ها ارائه شده است [۱۴]. با توجه به اینکه ضوابط آیین‌نامه‌ای برای تسلیح طولی و عرضی در دیوارهای گهواره‌ای مرکز‌گرا وجود ندارد، تنها می‌بایست در لبه‌های دیوار در پنجه‌ها مقدار آرماتورگذاری طوری باشد که محصورشدگی مناسب ایجاد شود [۱۲].

اسمیت و کوراما [۱۹] یک دستورالعمل طراحی لرزه‌ای برای دیوارهای پیش‌ساخته پیش‌تینده ترکیبی بتنی بدون بازشدگی و دارای بازشدگی ارائه دادند. در دستورالعمل مزبور تأکید شده است که از بروز مکانیسم‌های خرابی نامناسب همچون گسیختگی تاندون‌ها و جاذب‌های انرژی، بلندشدگی پسماند (بازشدگی پسماند)، لغزش بیش‌ازحد در محل حرکت گهواره‌ای و خردشدگی نابهنگام بتن محصورشده در پنجه‌ها احتراز شود. در ادامه، اسمیت و همکاران [۲۰] رفتار دیوارهای پیش‌ساخته گهواره‌ای دارای بازشو با تعداد طبقات بیشتر را مورد مطالعه قرار دادند.

روش طراحی برای سیستم‌های گهواره‌ای به‌صورت استفاده از پارامترهای بدون بعد^۵ جذب انرژی و کابل پیش‌تینده گسترش یافته است [۲۱]. در تحقیق دیگر، رفتار چرخه‌ای دیوارهای بتنی مرکزگرا تحت اثر پنج پارامتر شامل: (۱) مساحت کابل پیش‌تینده، (۲) نسبت نیروی پیش‌تیدگی به نیروی تسلیم کابل، (۳) نسبت ابعادی دیوار، (۴) مساحت جاذب‌های انرژی و (۵) تنش تسلیم جاذب‌های انرژی بررسی شده است [۲۲]. نتایج مزبور نشان داد که برای افزایش کارایی سیستم، بهتر است مساحت جاذب‌های انرژی افزایش یابد و همچنین دررفت سازه را با افزایش نسبت ابعادی دیوار و نسبت پیش‌تیدگی اولیه کاهش داد. با افزایش پیش‌تیدگی 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 [۲۳].

بادیکا و ویجویکرما [۲۴] به مقایسه دیوار گهواره‌ای مرکزگرا با دیوارهای برشی معمولی پرداختند. عملکرد لرزه‌ای سیستم در دو سطح زلزله DBE^۶ و MCE^۷ مورد ارزیابی قرار گرفته است. در مقایسه سیستم‌های دیوارهای پیش‌ساخته پیش‌تینده در مقایسه با دیوارهای متداول آیین‌نامه‌ای در سطوح خطر DBE و MCE، آسیب‌های سازه‌ای در دیوارهای پیش‌ساخته پیش‌تینده کمتر بوده ولی جابه‌جایی‌های حداکثر در این سیستم‌ها بیشتر بوده است. علاوه بر این، آسیب‌پذیری اجزای غیر سازه‌ای در دیوار گهواره‌ای، به علت ایجاد شتاب‌های زیاد بیشتر است. همچنین، نشان داده شد که

جاذب‌های انرژی می‌توانند در عملکرد سازه‌ها بسیار مؤثر باشند. هنری و همکاران [۱۵] در تحقیقی به بررسی و معرفی انواع جاذب‌های انرژی در دیوارهای پیش‌ساخته با ستون انتهایی^۴ مرکزگرا پرداخته‌اند. اتصال O شکل به‌عنوان اتصال مناسب برای مناطق لرزه‌خیزی بالا پیشنهاد شده است. در تحقیق دیگر، هنری و همکاران [۱۶] کرنش فشاری نهایی در نظر گرفته شده بتن را برای محاسبه مقاومت خمشی دیوار گهواره‌ای ۰/۰۰۵ پیشنهاد داده‌اند (در مقابل کرنش ۰/۰۰۳ پیشنهادی آیین‌نامه‌ها، برای دیوارهای برشی معمولی). هنری و همکاران [۱۷] تأثیر رفتار غیرالاستیک پنجه دیوار در دیوارهای گهواره‌ای را بررسی کردند و نشان دادند که این رفتار مستقل از تعداد اتصالات جاذب انرژی است. با این وجود، با افزایش تعداد اتصالات جاذب انرژی، جذب انرژی کل سیستم افزایش می‌یابد و نیز لنگر مقاوم افزایش یافته، نیروی تاندون‌ها کاهش یافته و آسیب‌دیدگی پنجه‌ها کم می‌شود. بر اساس نتایج تحقیق مزبور، کاهش نیروی محوری ثقلی باعث افزایش آسیب‌پذیری پنجه می‌شود. از سوی دیگر، افزایش نیروی محوری دیوار، باعث افزایش جابه‌جایی پس‌ماند می‌شود. در مجموع، بار محوری اولیه کمتر از ۱۰ درصد ظرفیت دیوار، پاسخ مناسب رفتار جانبی دیوار را به همراه داشته و خرابی و جابه‌جایی ماندگار را کاهش می‌دهد. در صورت اتصال دیافراگم به دیوار گهواره‌ای، افزایش مقاومت جانبی در حدود ۵۰ درصد را به همراه دارد. باین حال، این اتصال موجب افزایش آسیب به دیافراگم می‌شود. البته با ارائه جزئیات مناسب می‌توان آسیب سازه‌ای به دیافراگم را کاهش داد. با ارائه روش پیشنهادی برای جداسازی دیافراگم از دیوار می‌توان رفتار جداسازی شده کامل را مشاهده نمود. جهت تکمیل مطالعات خود، هنری و همکاران [۱۸] نشان دادند در نظر گرفتن دیوارهای مرکزگرای دارای رفتار پرچمی ایده‌آل با استفاده از فنرهای پیچشی دارای رفتار پرچمی بدون جابه‌جایی پسماند کار صحیحی نیست. برای بررسی صحیح رفتار دیوارهای مرکزگرا می‌بایست رفتار واقعی بتن در این سیستم‌ها در تحلیل‌ها لحاظ شود.

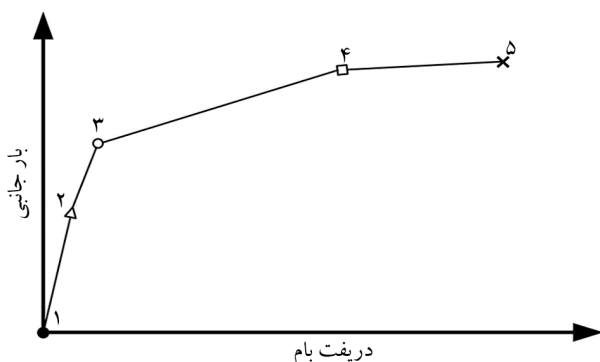
پیش‌تندگی اولیه به‌صورت بدون پیوند^۹ اجرا می‌شوند. رفتار دورانی و بلندشدگی در سازه‌های گهواره‌ای مشابه رفتار واقعی سیستم‌های متداول با در نظر گرفتن اندرکنش خاک-سازه است؛ زیرا در سازه‌های متداول با در نظر گرفتن اندرکنش خاک-سازه، سیستم سازه‌ای همچون بلوک گهواره‌ای می‌تواند دوران و بلندشدگی داشته باشد. ویجنسیو و الکساندر [۲۹] نشان دادند مؤلفه‌های دورانی زلزله بر پاسخ‌های تغییر شکل و شتاب‌های ایجاد شده در سازه می‌تواند تأثیر گذار باشند. میزان تأثیر مؤلفه‌های دورانی حرکات زمین به عواملی همچون نسبت شتاب مؤلفه‌های دورانی به انتقالی و اختلاف فاز ارتعاشی با توجه به دوره تناوب سازه‌ها و محتوای فرکانسی زلزله‌ها بستگی دارد. مؤلفه دورانی زلزله بیشتر در سازه‌های خاص همچون پل‌ها [۳۰]، سازه‌های بلندمرتبه [۳۱]، مخازن زمینی ذخیره آب [۳۲] و جداسازهای لرزه‌ای [۳۳]، مورد بررسی قرار گرفته است. اثر مؤلفه‌های دورانی زلزله می‌تواند در پاسخ سازه‌های ذکر شده چشم‌گیر باشد؛ به‌طوری‌که با اعمال مؤلفه‌های دورانی در سیستم‌های جداساز لرزه‌ای، شتاب بام و برش پایه به ترتیب ۲۲۰ و ۳۳ درصد افزایش می‌یابد. در تحقیق دیگر پایگانه و مرتضایی [۳۴] به بررسی رفتار سیستم‌های سازه‌ای قاب بتنی تحت مؤلفه‌های دورانی پرداختند. آنها نشان دادند، در نظر گرفتن مؤلفه دورانی در حالت پایه ثابت نسبت به پایه انعطاف‌پذیر، آسیب‌پذیری بیشتری در سازه ایجاد می‌کند. همچنین مؤلفه‌های دورانی باعث افزایش جابه‌جایی نسبی بین طبقات شده است.

بررسی تحقیقات انجام شده در زمینه دیوارهای مرکز‌گرای گهواره‌ای در یک دهه اخیر، نشان می‌دهد، مطالعه سیستماتیکی در خصوص تأثیر شتاب‌نگاشت انتقالی به همراه مؤلفه دورانی بر عملکرد لرزه‌ای این دیوارها انجام نشده است. با توجه به این‌که دیوارهای گهواره‌ای مرکز‌گرا دارای حرکت دورانی می‌باشند، مؤلفه دورانی زلزله در افزایش پاسخ‌های دیوار می‌تواند مؤثر باشد. در این تحقیق پس از صحت‌سنجی مدل‌سازی با استفاده از تحقیقات گذشته [۳۵]، به بررسی رفتار دیوارهای گهواره‌ای تحت ۲۵ رکورد دارای پالس پرداخته می‌شود. شش ترکیب بار برای اعمال مؤلفه شتاب‌نگاشت افقی و دورانی در تحلیل‌های

اثر مؤلفه قائم زلزله در سیستم دیوار گهواره‌ای مرکز‌گرا و دیوار برشی متداول آیین‌نامه‌ای بر روی پاسخ‌های سازه ناچیز است. بروجردیان و ده‌چشمه [۲۵] 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 به‌صورت دینامیکی افزاینده غیرخطی بوده است. در این تحقیق منحنی‌های شکنندگی استخراج شده است. هدف کلی این تحقیق، تعیین اثرات مودهای بالاتر به‌صورت خمش و برش در هسته دیوار پایه-گهواره‌ای بوده است. دیوارها در سطوح عملکردی مختلف مورد بررسی قرار گرفته‌اند. نتایج این تحقیق 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.

دیوارهای گهواره‌ای مرکز‌گرا به علت سختی بالای هسته‌ی گهواره‌ای، جابه‌جایی ایجاد شده در طبقات یکنواخت است. در بیشتر تحقیقات، خرابی‌ها به علت بازشدگی قسمت پایه دیوار، به پنجه و پاشنه دیوار محدود می‌شود. به‌طوری‌که تنها پوشش بتنی میلگردها در پایه‌ها و نیز انتهای تیرهای متصل به دیوارها دچار خرابی شده است. با افزایش جابه‌جایی‌های جانبی، سختی غیرالاستیک سیستم کاهش می‌یابد [۲۶]. استفاده از سیستم‌های گهواره‌ای در سیستم‌های سازه‌ای می‌تواند از ایجاد طبقه نرم جلوگیری کند [۲۷].

سیستم نوین دیگر دیوار گهواره‌ای مرکز‌گرا که از فن‌های انتهایی در محل اتصال تاندون‌های PT^۸ به بلوک گهواره‌ای استفاده شده بود، توسط سوبای‌هاوی و پسیکی ارائه شد [۲۸]. پاسخ این سیستم با تحلیل پوش استاتیکی و با استفاده از فرم بسته مورد ارزیابی قرار گرفت. تاندون‌های PT که نقش بازگرداندگی در سیستم دیوارهای گهواره‌ای مرکز‌گرا را ایجاد می‌کنند، برای جلوگیری از تسلیم آنها و کاهش نیروی



شکل (۲): حالات حدی مورد انتظار سیستم گهواره‌ای

دینامیکی در نظر گرفته شده است. سازه‌های مورد نظر با تعداد طبقات ۴، ۸، ۱۲، ۱۶ و ۲۰ تحت تحلیل‌های تاریخچه زمانی غیرخطی قرار می‌گیرند. مدل‌سازی‌ها در نرم‌افزار OpenSees به صورت دو بعدی و به صورت ریزمدل‌سازی اتصالات انجام می‌شود. ریزمدل‌سازی با لحاظ جزئیات جاذب‌های جذب انرژی، کابل‌های پیش‌تنیده و ابعاد واقعی دیوار انجام شده است.

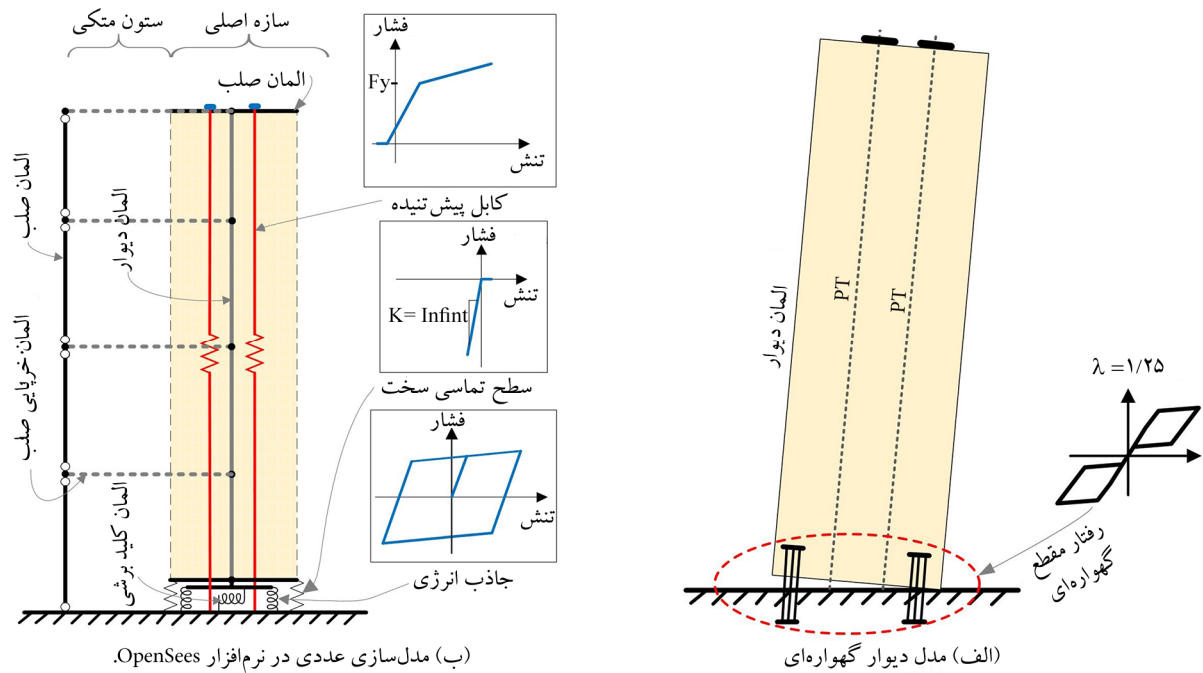
۲- روش تحقیق

۲-۱- حالات حدی دیوارهای مرکزگرای گهواره‌ای

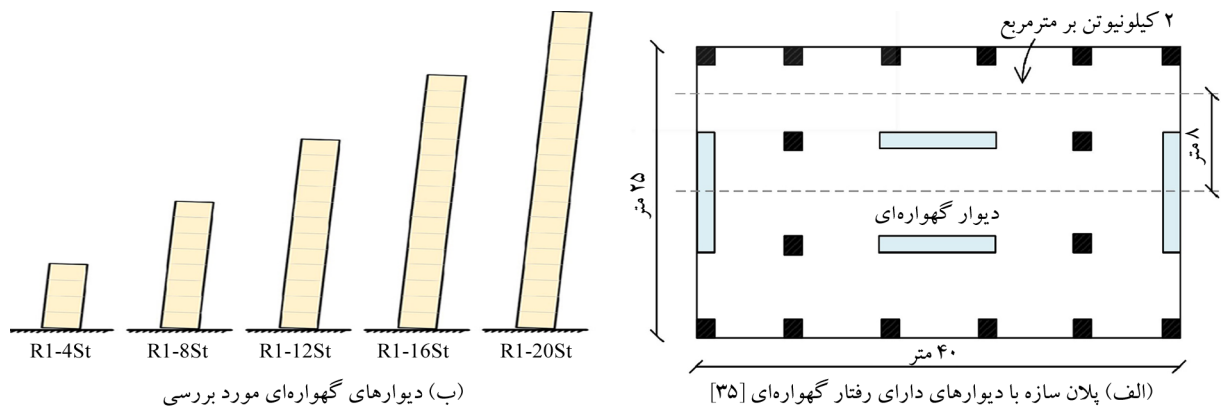
حالات حدی دیوار گهواره‌ای، مطابق شکل (۲)، شامل پنج نقطه حدی است. در نقطه‌ی ۱ سیستم بدون اعمال بار جانبی است. بعد از شروع بار جانبی با توجه به اینکه سیستم دارای کابل پیش‌تنیده است، سختی اولیه‌ی سیستم، متناظر با سختی دیوار است و بعد از غلبه نیروی جانبی بر نیروی پیش‌تنیده دیوار، بلندشدگی در سیستم در نقطه‌ی ۲ اتفاق می‌افتد و بعد از نقطه‌ی ۲ سختی مؤثر مربوط به کابل‌های پیش‌تنیده و سختی اولیه‌ی جاذب‌های انرژی پایه هستند و این سختی تا نقطه‌ی ۳، یعنی محل تسلیم جاذب‌های پایه انرژی ثابت می‌ماند و بعد از نقطه‌ی ۳ سیستم دارای سختی متناظر با سختی الاستیک کابل‌ها و سختی ثانویه جاذب‌های انرژی پایه هست. با افزایش بارگذاری حالت حدی بعدی برای سیستم گهواره‌ای تسلیم کابل در نقطه‌ی ۴ است شیب نمودار بعد از حالت حدی تسلیم کابل کمتر از نواحی قبل می‌شود این شیب تا نقطه‌ی ۵ ادامه پیدا می‌کند و نقطه‌ی ۵ مربوط به خرابی در هسته و یا گسیختگی کابل است. باید در طراحی این سیستم‌ها باید سعی شود از گسیختگی کابل قبل از خرابی هسته جلوگیری شود. برای طراحی سیستم‌های دیوار مرکزگرای گهواره‌ای بهتر است که طراحی طوری باشد که تحت زلزله‌ی مورد نظر، تسلیم در کابل اتفاق نیفتد زیرا تسلیم در کابل باعث بروز تغییرشکل‌های ماندگار در سیستم می‌شود و همچنین ممکن است سازه دچار واژگونی شود. همچنین لازم به ذکر است که در این حالات حدی بیان‌شده، از گسیختگی جاذب‌های انرژی با توجه به کرنش بالای گسیختگی فولاد صرف‌نظر شده است.

۲-۲- نحوه‌ی مدل‌سازی سیستم‌های گهواره‌ای

شکل (۳-الف) دیوار گهواره‌ای مورد بررسی در این تحقیق را نشان می‌دهد. در این دیوار محل قرارگیری مقطع گهواره‌ای، جاذب‌های انرژی (ED) ۱، کابل‌های PT و سایر اجزای دیوار نشان داده شده است. برای مدل‌سازی این سیستم در نرم‌افزار OpenSees از مصالح و المان‌های مختلفی استفاده می‌شود. در شکل (۳-ب) مدل‌سازی هسته‌ی بتنی دیوار به صورت الاستیک نشان داده شده است. مطابق مقالات پیشین [۹، ۳۶] در طراحی المان‌های دیوار، اجازه‌ی غیرخطی شدن بتن در پای دیوار داده نشده است. می‌توان فرض عدم تغییرشکل غیرخطی در بتن را صحیح دانست و سپس تنش در بتن را مورد بررسی قرار داد. در محل اتصال بلوک با سطح زمین، از فنرهای تماسی فشاری با سختی بالا و جاذب‌های انرژی (ED) استفاده شده است که برای مدل‌سازی این جاذب‌های انرژی از مصالح Steel02 در نرم‌افزار OpenSees استفاده شده است. بالای دیوارها با استفاده از کابل‌های پیش‌تنیده دارای رفتار مصالح بدون تحمل فشار و از نوع ElasticPPGap با پیش‌تنیدگی اولیه جهت اتصال بلوک بتنی به پایه استفاده می‌شود. در این مدل‌سازی برای بررسی اثر $P-\Delta$ ، قاب‌های ثقلی میانی و تأثیر در سیستم لرزه بر جانبی دیوارها از ستون متکی^{۱۱} مطابق شکل (۳-ب) استفاده شده است. دقت شود در مدل‌سازی ستون‌های متکی و همچنین اجزای انتهایی برای اتصال به انتهای دیوارها از المان‌های صلب مطابق شکل استفاده شده است.



شکل (۳): مدل نرم‌افزاری دیوار گهواره‌ای مرکز‌گرا.



شکل (۴): مشخصات مدل‌های مورد بررسی.

عرض دیوار مطابق مقاله [۳۵] انتخاب شده است. ارتفاع هر طبقه برابر با ۳/۵ متر در نظر گرفته شده است. سایر مشخصات سازه‌های مورد بررسی در جدول (۱) آورده شده است [۳۵].

۲-۴- صحت‌سنجی روند مدل‌سازی عددی

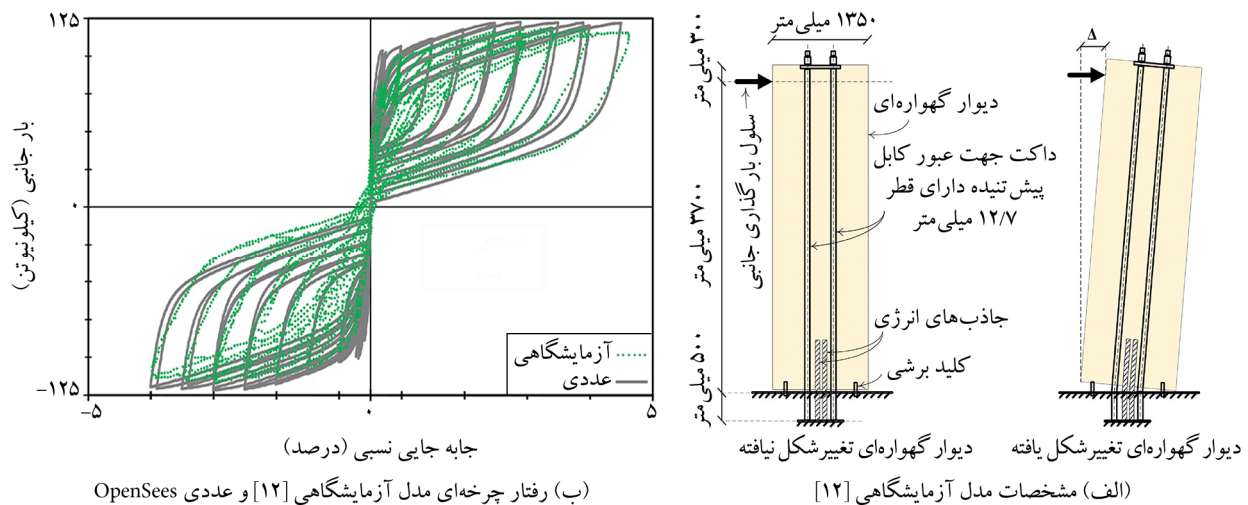
به‌منظور صحت‌سنجی مدل‌سازی در این تحقیق از نتایج آزمایشگاهی موجود در خصوص سیستم‌های مرکز‌گرا استفاده شد [۱۲]. مشخصات نمونه‌ی آزمایشگاهی مورد نظر در شکل (۵-الف) نشان داده شده است. ضخامت دیوار ۱۲۵ میلی‌متر، مقاومت فشاری بتن f'_c : ۴۵ مگاپاسکال، مشخصات آرماتورهای طولی و

۲-۳- مشخصات مدل‌های عددی

مدل‌های عددی مورد بررسی در این مقاله، دارای ساختمان مشابه پلان در شکل (۴-الف) و مشابه در شکل (۴-ب) دارای تعداد طبقات ۴، ۸، ۱۲، ۱۶ و ۲۰ است [۳۵]. وزن مؤثر لرزه‌ای در مدل‌های عددی دیوار برابر با ۲۵۰ تن نیرو در هر طبقه برای هر دیوار در نظر گرفته شده است. مشخصات مکانیکی بتن شامل f'_c : ۴۰ مگاپاسکال و E_c : ۳۰ گیگاپاسکال است، مشخصات مکانیکی جاذب‌های انرژی f_y : ۳۰۰ مگاپاسکال و E_s : ۲۱۰ گیگاپاسکال هستند. همچنین کابل‌های پیش‌تنیده دارای مشخصات مکانیکی f_y : ۱۵۶۰ مگاپاسکال و E_s : ۱۹۵ گیگاپاسکال هستند. ضخامت دیوار و

جدول (۱): مشخصات سازه‌های مورد بررسی در این تحقیق [۳۵].

تعداد طبقات	طبقه ۴	طبقه ۸	طبقه ۱۲	طبقه ۱۶	طبقه ۲۰
طول دیوار (متر)	۴	۶	۷/۵	۸	۸/۷
عرض دیوار (متر)	۰/۴	۰/۴	۰/۴	۰/۵	۰/۵
تعداد جاذب‌های انرژی	۱۶Φ۳۰	۲۰Φ۳۰	۲۴Φ۳۰	۳۰Φ۳۰	۳۸Φ۳۰
طول جاذب انرژی (متر)	۰/۲	۰/۴	۰/۶	۰/۶	۰/۶
نسبت فاصله کابل به طول دیوار از لبه	۰/۱۲۵	۰/۱۲۵	۰/۱۲۵	۰/۱۲۵	۰/۱۲۵
تعداد کابل‌ها (مساحت هر کابل برابر با ۹۹ میلی‌متر مربع است)	۳۱	۲۹	۲۵	۲۴	۲۳
نسبت فاصله جاذب انرژی به طول دیوار از لبه	۰/۳۵	۰/۳۵	۰/۲۵	۰/۳۵	۰/۳۵



فایبر استفاده شده است. نتایج مدل‌سازی نشان داد که خردشدگی در بتن رخ نداده است؛ بنابراین می‌توان جهت افزایش سرعت تحلیل‌های نرم‌افزاری از مقطع الاستیک برای دیوار استفاده کرد. مصالح Steel02 مورد استفاده برای جاذب‌های انرژی با استفاده از نتایج آزمایشگاهی صحت‌سنجی شده است (شکل ۶). مقادیر پارامترهای کالیبره شده مورد استفاده در تعریف Steel02 شامل: $R0$ ، $cR1$ و $cR2$ است که به ترتیب برابر با مقادیر ۰/۱، ۰/۱۸، ۰/۹۲۵ و ۰/۱۵ در نظر گرفته شده‌اند.

۲-۵- شتاب‌نگاشت‌های لرزه‌ای

۲-۵-۱- مؤلفه دورانی زلزله

در بیشتر تحقیقات مربوط به رفتار لرزه‌ای سازه‌ها، معمولاً به سه مؤلفه انتقالی آن یعنی دو مؤلفه افقی و در بعضی تحلیل‌ها به مؤلفه زلزله قائم توجه می‌شود. عدم امکان ثبت مؤلفه‌های دورانی

عرضی f_y : ۴۶۰ مگاپاسکال و E_s : ۲۰۰ گیگاپاسکال و همچنین کابل‌های پیش‌تینده دارای f_y : ۱۴۳۵ مگاپاسکال و E_s : ۱۸۰ گیگاپاسکال است.

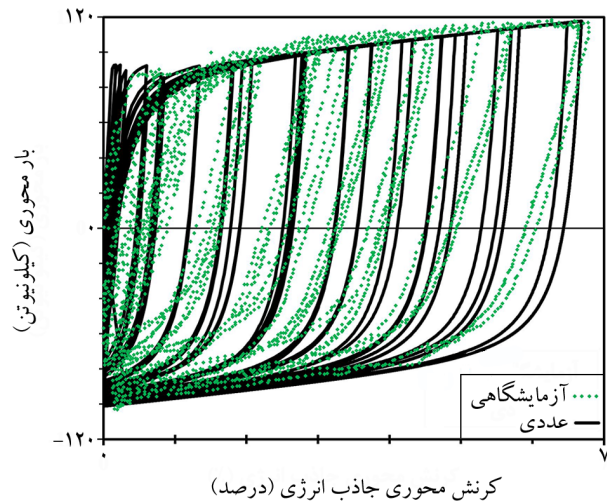
همان‌طور که در شکل (۵-الف) نشان داده شده است، با وقوع بلند شدگی، جذب انرژی توسط میلگردهای محل بازشدگی اتفاق می‌افتد. شکل (۵-ب) نمودار عددی چرخه‌ای برش پایه-جابه‌جایی بام را با نتایج آزمایشگاهی مقایسه کرده است. مقایسه نمودارهای حاصل از مدل نرم‌افزاری و مدل آزمایشگاهی حاکی از دقت نسبتاً خوب مدل‌سازی است. اختلاف نتایج آزمایشگاهی و مدل عددی برای مقادیر جذب انرژی (مساحت زیر نمودار پوش‌اور چرخه‌ای) و حداکثر برش ایجاد شده در دیوار به ترتیب برابر با ۶ و ۳ درصد می‌باشد. این اختلاف با توجه به اینکه کمتر از ۱۰ درصد است، رضایت‌بخش هستند. قابل ذکر است، در مدل‌سازی عددی سیستم گهواره‌ای مربوط به قسمت صحت‌سنجی، از مقطع

لرزه‌نگاری برای تولید مؤلفه‌های دورانی زلزله استفاده می‌شود. در این روش با استفاده از اطلاعات امواج زلزله، مشخصات خاک بین مرکز کانونی و ساختگاه زلزله و... محاسبات مربوط به مؤلفه‌های دورانی زلزله انجام می‌شود [۴۳-۴۴].

در روش MSP یا ژئودتیک اطلاعات موجود چند ایستگاه لرزه‌نگاری در یک منطقه برای تولید مؤلفه‌های دورانی زمین‌لرزه استفاده می‌گردد. برای انجام این روش به شبکه‌ای منظم از شتاب‌نگاشت‌ها و مجموعه وسیعی از اطلاعات جمع‌آوری شده نیاز است. اسپادیچ و همکاران [۴۵] از جمله محققینی هستند که روشی بر این اساس ارائه نمودند. لائوامی و لایب [۴۶] از اطلاعات ثبت شده در ۱۵ ایستگاه نزدیک به هم در منطقه لوتانگ تایوان برای به دست آوردن مؤلفه‌های دورانی زمین‌لرزه استفاده کردند.

باسو و همکاران [۳۷] اکثر روش‌های تولید مؤلفه‌های دورانی زلزله که تاکنون ارائه شده را جمع‌آوری کردند. همچنین آنها روش SSP را با اصلاحاتی ارائه کرده‌اند که در این تحقیق برای ساخت مؤلفه‌های دورانی زلزله حوزه نزدیک از آن استفاده شده است. در این روش با داشتن اطلاعات مربوط به تنها یک ایستگاه لرزه‌نگاری می‌توان مؤلفه‌های دورانی زلزله در آن ایستگاه را محاسبه نمود. این روش توسط مؤلفین در نرم‌افزار از MATLAB کد نویسی شده و در اختیار سایر محققین قرار گرفته است. در این روش مؤلفه‌های افقی و قائم زلزله به امواج ^{15}P ، ^{16}SH و ^{17}SV تجزیه می‌گردد. فرض می‌شود که این امواج از کانون زلزله تا ایستگاه لرزه‌نگاری درون صفحه‌ای به نام صفحه اصلی سیر می‌کنند. صفحه اصلی، صفحه قائم است که کانون زلزله و ایستگاه لرزه‌نگاری را درون خود جای داده است (شکل ۷). همچنین فرض شده است که این امواج تجزیه شده هیچ اندرکنشی و تأثیری روی یکدیگر ندارند [۳۷].

موج P هم امتداد با راستای صفحه اصلی سیر می‌کند، درحالی که مسیر حرکت امواج اولیه SH و SV عمود بر صفحه این راستاست. امواج P و SV پس از برخورد با ایستگاه لرزه‌نگاری O یکدیگر را بازتاب می‌دهند، در صورتی که موج SH تنها خودش را بازمی‌تاباند.



شکل (۶): صحت‌سنجی رفتار چرخه‌ای جاذب انرژی مورد استفاده در نرم‌افزار OpenSees مطابق نمونه آزمایشگاهی [۱۲].

زلزله توسط دستگاه‌های لرزه‌نگاری موجود می‌تواند یکی از دلایل نپرداختن به این موضوع باشد. از این رو پژوهشگران زیادی به بررسی روش‌های مختلف جهت به دست آوردن مؤلفه‌های دورانی با استفاده از خصوصیات موج‌های سطحی و حجمی زلزله و مشخصات ژئوتکنیکی خاک با به کارگیری روابط ریاضی پرداخته‌اند [۳۷].

در سال‌های گذشته پژوهش‌های زیادی در زمینه چگونگی تولید مؤلفه‌های دورانی به صورت غیرمستقیم و با استفاده از داده‌های مؤلفه‌های انتقالی انجام شده است. نیومارک [۳۸] رابطه‌ای ساده برای ایجاد ارتباط میان مؤلفه‌های انتقالی و دورانی بر پایه انتشار امواج هارمونیک با سرعت ثابت پیشنهاد نمود. غفوری آشتیانی و سینگ [۳۹] روشی در حوزه زمان با نام روش مشتقات زمانی پیشنهاد نمودند. این روش قادر به استخراج مؤلفه‌های دورانی زلزله از مؤلفه‌های انتقالی است. این روش در سال‌های اخیر توسط فلامرز شیخ‌آبادی و غفوری آشتیانی [۴۰]، فلامرز شیخ‌آبادی [۴۱] و فلامرز شیخ‌آبادی و همکاران [۴۲] گسترش یافته است.

اکثر روش‌های پیشنهاد شده با استفاده از تئوری انتشار امواج در یک محیط همگن الاستیک، در دو گروه تک‌ایستگاهی (SSP) و چند ایستگاهی (MSP) یا ژئودتیک^{۱۴} تقسیم‌بندی می‌شوند. در روش SSP اطلاعات به دست آمده از یک ایستگاه

است. با همین فرضیات مؤلفه‌های شتاب گهواره‌ای که توسط امواج P تولید می‌شوند، نیز طبق روابط (۳) و (۴) به دست خواهند آمد [۳۷].

$${}^s_r\ddot{\theta}_{x_1x_2}(t) - \left(\frac{\sin\theta_0}{c_T}\right) {}^s_r\ddot{u}_{x_2}(t) \quad (1)$$

$${}^s_r\ddot{\theta}_{x_1x_2}(t) = \left(\frac{2\sin^2\theta_0(1-\eta^2\sin^2\theta_0)^{0.5}}{\eta c_T(1-\sin^2\theta_0)}\right) {}^s_r\ddot{u}_{x_1}(t) \quad (2)$$

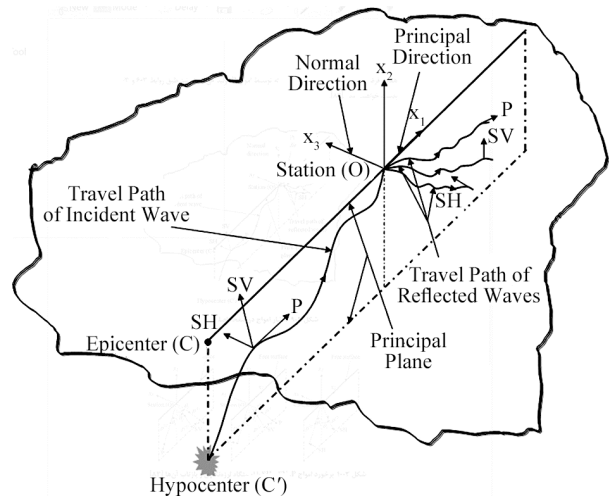
$${}^p_r\ddot{\theta}_{x_1x_2}(t) = -\left(\frac{\sin\theta_0}{c_L}\right) {}^p_r\ddot{u}_{x_2}(t) \quad (3)$$

$${}^p_r\ddot{\theta}_{x_1x_2}(t) = \left(\frac{(\eta^2 - 2\sin^2\theta_0)}{2c_L(\eta^2 - \sin^2\theta_0)}\right) {}^p_r\ddot{u}_{x_1}(t) \quad (4)$$

در این معادلات ${}^p_r\ddot{\theta}_{x_1x_2}(t)$ و ${}^s_r\ddot{\theta}_{x_1x_2}(t)$ شتاب گهواره‌ای تولید شده توسط امواج SV و P، \ddot{u}_{x_1} و \ddot{u}_{x_2} مشتق سوم حرکت افقی در راستای x_1 و x_2 است. θ_0 زاویه برخورد امواج، c_L و c_T سرعت حرکت امواج P و S و η نسبت بین این دو سرعت می‌باشد. مؤلفه پیچشی حرکت زمین نیز با تجزیه موج SH حاصل از شتاب‌های افقی، طبقه معادله (۵) به دست می‌آید [۳۷].

$${}^{sh}_r\ddot{\theta}_{x_1x_3}(t) = \left(\frac{0.5\sin\theta_0}{c_T}\right) {}^s_r\ddot{u}_{x_3}(t) \quad (5)$$

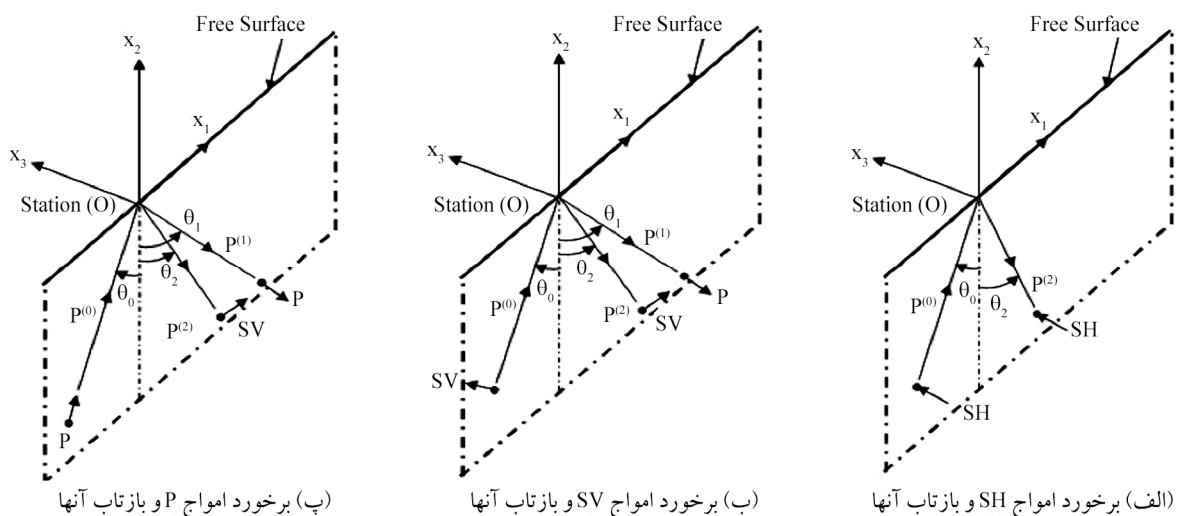
که در آن ${}^{sh}_r\ddot{\theta}_{x_1x_3}$ شتاب پیچشی ایجاد شده توسط موج SH و \ddot{u}_{x_3} مشتق سوم حرکت در راستای قائم در نقطه O است [۳۷].



شکل (۷): انتشار امواج در صفحه اصلی [۳۷].

در شکل (۸) برخورد امواج P، SV و SH به نقطه O و بازتاب آنها نمایش داده شده است. زاویه θ_0 زاویه برخورد امواج ورودی به نقطه O با امتداد محور x_2 در صفحه اصلی و θ_1 ، θ_2 و θ_3 به ترتیب زوایای بازتاب امواج P، SV و SH می‌باشند [۳۷].

پس از تجزیه مؤلفه قائم به امواج P و SV، همچنین تجزیه به مؤلفه‌های افقی جهات x_1 و x_2 ، مؤلفه شتاب گهواره‌ای ایجاد شده توسط موج SV به صورت معادلات (۱) و (۲) قابل نوشتن است. منظور از شتاب گهواره‌ای، شتاب زاویه‌ای زلزله حول محورهای افقی است. لازم به توضیح است که این معادلات تا هنگامی که زاویه θ_0 کوچک‌تر از زاویه بحرانی باشد، معتبر



شکل (۸): برخورد امواج P، SV و SH با ایستگاه لرزه‌نگاری و بازتاب آنها [۳۷].

۲-۵-۲- شتاب‌نگاشت‌های لرزه‌ای

افقی و دورانی زلزله‌های انتخابی مطابق جدول (۳) انجام شده است [۳۳]. در این جدول H و R به ترتیب نشان‌دهنده‌ی مؤلفه افقی و مؤلفه دورانی زلزله هستند. اندیس αH_{max} زاویه مربوط به جهت زلزله افقی عمود بر گسل است، یا جهتی که حداکثر رکورد افقی (H) اتفاق می‌افتد. اندیس αR_{max} زاویه مربوط به جهتی است که حداکثر رکورد دورانی (R) اتفاق می‌افتد. در ادامه، برای تحلیل تاریخچه زمانی سازه‌ها، ماکزیمم ترکیب بار ۳ و ۴ برای ترکیب مؤلفه حداکثر زلزله افقی و دورانی و ماکزیمم ترکیب بار ۵ و ۶ برای ترکیب مؤلفه افقی و حداکثر زلزله دورانی در نظر گرفته شده است.

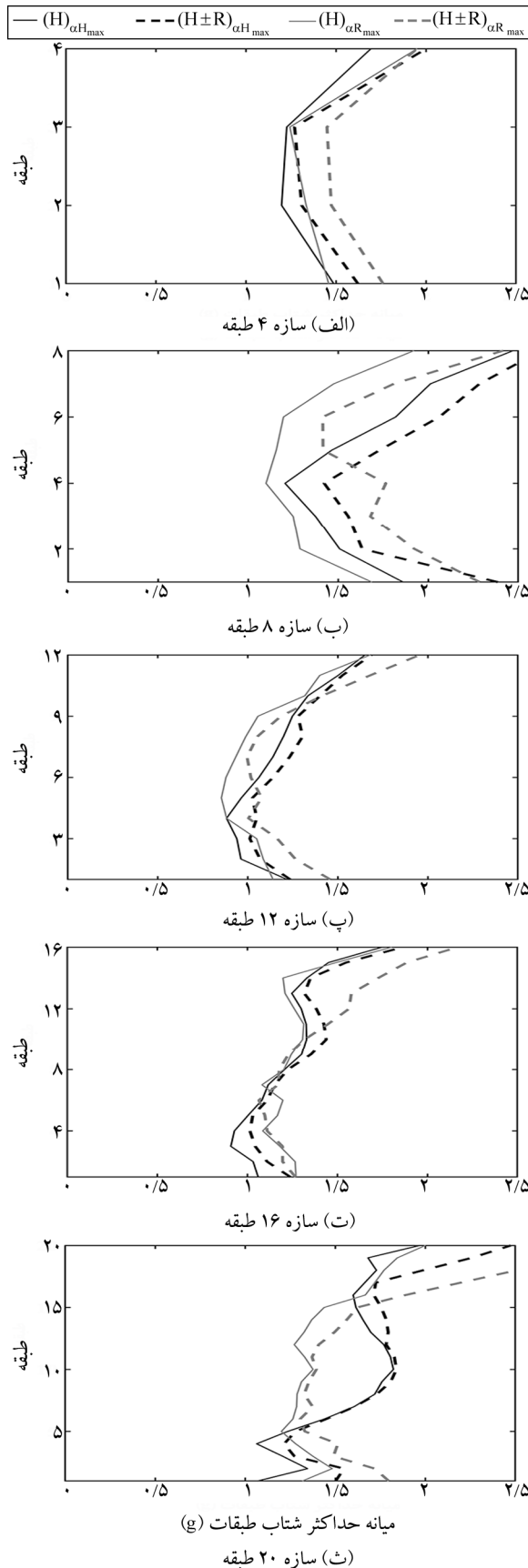
در تحقیق حاضر از شتاب‌نگاشت‌های نزدیک گسل دارای پالس مرجع [۴۷] استفاده شده است. این شتاب‌نگاشت‌ها شامل ۲۵ زوج شتاب‌نگاشت افقی متعامد به همراه ۲۵ زوج شتاب‌نگاشت دورانی متعامد (نظیر همان راستاها) می‌باشند (جدول ۲). ابتدا لازم است با دوران راستاهای متعامد اولیه حول محور قائم، مؤلفه‌های شتاب‌نگاشت‌های افقی در راستای عمود بر گسل و مؤلفه‌های شتاب‌نگاشت‌های دورانی در جهتی که حداکثر رکورد دورانی اتفاق می‌افتد محاسبه شود. برای این کار، از روش تشریح شده در مرجع [۴۸] استفاده شده است. در مرحله بعد، ترکیب مؤلفه‌های

جدول (۲): شتاب‌نگاشت‌های لرزه‌ای نزدیک گسل دارای پالس مورد استفاده در این تحقیق [۴۷].

شماره	رکورد	ایستگاه	نوع خاک	PGA (g)	PGV (cm/s)	M _w
۱	Cape Mendocino	Petrolia	C	۰/۶۶۲	۸۲/۱	۷
۲	Chi-Chi, Taiwan	TCU065	D	۰/۷۸۹	۱۲۷/۷	۷/۶
۳	Chi-Chi, Taiwan	TCU068	D	۰/۵۰۷	۱۹۱/۱	۷/۶
۴	Chi-Chi, Taiwan	TCU075	D	۰/۳۳۲	۸۸/۴	۷/۶
۵	Coalinga-05	Oil City	C	۰/۸۴۱	۴۱/۲	۵/۸
۶	Coalinga-05	Transmitter Hill	C	۱/۰۸۳	۴۶/۱	۵/۸
۷	Duzce	Duzce	D	۰/۵۳۵	۸۳/۵	۷/۲
۸	Duzce	Bolu	C	۰/۸۲۲	۶۲/۱	۷/۱
۹	Erzican, Turkey	Erzican	D	۰/۴۹۶	۹۵/۴	۶/۷
۱۰	Imperial Valley-06	Elcentro#5	C	۰/۵۲۸	۹۱/۵	۶/۵
۱۱	Imperial Valley-06	Elcentro#7	D	۰/۴۶۳	۱۰۸/۸	۶/۵
۱۲	Imperial Valley-06	Elcentro#8	C	۰/۶۰۲	۴۸/۶	۶/۵
۱۳	Kobe	Takatori	D	۰/۶۱۶	۱۶۹/۶	۶/۹
۱۴	Kobe	Takarazuka	D	۰/۶۹۷	۷۲/۶	۶/۹
۱۵	Kocaeli, Turkey	Gebze	B	۰/۲۶۱	۵۲	۷/۵
۱۶	Landers	Barstow	D	۰/۱۳۵	۳۰/۴	۷/۳
۱۷	Landers	Lucerne	C	۰/۷۸۹	۱۴۰/۳	۷/۳
۱۸	Loma Prieta	Oakland	D	۰/۲۹	۴۹/۲	۶/۹
۱۹	Loma Prieta	Saratoga	C	۰/۵۱۲	۵۵/۶	۶/۹
۲۰	Morgan Hill	Coyote Lake Dam	B	۱/۳۰۳	۶۲/۳	۶/۲
۲۱	N. Palm Strings	North Palm Strings	D	۰/۶۹۳	۷۳/۶	۶/۱
۲۲	Northridge-01	Sylmar-Converter Station	C	۰/۸۹۷	۱۳۰/۳	۶/۷
۲۳	Northridge-01	Sylmar-Converter Station East	C	۰/۸۲۸	۱۱۶/۶	۶/۷
۲۴	Northridge-01	Sylmar-Olive View	C	۰/۸۴۳	۱۲۲/۷	۶/۷
۲۵	San Fernando	Pacoima Dam	B	۱/۲۴	۱۱۶/۵	۶/۶

جدول (۳): ترکیب بارهای لرزه‌ای مورد استفاده در این تحقیق [۳۳].

مؤلفه‌های زمین لرزه	ترکیب
$(H)_{\alpha H_{max}}$	۱
$(H)_{\alpha R_{max}}$	۲
$(H+R)_{\alpha H_{max}}$	۳
$(H-R)_{\alpha H_{max}}$	۴
$(H+R)_{\alpha R_{max}}$	۵
$(H-R)_{\alpha R_{max}}$	۶



شکل (۹): مقایسه میان‌ه حداکثر شتاب طبقات تحت شتاب‌نگاشت‌های لرزه‌ای در سقف سازه‌ها.

برای مقیاس کردن شتاب‌نگاشت‌های لرزه‌ای مطابق دستورالعمل FEMA P695 [۴۹]، ابتدا شتاب‌نگاشت‌ها نرمالایز^{۱۸} می‌شوند. نرمالایز کردن شتاب‌نگاشت، بدون اینکه تنوع محتوای فرکانسی را تغییر دهد، باعث کاهش پراکندگی‌های ناشی از سناریو می‌شود. این فرآیند منجر به حذف بخشی از عدم قطعیت بنام Unwarranted Variability (همانند؛ بزرگ‌گانه^{۱۹}، فاصله از گسل^{۲۰}، نوع گسلش^{۲۱} و جنس خاک^{۲۲}) می‌شود. برای این کار، ابتدا ضریب نرمالایز هر شتاب‌نگاشت را با تقسیم میان‌ه حداکثر سرعت شتاب‌نگاشت مورد نظر $(PGV_{PEER,i})$ بر حداکثر سرعت شتاب‌نگاشت نام به دست می‌آوریم:

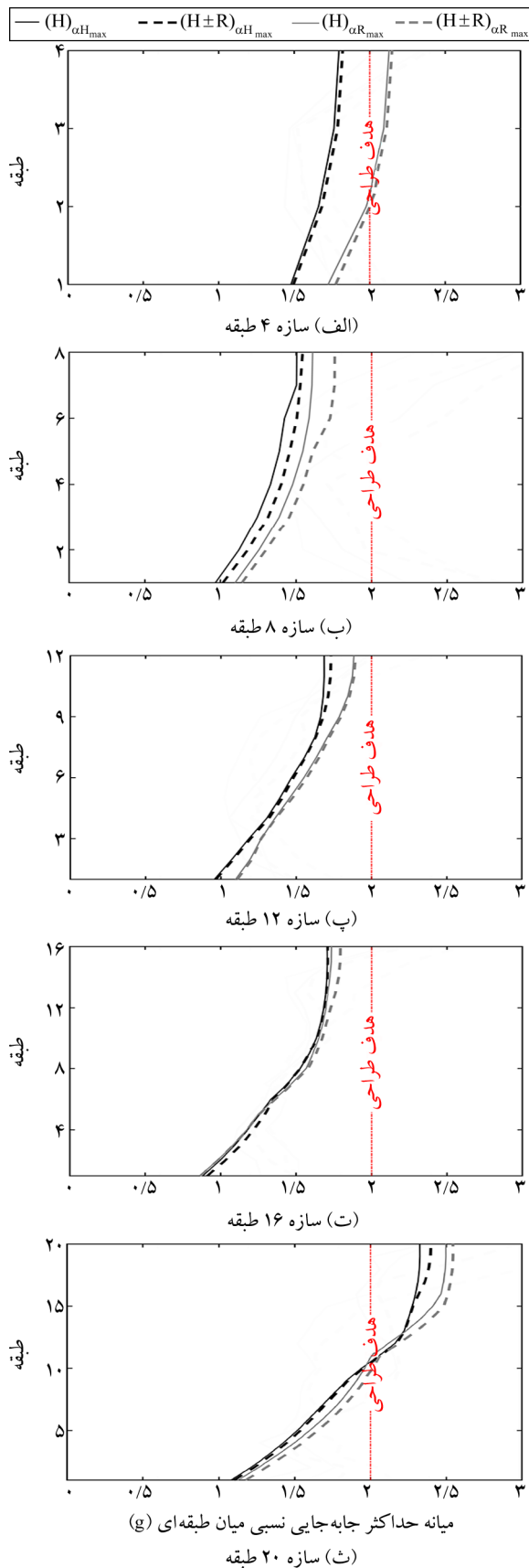
$$NM_i = \text{median}(PGV_{PEER,i}) / PGV_{PEER,i} \quad (۶)$$

در شبیه‌سازی‌های دو بعدی، برای مقیاس‌سازی شتاب‌نگاشت‌ها، معمولاً مطابق آیین‌نامه ASCE7 [۵۰] در محدوده‌ی $0.2T_1$ الی $1.5T_1$ ، میان‌ه شتاب طیف شتاب‌نگاشت‌ها به طیف طراحی مقیاس می‌شود که در آن T_1 زمان تناوب نوسان مود اول سازه است. بعد از تعیین ضریب مقیاس طیفی با مقایسه‌ی میان‌ه طیف‌های شتاب‌نگاشت‌ها و طیف آیین‌نامه، ضریب مقیاس کلی هر شتاب‌نگاشت با ضرب ضریب مقیاس طیفی در ضریب نرمالایز NM_i تعیین می‌شود.

۳- نتایج و بحث

۳-۱- شتاب طبقات

شکل (۹)، میان‌ه حداکثر شتاب طبقات در سازه‌های مورد بررسی را نشان می‌دهد. مطابق این شکل مؤلفه‌های دورانی باعث افزایش چشمگیری در مقادیر شتاب طبقات شده است. در بعضی از سازه‌ها با توجه به محتوای فرکانسی سازه و شتاب‌نگاشت‌ها، مقادیر درصد این افزایش شتاب‌ها بیشتر بوده است. مطابق این شکل،



شکل (۱۰): مقایسه میان‌ه حد اکثر جابه‌جایی نسبی طبقات تحت شتاب‌نگاشت‌های لرزه‌ای سازه‌ها.

اثر مؤلفه افقی و ترکیب آن با مؤلفه دورانی در حالت مؤلفه‌های عمود بر گسل (αH_{max}) در بعضی از طبقات و سازه‌ها می‌تواند کمتر از مؤلفه افقی و ترکیب آن با مؤلفه دورانی در حالت مؤلفه‌های دورانی حداکثر (αR_{max}) باشد. در نظر گرفتن مؤلفه دورانی در سازه‌های ۴، ۸، ۱۲، ۱۶ و ۲۰ طبقه به ترتیب ۱۰، ۱۲/۹، ۱۶/۸، ۶/۶ و ۹/۹ درصد در جهت αH_{max} ، شتاب میانگین طبقات را افزایش می‌دهد. همچنین در نظر گرفتن مؤلفه دورانی در سازه‌های ۴، ۸، ۱۲، ۱۶ و ۲۰ طبقه به ترتیب ۱۲، ۲۴/۶، ۱۵، ۸/۹ و ۱۵/۸ درصد در جهت αR_{max} ، شتاب میانگین طبقات را افزایش می‌دهد.

۳-۲- جابه‌جایی‌های نسبی طبقات

شکل (۱۰)، میان‌ه حد اکثر جابه‌جایی نسبی طبقات در سازه‌های مورد بررسی را نشان می‌دهد. مطابق این شکل مؤلفه‌های دورانی باعث افزایش مقادیر جابه‌جایی نسبی طبقات شده است. در بعضی از سازه‌ها با توجه به محتوای فرکانسی سازه و شتاب‌نگاشت‌ها، مقادیر درصد این افزایش جابه‌جایی نسبی طبقات بیشتر بوده است. مطابق این شکل، اثر مؤلفه افقی و ترکیب آن با مؤلفه دورانی در حالت αH_{max} تقریباً در تمامی طبقات و سازه‌ها، کمتر از مؤلفه افقی و ترکیب آن با مؤلفه دورانی در حالت αR_{max} باشد. در نظر گرفتن مؤلفه دورانی در سازه‌های ۴، ۸، ۱۲، ۱۶ و ۲۰ طبقه به ترتیب ۱/۴، ۵/۸، ۲/۷، ۳/۶ و ۳/۲ درصد در جهت αH_{max} ، جابه‌جایی نسبی حداکثر طبقات را افزایش می‌دهد. همچنین در نظر گرفتن مؤلفه دورانی در سازه‌های ۴، ۸، ۱۲، ۱۶ و ۲۰ طبقه به ترتیب ۹/۳، ۱/۳، ۳/۵ و ۳/۵ درصد در جهت αR_{max} ، جابه‌جایی نسبی حداکثر طبقات را افزایش می‌دهد. لازم به ذکر است که در بعضی از سازه‌ها (به‌طور مثال سازه ۴ و ۲۰ طبقه) افزایش جابه‌جایی نسبی میان‌طبقه‌ای بیش از حد مجاز طراحی مشاهده می‌گردد.

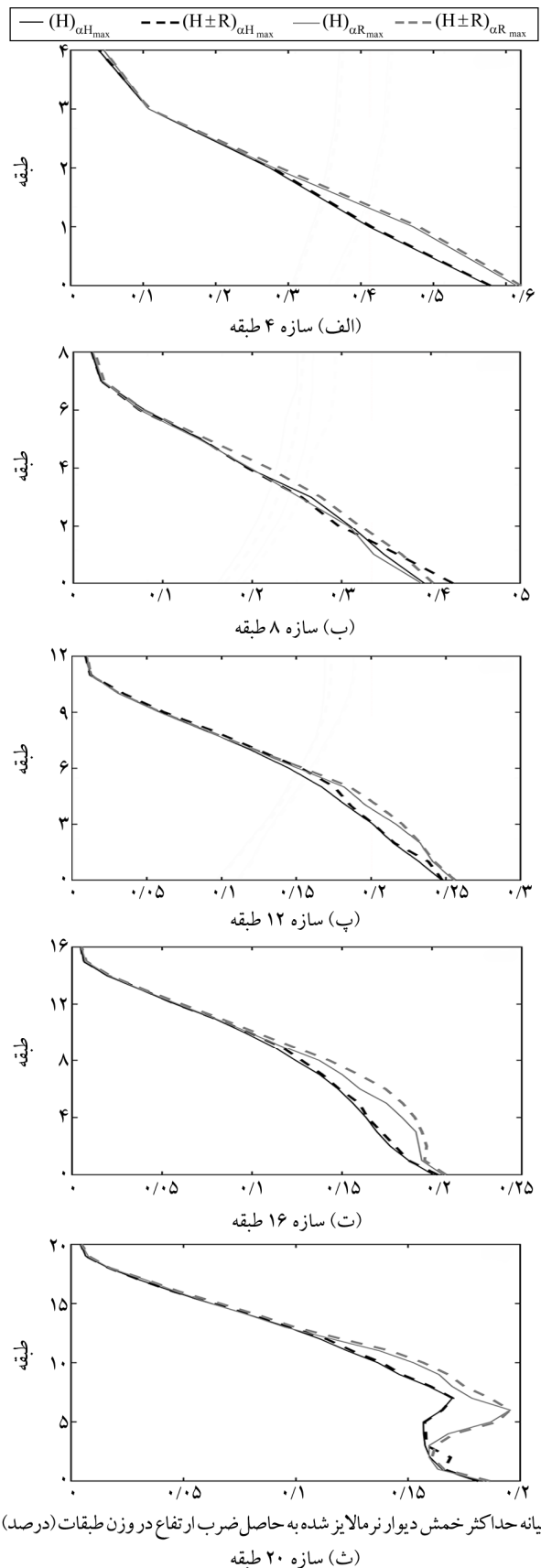
۳-۳- لنگر خمشی دیوار

شکل (۱۱)، میان‌ه حد اکثر خمش دیوار در طبقات سازه‌های مورد بررسی را نشان می‌دهد. در این شکل محور افقی، میان‌ه حد اکثر خمش دیوار نرمالایز شده به حاصل ضرب ارتفاع در وزن طبقات و محور قائم، طبقات سازه مورد نظر را نشان می‌دهد.

نرمالیزسازی محور افقی با تقسیم حداکثر خمش دیوار بر مقادیر تجمعی حاصل ضرب وزن هر طبقه در ارتفاع طبقه مورد نظر انجام شده است [۳۶]. مطابق شکل مورد نظر، مؤلفه‌های دورانی باعث افزایش مقادیر حداکثر خمش دیوار طبقات شده است. در بعضی از سازه‌ها با توجه به محتوای فرکانسی سازه و شتاب‌نگاشت‌ها، مقادیر درصد این افزایش حداکثر خمش دیوار طبقات بیشتر بوده است. مطابق این شکل، اثر مؤلفه افقی و ترکیب آن با مؤلفه دورانی در حالت αH_{max} در بیشتر طبقات سازه‌ها، کمتر از مؤلفه افقی و ترکیب آن با مؤلفه دورانی در حالت αR_{max} باشد. در نظر گرفتن مؤلفه دورانی در سازه‌های ۴، ۸، ۱۲، ۱۶ و ۲۰ طبقه به ترتیب ۱/۳، ۸/۲، ۹/۹، ۴ و ۵/۷ درصد در جهت αH_{max} ، مقادیر حداکثر خمش دیوار در طبقات را افزایش می‌دهد. همچنین در نظر گرفتن مؤلفه دورانی در سازه‌های ۴، ۸، ۱۲، ۱۶ و ۲۰ طبقه به ترتیب ۳/۳، ۱۰/۴، ۸/۹، ۴ و ۵/۹ درصد در جهت αR_{max} ، مقادیر حداکثر خمش دیوار در طبقات را افزایش می‌دهد. اثر مودهای بالاتر به صورت افزایش خمش در طبقات بالایی نسبت به پایه در سازه‌های بلندتر (به طور مثال سازه ۲۰ طبقه) قابل مشاهده است. مؤلفه‌های دورانی زلزله نیز می‌توانند منجر به افزایش اثرات مودهای بالاتر در سازه‌های گهواره‌ای شوند. دلیل این موضوع افزایش لنگر خمشی بیشتر ناشی از اثرات مؤلفه‌های دورانی زلزله است.

۳-۴- برش طبقات

شکل (۱۲)، میانه حداکثر برش دیوار در طبقات سازه‌های مورد بررسی را نشان می‌دهد. در این شکل محور افقی، میانه حداکثر برش دیوار نرمالیز شده به وزن طبقات و محور قائم، طبقات سازه مورد نظر را نشان می‌دهد. نرمالیزسازی محور افقی با تقسیم حداکثر برش دیوار بر مقادیر تجمعی وزن هر طبقه مورد نظر انجام شده است [۳۶]. مطابق شکل مورد نظر، مؤلفه‌های دورانی باعث افزایش مقادیر حداکثر برش دیوار طبقات شده است. در بعضی از سازه‌ها با توجه به محتوای فرکانسی سازه و شتاب‌نگاشت‌ها، مقادیر درصد این افزایش حداکثر خمش دیوار طبقات بیشتر بوده است. مطابق این شکل، اثر مؤلفه افقی و ترکیب



شکل (۱۱): مقایسه میانه‌ی M_{max} Moment دیوار تحت شتاب‌نگاشت‌های مختلف در دیوار سازه‌ها. میان‌ه حداکثر خمش دیوار نرمالیز شده به حاصل ضرب ارتفاع در وزن طبقات (درصد) سازه ۲۰ طبقه

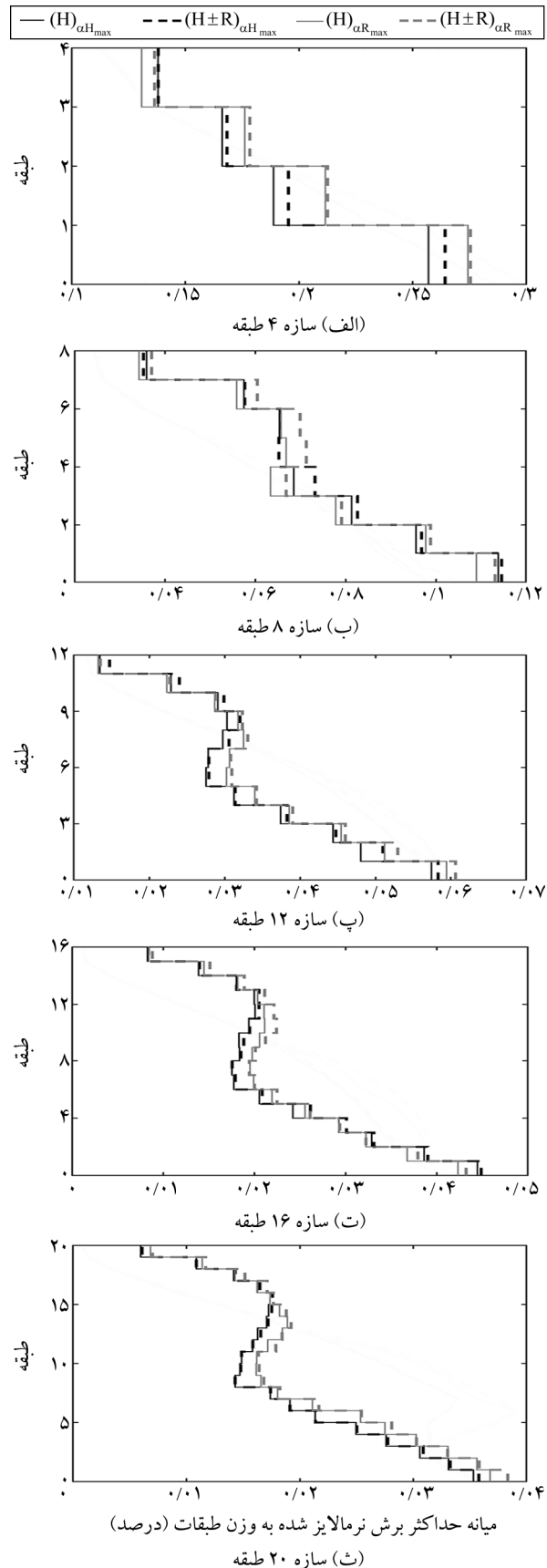
شکل (۱۱): مقایسه میانه‌ی M_{max} Moment دیوار تحت شتاب‌نگاشت‌های مختلف در دیوار سازه‌ها.

آن با مؤلفه دورانی در حالت αH_{max} در بیشتر طبقات سازه‌ها (به جز سازه ۸ و ۱۶ طبقه)، کمتر از مؤلفه افقی و ترکیب آن با مؤلفه دورانی در حالت αR_{max} باشد. در نظر گرفتن مؤلفه دورانی در سازه‌های ۴، ۸، ۱۲، ۱۶ و ۲۰ طبقه به ترتیب ۳/۵، ۶/۹، ۹/۶، ۷/۹ و ۲/۳ درصد در جهت αH_{max} ، مقادیر حداکثر برش طبقات را افزایش می‌دهد. همچنین در نظر گرفتن مؤلفه دورانی در سازه‌های ۴، ۸، ۱۲، ۱۶ و ۲۰ طبقه به ترتیب ۴/۳، ۸/۲، ۳/۴، ۶/۱ و ۶/۱ درصد در جهت αR_{max} ، مقادیر حداکثر برش طبقات را افزایش می‌دهد.

۳-۵- جمع بندی

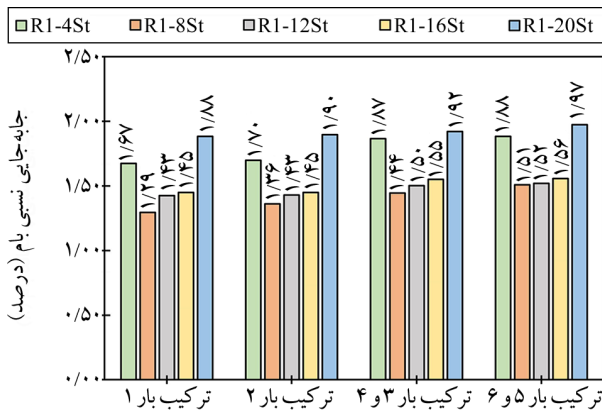
در قسمت قبل به بررسی پاسخ‌های شتاب، جابه‌جایی نسبی، خمش و برش طبقات سازه‌ها پرداخته شد. نشان داده شد که در طبقات مختلف مؤلفه دورانی زلزله می‌تواند در نتایج پاسخ‌های سازه‌ها تأثیرگذار باشد. در این قسمت برای مقایسه بیشتر و جمع‌بندی در مورد اثر مؤلفه‌های دورانی بر عملکرد سیستم‌های دیوار پایه-گهواره‌ای به بررسی پاسخ‌های جابه‌جایی نسبی پسماند بام، جابه‌جایی نسبی حداکثر بام و نسبت تنش حداکثر ایجاد شده در تاندون‌ها پرداخته شده است.

در شکل (۱۳) به بررسی جابه‌جایی نسبی پسماند بام سازه‌های مختلف تحت ترکیب بارهای لرزه‌ای مختلف پرداخته شده است. مقدار حداکثر جابه‌جایی نسبی پسماند برابر با ۰/۰۱۰۹ درصد (در سازه ۲۰ طبقه) است. به‌طور کلی می‌توان گفت که این مقدار جابه‌جایی پسماند در مقابل مقادیر جابه‌جایی حداکثر بام و نیز سیستم‌های متداول سازه‌ای قابل صرف‌نظر است. با این اوصاف می‌توان گفت این سیستم تحت مجموعه بارگذاری‌های لرزه‌ای افقی و دورانی می‌تواند مرکزگرا عمل نماید. مطابق شکل (۱۳)، با افزایش ارتفاع (به‌استثناء سازه ۴ طبقه تحت مؤلفه افقی به همراه مؤلفه دورانی)، جابه‌جایی پسماند افزایش می‌یابد. در نظر گرفتن مؤلفه دورانی در سازه‌های ۴، ۸، ۱۲، ۱۶ و ۲۰ طبقه به ترتیب ۶۲۳، ۷۰، ۷۵، ۳۷ و ۶۶ درصد در جهت αH_{max} ، مقادیر جابه‌جایی نسبی پسماند بام را افزایش می‌دهد. همچنین در نظر گرفتن مؤلفه دورانی در سازه‌های ۴، ۸، ۱۲، ۱۶ و ۲۰ طبقه به ترتیب ۳۲۲، ۳۰،



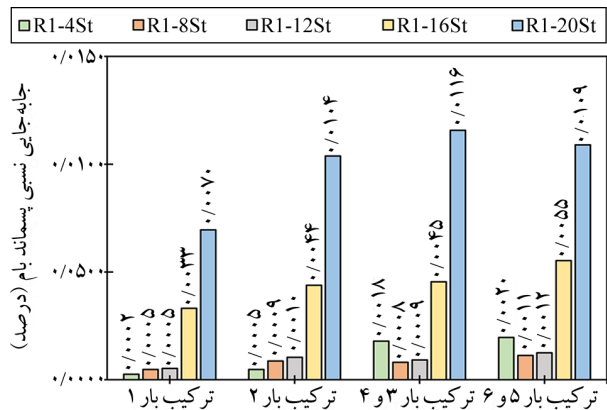
شکل (۱۲): مقایسه میانگین حداکثر برش دیوار تحت شتاب‌نگاشت‌های لرزه‌ای در دیوار سازه‌ها.

تنش حداکثر تاندون‌ها را افزایش می‌دهد. همچنین در نظر گرفتن مؤلفه دورانی در سازه‌های ۴، ۸، ۱۲، ۱۶ و ۲۰ طبقه به ترتیب ۱۰، ۷، ۸، ۱۱ و ۱۰ درصد در جهت αR_{max} ، مقادیر نسبت تنش حداکثر تاندون‌ها را افزایش می‌دهد.

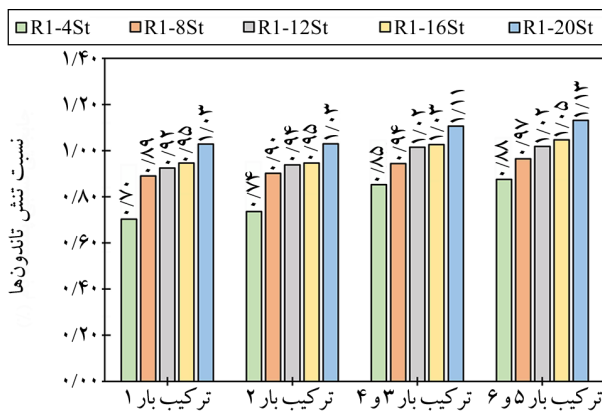


شکل (۱۴): نمودارهای میله‌ای جابه‌جایی نسبی بام تحت ترکیب بارهای لرزه‌ای مورد بررسی.

۲۰، ۲۶ و ۵ درصد در جهت αR_{max} ، مقادیر جابه‌جایی نسبی پسماند بام را افزایش می‌دهد. همان‌طور که نشان داده شده است، مؤلفه‌های دورانی در جهت αH_{max} ، مقادیر جابه‌جایی پسماند بیشتری در سیستم ایجاد می‌کنند.



شکل (۱۳): نمودارهای میله‌ای جابه‌جایی نسبی پسماند بام.



شکل (۱۵): نمودارهای میله‌ای نسبت تنش تاندون تحت ترکیب بارهای لرزه‌ای مورد بررسی.

۴- نتیجه‌گیری

سازه‌های دیوار پایه-گهواره‌ای مرکزگرا جزو سیستم‌های نوین لرزه‌ای محسوب می‌شوند. ویژگی اصلی این سیستم‌ها برگشت‌پذیری بعد از زلزله و همچنین متمرکز کردن آسیب در اعضای فیوز قابل تعویض است. این سیستم‌ها در طول عمر بهره‌برداری خود، ممکن است تحت بارهای احتمالی جانبی از جمله زلزله قرار گیرند. در تحقیقات مختلف اثر مؤلفه‌های افقی زلزله بر این سیستم‌ها بررسی شده است، در صورتی که از مؤلفه

در شکل (۱۴) به بررسی جابه‌جایی نسبی بام سازه‌های مختلف تحت ترکیب بارهای لرزه‌ای مختلف پرداخته شده است. مقدار حداکثر جابه‌جایی نسبی بام برابر با ۱/۹۷ درصد (در سازه ۲۰ طبقه) است. مطابق شکل (۱۴)، با افزایش ارتفاع (به‌استثنای سازه ۴ طبقه در تمامی ترکیب بارها)، جابه‌جایی حداکثر نسبی بام افزایش می‌یابد. در نظر گرفتن مؤلفه دورانی در سازه‌های ۴، ۸، ۱۲، ۱۶ و ۲۰ طبقه به ترتیب ۱۱، ۱۱، ۶، ۸ و ۲ درصد در جهت αH_{max} ، مقادیر حداکثر جابه‌جایی نسبی بام را افزایش می‌دهد. همچنین در نظر گرفتن مؤلفه دورانی در سازه‌های ۴، ۸، ۱۲، ۱۶ و ۲۰ طبقه به ترتیب ۱۱، ۱۱، ۶، ۸ و ۲ درصد در جهت αR_{max} ، مقادیر حداکثر جابه‌جایی نسبی بام را افزایش می‌دهد.

در شکل (۱۵) به بررسی نسبت تنش حداکثر تاندون به تنش تسلیم سازه‌های مختلف تحت ترکیب بارهای لرزه‌ای مختلف پرداخته شده است. مقدار نسبت تنش حداکثر تاندون‌ها برابر با ۱/۱۳ درصد (در سازه ۲۰ طبقه) است. مطابق شکل (۱۵)، با افزایش ارتفاع، نسبت تنش حداکثر تاندون‌ها افزایش می‌یابد. در نظر گرفتن مؤلفه دورانی در سازه‌های ۴، ۸، ۱۲، ۱۶ و ۲۰ طبقه به ترتیب ۲۱، ۶، ۱۰، ۸ و ۸ درصد در جهت αH_{max} ، مقادیر نسبت

دورانی زلزله صرف نظر شده است.

۱۰/۴ درصد افزایش یافته است.

- حداکثر برش دیوار برای تمامی سازه‌ها با در نظر گرفتن مؤلفه دورانی با زاویه αH_{max} و αR_{max} به ترتیب به مقدار ۹/۶ و ۸/۲ درصد افزایش یافته است.

- جابه‌جایی‌های نسبی پسماند سازه‌های پایه-گهواره‌ای مورد بررسی قابل صرف نظر است. با این وجود، با افزایش ارتفاع طبقات، مقدار دررفت پسماند افزایش می‌یابد. به طوری که حداکثر دررفت بام برای تمامی سازه‌ها (به جز سازه ۴ طبقه با توجه به مقادیر بالای آن) با در نظر گرفتن مؤلفه دورانی با زاویه αH_{max} و αR_{max} به ترتیب به مقدار ۷۵ و ۳۰ درصد افزایش یافته است.

- مؤلفه دورانی زلزله، حداکثر جابه‌جایی نسبی بام تحت شتاب‌نگاشت‌های نزدیک گسل را افزایش می‌دهد، به طوری که حداکثر جابه‌جایی نسبی بام برای تمامی سازه‌ها با در نظر گرفتن مؤلفه دورانی با زاویه αH_{max} و αR_{max} به ترتیب به مقدار ۱۲ و ۱۱ درصد افزایش یافته است.

- تنش‌های ایجاد شده در کابل‌های دیوار پایه-گهواره‌ای نسبت به تنش تسلیم (به جز سازه ۲۰ طبقه) تحت مؤلفه‌های افقی زلزله، کمتر از ۱ بودند. ولی در بیشتر سازه‌ها در نظر گرفتن مؤلفه دورانی باعث افزایش نسبت تنش در کابل‌ها شده است؛ به طوری که نسبت تنش حداکثر تاندون‌های کلیه سازه‌ها با در نظر گرفتن مؤلفه دورانی با زاویه αH_{max} و αR_{max} به ترتیب به مقدار ۱۶ و ۱۱ درصد افزایش یافته است. با افزایش ارتفاع طبقات، مقادیر نسبت تنش حداکثر تاندون‌ها افزایش یافته است.

مراجع

- Masrom, M.A. and Hamid, N.H.A. (2020) Review on the rocking wall systems as a self-centering mechanism and its interaction with floor diaphragm in precast concrete structures. *Lat. Am. J. Solids Struct.*, 17(6).
- Mohammadi Dehcheshmeh, E. and Broujerdian, V. (2021) Seismic Design Coefficients of Self-Centering Multiple Rocking Walls Subjected to Effect of Far and Near-Field Earthquakes. *Civ.*

در این تحقیق اثر مؤلفه افقی به همراه مؤلفه دورانی با توجه به تأثیرگذار بودن در پاسخ‌های سازه، مورد بررسی قرار گرفته است. این موضوع برای درک بهتر از رفتار این سیستم‌ها و قضاوت مهندسی آنها می‌تواند مورد توجه قرار گیرد. در ابتدا فرآیند مدل‌سازی عددی سیستم‌های گهواره‌ای صحت‌سنجی شد. سپس روش طراحی بر اساس جابه‌جایی [۳۵] تحت شتاب‌نگاشت‌های مختلف، مورد بررسی قرار گرفته است. شش ترکیب بار لرزه‌ای برای لحاظ اثر مؤلفه دورانی و زاویه اعمال رکورد به سازه در نظر گرفته شده است. زاویه اعمال رکورد به دو صورت؛ ۱) زاویه حداکثر مؤلفه افقی یا زاویه عمود بر گسل (αH_{max}) و ۲) زاویه حداکثر مؤلفه دورانی زلزله (αR_{max}) در نظر گرفته شده است. مدل‌ها در نرم‌افزار OpenSees ساخته شده است. سازه‌های ۴، ۸، ۱۲، ۱۶ و ۲۰ طبقه پایه-گهواره‌ای مورد ارزیابی لرزه‌ای قرار گرفته است. خلاصه نتایج و نکات حاصل از این تحقیق به صورت زیر قابل اشاره است:

- روش طراحی بر اساس جابه‌جایی [۳۵] برای سازه‌های ۴ و ۲۰ طبقه پایه-گهواره‌ای مرکزگرا، تحت شتاب‌نگاشت‌های تحت رکوردهای لرزه‌ای نزدیک گسل دارای پالس، بر اساس معیار دررفت نسبی ماکزیمم، نتایج مطلوبی به دست نمی‌دهد؛ به طوری که دررفت‌های سازه‌های ۴ و ۲۰ طبقه از حد مجاز طراحی تجاوز می‌کند.

- با در نظر گرفتن مؤلفه دورانی زلزله، شتاب‌های طبقات، جابه‌جایی‌های نسبی طبقات، خمش و برش دیوار افزایش می‌یابد.

- حداکثر شتاب برای تمامی سازه‌ها با در نظر گرفتن مؤلفه دورانی با زاویه αH_{max} و αR_{max} به ترتیب به مقدار ۱۲/۹ و ۲۴/۶ درصد افزایش یافته است.

- حداکثر جابه‌جایی نسبی برای تمامی سازه‌ها با در نظر گرفتن مؤلفه دورانی با زاویه αH_{max} و αR_{max} به ترتیب به مقدار ۵/۸ و ۹/۳ درصد افزایش یافته است.

- حداکثر خمش دیوار برای تمامی سازه‌ها با در نظر گرفتن مؤلفه دورانی با زاویه αH_{max} و αR_{max} به ترتیب به مقدار ۹/۹ و

- Performance of Self-Centering Structural Walls Incorporating Energy Dissipators. *J. Struct. Eng.*, **133**(11), 1560-1570, doi: 10.1061/(ASCE)0733-9445(2007)133:11(1560).
13. Holden, T., Restrepo, J., and Mander, J.B. (2003) Seismic Performance of Precast Reinforced and Prestressed Concrete Walls. *J. Struct. Eng.*, **129**(3), 286-296, doi: 10.1061/(ASCE)0733-9445(2003)129:3(286).
 14. Perez, F.J., Pessiki, S., and Sause, R. (2004) Seismic design of unbonded concrete walls with vertical joint connectors. *PCI Journal*, **49**(1), 58-79, doi: 10.15554/pcij.01012004.58.79.
 15. Henry, R.S., Aaleti, S., Sritharan, S., and Ingham, J.M. (2010) Concept and finite-element modeling of new steel shear connectors for self-centering wall systems. *J. Eng. Mech.*, **136**(2), 220-229, doi: 10.1061/(ASCE)EM.1943-7889.0000071.
 16. Henry, R.S., Brooke, N.J., Sritharan, S., and Ingham, J.M. (2012) Defining concrete compressive strain in unbonded post-tensioned walls. *ACI Struct. J.*, **109**(1), 101-112.
 17. Henry, R.S., Sritharan, S., and Ingham, J.M. (2016) Finite element analysis of the PreWEC self-centering concrete wall system. *Eng. Struct.*, **115**, 28-41, doi: 10.1016/j.engstruct.2016.02.029.
 18. Henry, R.S., Sritharan, S., and Ingham, J.M. (2016) Residual drift analyses of realistic self-centering concrete wall systems. *Earthq. Struct.*, **10**(2), 409-428, doi: 10.12989/eas.2016.10.2.409.
 19. Smith, B.J. and Kurama, Y.C. (2014) Seismic design guidelines for solid and perforated hybrid precast concrete shear walls. *PCI Journal*, **59**(3), 43-59, doi: 10.15554/pcij.06012014.43.59.
 20. Smith, B.J., Kurama, Y.C., and McGinnis, M.J. (2015) Perforated hybrid precast shear walls for seismic regions. *ACI Struct. J.*, **112**(3), 359-370, doi: 10.14359/51687410.
 21. Mpampatsikos, V.M., Bressanelli, E., Belleri, A., and Nascimbene, R.A. (2020) Non-dimensional parametric approach for the design of PT tendons and mild steel dissipaters in precast rocking walls. *Eng. Struct.*, **212**, p. 110513.
 22. Gu, A., Zhou, Y., Xiao, Y., Li, Q., and Qu, G. (2019) Experimental study and parameter analysis *Infrastruct. Res.*, **7**(1) (in progress), doi: 10.22091/cer.2021.7025.1257.
 3. Broujerdian V. and Mohammadi Dehcheshmeh, E. (2021) Investigation of the Behavior of Self-Centering Base- and Double- Rocking Walls Subjected to Far-Field and Near-Field Earthquakes. *Ferdowsi Civ. Eng.*, doi: 10.22067/jfeci.2021.68094.1008.
 4. Broujerdian, V. and Mohammadi Dehcheshmeh, E. (2022) Locating the rocking section in self-centering bi-rocking walls to achieve the best seismic performance. *Bull. Earthq. Eng.*, doi: 10.1007/s10518-022-01325-y.
 5. Mohammadi Dehcheshmeh, E. and Broujerdian, V. (2022) Determination of optimal behavior of self-centering multiple-rocking walls subjected to far-field and near-field ground motions. *J. Build. Eng.*, p. 103509, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2021.103509>.
 6. Perez, F.D.J. (1998) *Lateral Load Behavior and Design of Unbonded Post-Tensioned Precast Concrete Walls with Ductile Vertical Joint Connectors*.
 7. Eatherton, M.R., Ma, X., Krawinkler, H., Mar, D., Billington, S., Hajar, J.F., and Deierlein, G.G. (2014) Design concepts for controlled rocking of self-centering steel-braced frames. *Journal of Structural Engineering*, **140**(11), p. 4014082.
 8. Aghagholizadeh, M. and Makris, N. (2018) Seismic Response of a Yielding Structure Coupled with a Rocking Wall. *J. Struct. Eng.*, **144**(2), 04017196, doi: 10.1093/gbe/evr001.
 9. Wiebe, L. and Christopoulos, C. (2009) Mitigation of higher mode effects in base-rocking systems by using multiple rocking sections. *J. Earthq. Eng.*, **13**(1) SUPPL. 1, 83-108, doi: 10.1080/13632460902813315.
 10. Kurama, Y. and Pessiki, S. (1999) Seismic behavior and design of unbonded post-tensioned precast concrete walls. *PCI Journal*, **44**, 72-89.
 11. Kurama, Y.C. (2001) Simplified seismic design approach for friction-damped unbonded post-tensioned precast concrete walls. *ACI Struct. J.*, **98**(5), 705-716.
 12. Restrepo, J.I. and Rahman, A. (2007) Seismic

- Seismic analysis of cylindrical ground liquid storage tanks incorporating the effects of rotational components of earthquake. *Quranic Knowledge Research*, **18**(4), 251-264 (in Persian).
33. Loghman, V., Tajammolian, H., and Khoshnoudian, F. (2017) Effects of rotational components of earthquakes on seismic responses of triple concave friction pendulum base-isolated structures. *J. Vib. Control*, **23**(9), 1495-1517.
 34. Payganeh M.B. and Mortezaei, A. (2020) Seismic damage assessment of rc buildings subjected to the rotational ground motion records considering soil-structure interaction. *J. Rehabil. Civ. Eng.*, **8**(2), 62-80.
 35. Pennucci, D.G., Calvi, M., and Sullivan, T.J. (2009) Displacement-based design of precast walls with additional dampers. *J. Earthq. Eng.*, **13**(S1), 40-65.
 36. Khanmohammadi, M. and Heydari, S. (2015) Seismic behavior improvement of reinforced concrete shear wall buildings using multiple rocking systems. *Eng. Struct.*, **100**, 577-589, doi: 10.1016/j.engstruct.2015.06.043.
 37. Basu, D., Whittaker, A.S., and Constantinou, M.C. (2012) *Characterizing the Rotational Components of Earthquake Ground Motion*. MCEER.
 38. Newmark, N.M. (1969) *Torsion in Symmetrical Buildings*.
 39. Ghafory-Ashtiany, M. and Singh, M.P. (1986) Structural response for six correlated earthquake components. *Earthq. Eng. Struct. Dyn.*, **14**(1), 103-119.
 40. Falamarz-Sheikhabadi, M.R. and Ghafory-Ashtiany, M. (2012) Approximate formulas for rotational effects in earthquake engineering. *J. Seismol.*, **16**(4), 815-827.
 41. Falamarz-Sheikhabadi, M.R. (2014) Simplified relations for the application of rotational components to seismic design codes. *Eng. Struct.*, **59**, 141-152.
 42. Falamarz-Sheikhabadi, M.R., Zerva, A., and Ghafory-Ashtiany, M. (2017) Revised seismic intensity parameters for middle-field horizontal and rocking strong ground motions. *J. Struct. Eng.*, **143**(1), 4016155.
 43. Penzien, J. and Watabe, M. (1974) Characteristics on the seismic performance of self-centering hybrid reinforced concrete shear walls. *Soil Dyn. Earthq. Eng.*, **116**, 409-420.
 23. Hu, X., Lu, Q., and Yang, Y. (2018) Rocking Response Analysis of Self-Centering Walls under Ground Excitations. *Mathematical Problems in Engineering*, 1-12.
 24. Buddika, H.A.D.S. and Wijeyewickrema, A.C. (2016) Seismic Performance Evaluation of Posttensioned Hybrid Precast Wall-Frame Buildings and Comparison with Shear Wall-Frame Buildings. *J. Struct. Eng.*, **142**(6), doi: 10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0001466.
 25. Broujerdian, V. and Mohammadi Dehcheshmeh, E. (2021) Development of fragility curves for self-centering base-rocking walls subjected to far and near field ground motions. *Sharif J. Civ. Eng.*, doi: 10.24200/j30.2021.57279.2897.
 26. Lu, X., Yang, B., and Zhao, B. (2018) Shake-table testing of a self-centering precast reinforced concrete frame with shear walls. *Earthq. Eng. Eng. Vib.*, **17**(2), 221-233, doi: 10.1007/s11803-018-0436-y.
 27. Sun, T., Kurama, Y.C., Zhang, P., and Ou, J. (2018) Linear-elastic lateral load analysis and seismic design of pin-supported wall-frame structures with yielding dampers. *Earthq. Eng. Struct. Dyn.*, **47**(4), 988-1013, doi: 10.1002/eqe.3002.
 28. Al-Subaihawi, S. and Pessiki, S. (2019) Static pushover response of spring anchored unbonded post-tensioned rocking systems. *Eng. Struct.*, **200**, 109582.
 29. Vicencio, F. and Alexander, N.A. (2019) A parametric study on the effect of rotational ground motions on building structural responses. *Soil Dyn. Earthq. Eng.*, **118**, 191206.
 30. Özşahin, E. and Pekcan, G. (2019) Effect of torsional ground motion on the seismic response of highway bridges. *Bull. Earthq. Eng.*, **17**(5), 2603-2625.
 31. Sokol, M., Ároch, R., Lamperová, K., Marton, M., and García-Sanz-Calcedo, J. (2021) Parametric analysis of rotational effects in seismic design of tall structures. *Appl. Sci.*, **11**(2), 597.
 32. Teymoori, E., Abbasi, S., and Moradloo, J. (2018)

Post-Tensioned	۸- محل اتصال تاندون‌های PT
Unbonded	۹- بدون پیوند
Energy Dissipater (ED)	۱۰- جاذب‌های انرژی
Leaning Column	۱۱- ستون مکی
Single Station Procedure (SSP)	۱۲- گروه تک‌ایستگاهی
Multi Station Procedure (MSP)	۱۳- گروه چند ایستگاهی
Geodetic	۱۴- ژئودتیک
Primary Seismic Wave	۱۵- امواج P
Vertically Polarized Shear Wave	۱۶- امواج SH
Horizontally Polarized Shear Wave	۱۷- امواج SV
Normalization of Records	۱۸- شتاب‌نگاشت‌ها نرمالایز
Event Magnitude	۱۹- بزرگا
Distance to Source	۲۰- فاصله از گسل
Source Type	۲۱- نوع گسلش
Site Conditions	۲۲- جنس خاک

- of 3-dimensional earthquake ground motions. *Earthq. Eng. Struct. Dyn.*, **3**(4), 365-373.
44. Castellani, A. and Boffi, G. (1986) Rotational components of the surface ground motion during an earthquake. *Earthq. Eng. Struct. Dyn.*, **14**(5), 751-767.
45. Spudich, P., Steck, L.K., Hellweg, M., Fletcher, J.B., and Baker, L.M. (1995) Transient stresses at Parkfield, California, produced by the M 7.4 Landers earthquake of June 28, 1992: Observations from the UPSAR dense seismograph array. *J. Geophys. Res. Solid Earth*, **100**(B1), 675-690.
46. Laouami, N. and Labbe, P. (2002) Experimental analysis of seismic torsional ground motion recorded by the LSST-Lotung array. *Earthq. Eng. Struct. Dyn.*, **31**(12), 2141-2148.
47. Tajammolian, H. and Khoshnoudian, F. (2018) Acceleration amplification due to rotational components of near-fault earthquakes in triple concave friction pendulum base-isolated structures. *Can. J. Civ. Eng.*, **45**(4), 314-327.
48. Archila, M. (2014) *Directionality Effects of Pulse-Like Near Field Ground Motions on Seismic Response of Tall Buildings*. University of British Columbia.
49. FEMA (2009) *FEMA P695: Quantification of Building Seismic Performance Factors*. US Department of Homeland Security.
50. ASCE (2010) *Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures (ASCE/SEI 7-10)*.

واژه‌نامه

- ۱- مکانیسم نیروی بازگرداندگی Restoring Force Mechanism
- ۲- مکانیسم جذب انرژی Energy Dissipation Mechanism
- ۳- فرم بسته Closed-form
- ۴- دیوارهای پیش ساخته با ستون Precast Wall with End Columns (PreWEC) انتهای
- ۵- بدون بعد Non-Dimensional
- ۶- سطح زلزله DBE Design Basis Earthquake
- ۷- سطح زلزله MCE Maximum considered Earthquake

The Effects of Rotational Components of Near-Fault Earthquakes on Self-Centering Base-Rocking Walls

Esmaeil Mohammadi Dehcheshmeh¹ and Vahid Broujerdian^{2*}

1. Ph.D. Candidate in Earthquake Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran
2. Associate Professor, School of Civil Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran,
*Corresponding Author, email: broujerdian@iust.ac.ir

Nowadays, self-centering (SC) lateral resistant systems are able to reduce residual displacement and post-earthquake repairing costs. By concentrating damages on fuse elements, these systems reduce repair costs and allow immediate occupancy. To resist against lateral load, the SC systems have two mechanisms including: 1) restoring force mechanism, 2) energy dissipation (ED) mechanism. Both mechanisms are needed to provide flag shape pushover behavior. The restoring force mechanism provided with post-tensioned (PT) prestressed core to supply prestressed used unbounded tendons. The reason using unbounded tendons is to prevent their yielding suddenly and creating cracks in core. Usually, the restoring force mechanism is accompanied by gap opening in systems. This gap opening can cause damage to other structural and nonstructural members. Then, the system should be isolated in location of joints. The ED mechanism provided with fuses. Fuses can have different types, including: 1) hysteric, 2) viscous, and 3) shape memory alloy (SMA) dampers. Among these dampers, hysteric elements are more used due to their low price than other fuses. The SC systems implemented in different types, including: 1) rocking cores, or frames, 2) moment frames, and 3) braces. The moment frames and braces need specially detailing, and expert worker for building and construction. Furthermore, rocking frames needed total system rotated that is constructive details difficult. Among these systems, rocking cores have mostly been used and studied. The rocking cores are made with three cores of concrete shear wall, wooden wall and bracing frame.

According to seismic codes, lateral resistant system must have the necessary strength to withstand earthquakes. The records of earthquakes have three translational and three rotational components. Usually, the structures investigated under translational component and rotational component ignored. To produce the rotational component, there are two methods, including single station procedure (SSP) and multiple stations procedure (MSP) or geodetic method. The SSP method extracts the rotational components from the translational ones. In this method, many researchers employ the information of a single station individually to obtain the rotational components. In the MSP method, the rotational components use translational recorded data by the numerous ground motions distributed in a closely dense zone. Utilizing this method requires a vast range of information of many ground motions, which was unreachable for the authors of this manuscript. Therefore in this research, to produce the rotational components of ground motions use SSP method. Furthermore, near-fault ground motions were considered for time history analysis. Near-field ground motions have some characterizations that make them different from far-field ground motions. The most remarkable characterization of these records includes: 1) distance less than 10 km from the fault, 2) the existence of long-period pulses in their velocity time series, 3) high Peak Ground Acceleration (PGA), and 4) high Peak Ground Velocity (PGV).

In current study, the behavior of SC base-rocking walls under 25 near pulse-like ground motions was investigated. The structures were studied in two states depending on considering or ignoring the rotational component of the ground motions. In order to compare and consider the rotational components, six seismic load combinations were considered. 2D frames of 4-, 8-, 12-, 16-, and -20 stories were examined. Nonlinear time-history analyses were performed utilizing software. The results showed that considering the rotational component of earthquake can increase structural responses. In this regard, the maximum acceleration, inter-story drift, moment, shear force, roof drift and maximum tendon stress ratio were increased up to 24.6, 9.3, 10.4, 9.6, 623 and 11%, respectively.

Furthermore, the results suggested that as the height of the structure increases, the response values of maximum roof drifts and maximum stress ratio increase. In SC base-rocking wall systems studied, the maximum residual roof drift was equal to 0.01 %.

Keywords: Self-Centering Systems, Rocking Wall, Near-Fault, Rotational Component, Nonlinear Dynamic Analysis.