

بررسی اثر اندرکنش خاک - سازه بر پاسخ تغییر مکان سیستم مهاربند ستون فقراتی تحت زلزله‌های حوزه‌ی دور و نزدیک

مهدیس تقی‌زاده^۱، مجید قلهکی^{۲*}، امید رضایی‌فر^۳

۱. دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران.

۲. دانشیار دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران.

۳. دانشیار دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران.

*mgholhaki@semnan.ac.ir

تاریخ پذیرش ۱۳۹۹/۰۹/۰۱

۱۳۹۸/۱۱/۲۴

تاریخ دریافت

چکیده

در سالیان گذشته پژوهشگران برای بررسی رفتار سیستم قاب مهاربندی شده ایده‌های مختلفی را مورد مطالعه و بررسی قرار دادند که یکی از این ایده‌ها مهاربند ستون فقراتی است. این نوع مهاربند، یک سیستم توسعه یافته نیرو-مقاوم لرزه‌ای است که با ثابت نگه داشتن مقدار جابه‌جایی نسبی بین طبقه‌ای، مانع ایجاد شکست طبقات می‌شود. این سیستم متشکل از اعضای قاب مهاربندی شده هم‌محور متعارف به همراه یک خرپای قوی است که هدف آن توزیع یکنواخت جابه‌جایی‌های نسبی طبقه در ارتفاع ساختمان است. خرپای قوی مانند یک ستون فقرات، مانع تمرکز آسیب در یک یا چند طبقه در قاب مهاربندی شده هم‌محور می‌شود. از طرفی، زلزله‌هایی که در حوزه نزدیک رخ می‌دهند، هم به لحاظ دامنه و هم به لحاظ محتوای فرکانسی با حرکات لرزه‌ای دور از گسل متفاوتند. بنابراین لازم است به بررسی و شناخت ویژگی‌ها و ماهیت رکوردهای نزدیک گسل و تاثیر آن روی سازه‌ها پرداخته شود. علاوه بر زلزله، خاک زیر سازه نیز می‌تواند تغییراتی را در پاسخ سازه ایجاد کند به ویژه اگر سازه روی خاک نرم ساخته شده باشد. به طور معمول در آیین‌نامه‌ها، روش‌هایی که برای تحلیل سازه‌ها در نظر گرفته شده‌اند با این فرض است که سازه روی بستر صلب قرار دارد حال آن‌که در واقعیت همیشه این‌طور نیست و نرم یا سخت بودن خاک زیر سازه تاثیر متفاوتی روی پاسخ آن خواهد داشت. بنابراین بهتر است بحث اندرکنش خاک-سازه در طراحی‌ها در نظر گرفته شود. در این مقاله، اثر خاک‌های مختلف پی با لحاظ اندرکنش خاک - سازه بر روی رفتار سیستم مهاربند ستون فقراتی تحت زلزله حوزه دور و نزدیک مورد بررسی قرار می‌گیرد. مدل‌های استفاده شده در این مقاله، شامل سازه‌های ۳، ۶ و ۱۲ طبقه با سه نمونه سیستم نیرو-مقاوم لرزه‌ای دارای پیکربندی مختلف در محل تقاطع مهاربندها به تیر است. دو نمونه خاک سخت و نرم در زیر این سازه‌ها به ترتیب دارای ویژگی‌های خاک تپ دو و چهار مطابق با استاندارد ۲۸۰۰ زلزله‌ی ایران ویرایش چهارم، مدل شده است. برای تحلیل این سازه‌ها، از روش تحلیل دینامیکی تاریخچه زمانی غیرخطی برای هفت شتاب‌نگاشت زلزله حوزه دور و هفت شتاب‌نگاشت زلزله حوزه نزدیک، در دو حالت پایه ثابت و پایه اندرکنشی، استفاده شده است. نتایج نشان می‌دهد که بیشینه تغییر مکان بام سازه‌های ۳، ۶ و ۱۲ طبقه در دهانه‌های ۱/۴، ۱/۳ و ۵/۱۲ در خاک‌های سخت (تپ ۲)، تحت هر دو زلزله‌ی دور و نزدیک با تغییرات ناچیز همراه است اما در خاک‌های نرم (تپ ۴) تحت زلزله‌های دور و نزدیک بین ۲/۹۳ تا ۱۸/۲۲ درصد افزایش می‌یابد. نسبت جابه‌جایی نسبی میان طبقه تحت زلزله‌های دور و نزدیک گسل در خاک سخت، در سازه‌های ۳ و ۶ طبقه افزایش ناچیز و در سازه‌ی ۱۲ طبقه تا ۶/۷۵ درصد کاهش داشته است. در خاک نرم همه سازه‌ها در حوزه نزدیک تا ۱۱/۶۷ درصد افزایش و در حوزه دور سازه‌های ۳ و ۶ طبقه تا ۴/۸۶ درصد کاهش و سازه ۱۲ طبقه تا ۷/۷۰ درصد

افزایش داشته است. همچنین نسبت جابه‌جایی نسبی پسماند سازه‌های ۳، ۶ و ۱۲ طبقه تحت میانگین زلزله‌های حوزه نزدیک، در خاک سخت تا ۸/۵۲ درصد کاهش و در خاک نرم تا ۳۶/۰۲ درصد افزایش داشته است.

واژگان کلیدی: سیستم ستون فقراتی، اندرکنش خاک - سازه، زلزله حوزه نزدیک، زلزله حوزه دور.

۱. ادبیات فنی موضوع

قاب‌های مهاربندی هم‌محور فولادی مرسوم، مستعد تشکیل طبقه نرم در طی زمین‌لرزه‌های قوی هستند [1]. با ایجاد طبقه نرم در ساختمان که منجر به تمرکز تغییر شکل در یک یا چند طبقه می‌شود، مهاربندها در این طبقات آسیب دیده و دچار گسیختگی زود هنگام و همچنین آسیب‌های سازه‌ای و غیرسازه‌ای بیشتری در این طبقات می‌شوند. این آسیب متمرکز، اثر $p-\Delta$ را تقویت کرده و به نوبه خود می‌تواند تغییر مکان‌های جانبی را در طبقه نرم افزایش دهد. طبقات نرم هم‌چنین باعث ایجاد تغییر مکان‌های پسماند قابل توجه می‌شوند که می‌توانند پرهزینه و یا غیر قابل تعمیر باشد. به همین ترتیب، باید برای جلوگیری کردن از تغییر شکل‌های متمرکز و آسیب در طبقات، توانایی قاب‌های مهاربندی هم‌محور را بالا برد.

پژوهشگران و مهندسان برای کاهش تمرکز آسیب و رسیدن به تغییر مکان پسماند کوچکتر، ایده‌های بسیاری را مورد بررسی قرار دادند. یکی از این ایده‌ها استفاده از مهاربندهای کمانش-ناپذیر بود. این نوع مهاربند به طور قابل توجه‌ای رفتار هیستریزس و ظرفیت اتلاف انرژی را در سطح اجزا بهبود می‌بخشد (چن و همکاران در سال ۲۰۰۱ [2]، ماهین و همکاران در سال ۲۰۰۴ [3]، لی و تی سی، در سال ۲۰۰۴ [4]). یکی دیگر از ایده‌ها، المان‌های مهاربند خود محور مهندسی شده است که در مقایسه با مهاربندهای کمانش‌ناپذیر، قابلیت اتلاف انرژی قابل توجه و حلقه‌های هیستریزس پرچمی شکل دارند (آیکن و

همکاران در سال ۱۹۹۲ [5]، مک کورمیک و همکاران در سال ۲۰۰۷ [6]، کریستوپولوس و همکاران در سال ۲۰۰۸ [7]، ترمبلی و همکاران در سال ۲۰۰۸ [8]، یانگ و همکاران در سال ۲۰۱۰ [9]. کیگینس و یوانگ ۱۱ در سال ۲۰۰۶ [10]، دریافتند که با استفاده از قاب خمشی و BRB_{12} ، تقاضای انعطاف پذیری و حداکثر جابه‌جایی نسبی طبقه حدود ۱۰ تا ۱۲ درصد کاهش می‌یابد. علاوه بر این، مطالعات سیستم قاب زیپر برای بهبود عملکرد این سیستم و توصیه‌های طراحی آن انجام شده است (سابلی ۱۳ در سال ۲۰۰۱ [11]، تیرکاء و ترمبلی در سال ۲۰۰۳ [12]، یانگ و همکاران در سال ۲۰۱۰ [13]). در بیشتر این مطالعات، نشان داده شده که ستون‌وار عمودی در ترکیب قاب مهاربندی شده زیپر با مهاربندهای کمانشی متعارف به ابعاد خیلی بزرگ برای جلوگیری از تسلیم نیاز دارد. لی و ماهین در سال ۲۰۱۴ [14]، یک سیستم جدید توسعه یافته‌ی نیرو-مقاوم در برابر زلزله به نام سیستم مهاربند ستون فقراتی را مورد بررسی قرار دادند. در این سیستم از یک خرپای عمودی اساسا الاستیک برای ایجاد تغییر شکل جانبی نسبتا یکنواخت در ارتفاع سازه استفاده شده است. آن‌ها متوجه شدند که سیستم پیشنهادی به طور موثری از ایجاد طبقه‌ی نرم در قاب مهاربندی شده جلوگیری می‌کند. این سیستم از قاب‌های زیپر، قاب‌های مهاربندی شده‌ی هم‌محور و یک خرپای قوی تشکیل شده است و تیرهای پیوند قائم در طول ارتفاع دهانه‌ی مهاربند شورون یا دو طبقه ضربدری در محل تقاطع مهاربندهای قطری قرار می‌گیرند. همانطور که در شکل (۱) نشان داده شده است، این سیستم از یک خرپای عمودی

8. Tremblay
9. Yang
10. Kiggins
11. Uang
12. Buckling Restrained Brace
13. Sabeli
14. Tirca

1. Chen
2. Mahin
3. Lai
4. Tsai
5. Aiken
6. McCormick
7. Christopoulos

ایجاد توزیع جابه‌جایی نسبی یکنواخت در سازه انجام داد و همچنین اثر زلزله‌های حوزه دور و نزدیک و زلزله‌های متوالی، روی این سیستم را بررسی کرد. او به این نتیجه رسید که در طراحی این سیستم، کنترل کمتر از ۰/۵ بودن نسبت تنش اجزا کافی نیست و باید محدودیت‌هایی در نسبت سختی مهاربندهای معمولی و اجزای ستون فقرات در نظر گرفته شود. او بیان نمود که نسبت سختی مهاربند ستون فقرات به مهاربند معمولی در هر طبقه باید بزرگتر مساوی با ۲/۵ و مقطع عضو زیپر ستون فقرات، برابر با همان مقطع عضو مهاربند ستون فقرات بدست آمده آن طبقه، در نظر گرفته شود.

برای بررسی آثار اندرکنش خاک - سازه و همچنین آثار زلزله حوزه دور و نزدیک بر رفتار سیستم‌های سازه‌ای، مطالعات زیادی صورت گرفته که در ادامه به خلاصه‌ای از این مطالعات و نتایج آن‌ها اشاره شده است. تریفوناک [۱۷] در سال ۲۰۰۰، مسئله اندرکنش خاک - سازه را در ۵۶ ساختمان تحت ۱۵ شتاب نگاشت ایالت کالیفرنیا، هم به روش تحلیلی و هم به روش تجربی مورد بررسی قرار داد. گاناینی و نگار [۲] در سال ۲۰۰۹، [۱۸]، عملکرد لرزه‌ای ساختمان‌های با سیستم قاب خمشی فولادی همراه با مدل اندرکنش خاک - سازه را مورد تحلیل و بررسی قرار دادند و نشان دادند که اندرکنش خاک - سازه بیشتر روی برش طبقات، ممان طبقات و تغییرشکل‌های اجزای سازه‌ای اثر می‌گذارد. کیم و روست [۳] در سال ۲۰۰۴، [۱۹]، مطالعاتی روی آثار رفتار غیرخطی خاک بر پاسخ غیرخطی سازه‌ها داشته‌اند. بهنام‌فر و همکاران در سال ۲۰۱۶ [۲۰]، تاثیر نوع خاک تکیه‌گاهی و فاصله تا ساختمان مجاور بر فرکانس طبیعی و نسبت میرایی یک ساختمان را مورد بررسی قرار دادند و اثر خاک را با استفاده از فنرها و میراگرهای متمرکز در تراز پی مدل‌سازی کردند و دریافتند که مدل دینامیکی پیشنهاد شده می‌تواند با دقت خوبی مقادیر مشخصه دینامیکی سازه‌های مورد بررسی را پیش‌بینی کند. میرزایی و همکاران در سال ۲۰۱۷ [۲۱]، تجزیه و تحلیل احتمالی آثار اندرکنش خاک - سازه روی عملکرد لرزه‌ای ساختمان‌ها را بررسی کردند. بلول و همکاران در سال ۲۰۱۸ [۲۲]، تاثیر

مداوم تشکیل شده که در طول سطح تحریک، الاستیک باقی مانده و منجر به یک ستون فقرات الاستیک می‌شود که تغییرشکل جانبی نسبتاً یکنواختی را در ارتفاع سازه به وجود می‌آورد. آن‌ها سه مدل مختلف از سیستم مهاربند ستون فقراتی را که در نوع مهاربندهای با طول بلندتر با یکدیگر تفاوت داشته‌اند در نظر گرفتند و پاسخ آن‌ها را با نمونه‌ای از قاب‌های مهاربندی شده معمولی مقایسه کردند. مهاربند شورون و مهاربند دو طبقه ضربدری به عنوان نماینده‌ای از پیکربندی‌های رایج انتخاب شد و از هر دو مهاربند معمولی و کمانش‌ناپذیر برای دهانه‌ی ستون فقراتی استفاده شد. در یکی از نمونه‌ها، هسته‌های فولادی برای مهاربندهای کمانش‌ناپذیر، از فولاد با مقاومت تسلیم کم ساخته شد.

شکل ۱. مقایسه‌ی تغییر مکان‌های نسبی قاب مهاربندی شده هم محور [۱۴]

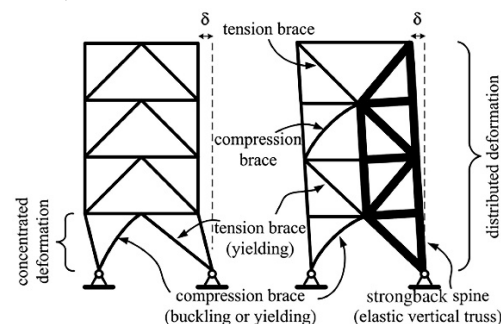


Fig. 1. Comparison of concentrically braced frame drifts [14]

باربارا و همکاران در سال ۲۰۱۸ [۱۵]، یک آزمایش چرخه‌ای روی یک نمونه تقریباً تمام مقیاس دو طبقه انجام دادند که در آن از مهاربند ستون فقراتی به عنوان سیستم لرزه‌ای استفاده شده بود. سیستم طراحی شامل یک خرپای غیرالاستیک با استفاده از مهاربند کمانش‌ناپذیر برای اتلاف انرژی ورودی لرزه‌ای و یک خرپای عمودی الاستیک برای کنترل رفتار طبقه‌ی ضعیف است. آن‌ها نشان دادند که سیستم مهاربند ستون فقراتی در کاهش رفتار طبقه ضعیف موفق عمل کرده است. تورانی و همکاران در سال ۲۰۲۰ [۱۶]، مطالعاتی را در رابطه با پیدا کردن مبانی جامع و مناسب برای طراحی سیستم مهاربند ستون فقراتی برای الاستیک ماندن خرپای ستون فقرات در سه نوع پیکربندی مختلف و نهایتاً

الاستیسیته در این فولادها برابر ۲۱۰۰۰۰ مگاپاسکال و نسبت پواسون برابر ۰/۳ در نظر گرفته شده است. ابعاد و مقاطع استفاده شده در مدل سازی مهاربند ستون فقراتی در شکل (۲) قابل مشاهده است.

برای اعتبار سنجی مدل ها، تحلیل استاتیکی غیرخطی با کنترل تغییر مکان و با توزیع مثلثی نیرو طبق بند ۳-۱۰ آیین نامه طراحی ساختمان ها در برابر زلزله (استاندارد ۲۸۰۰) ویرایش چهارم انجام گرفته است. در این روش، بار اعمالی به قاب به تدریج افزایش یافته تا آن جاکه تغییر مکان نقطه کنترل (مرکز جرم بام) به مقدار مورد نظر برسد. پس از تحلیل، جابه جایی طبقه ی بام به همراه برش پایه ایجاد شده، از نرم افزار استخراج و به صورت نمودار برش پایه - تغییر مکان ترسیم شد. سپس این نمودار با نمودار بار افزون مدل نرم افزار OpenSees مقایسه شد (شکل ۳). همان گونه که در شکل (۳) مشاهده می شود، نمودارها به لحاظ سختی، تغییر مکان نهایی و مقاومت تسلیم شدگی با یکدیگر هماهنگی خوبی دارند. شکستگی های ایجاد شده در قسمت جاری شدگی نمودارها نشانگر کماتش برخی از بادبندی هاست. معیار پذیرش مهاربندهای با طول کوتاه تر در این سیستم این است که کماتش نکنند. بنابراین طبق مبانی طراحی در نظر گرفته شده، این مهاربندها کماتش نکرده و الاستیک باقی مانده اند و مهاربندهایی که طول بلندتری دارند جاری شده اند.

همان گونه که در شکل (۳) مشاهده می شود، در نمودار OpenSees و SAP2000 تنش تسلیم به ترتیب برابر ۵۶۳۲/۱۲ و ۵۳۴۵/۳۰ کیلونیوتن است که درصد خطای آن نسبت به مدل OpenSees برابر ۵/۱ درصد است. تنش نهایی به ترتیب برابر ۵۷۰۱/۰۳ و ۵۵۱۱/۵۴ کیلونیوتن است که درصد خطای آن ۳/۳ درصد است. همچنین سختی اولیه دو نمودار به ترتیب ۰/۶۵۱ و ۰/۵۹۲ کیلونیوتن بر میلی متر و درصد خطای آن برابر ۹/۱ درصد است.

علاوه بر این، برای درستی آزمایی اندرکنش خاک - سازه به روش مخروطی در نرم افزار SAP2000، ابتدا طبق تیب بندی آیین نامه طراحی ساختمان ها در برابر زلزله استاندارد ۲۸۰۰ ایران (ویرایش چهارم) [25]، دو نمونه خاک تیب ۲ و ۴، انتخاب شده

اندرکنش خاک - سازه بر سیستم دیوار برشی فولادی با ورق نازک تحت اثر زلزله های حوزه دور و نزدیک را بررسی کرد و نتیجه گرفت که نسبت برش به وزن موثر تجمعی طبقات در خاک های سخت تر، تحت هر دو زلزله دور و نزدیک با تغییرات ناچیز همراه است اما در خاک های نرم تر، این نسبت کاهش می یابد.

گرامی و عبدالله زاده در سال ۲۰۱۲ [23]، تأثیر جهت پذیری پیش رونده در طیف طراحی ارائه شده با آیین نامه های طرح لرزه ای در فواصل مختلف نزدیک گسل بررسی نمود و ۱۶۲ نگاشت زلزله را مورد تجزیه و تحلیل قرار دادند. مطالعات آن ها نشان داد که جهت پذیری پیش رونده، اثر زیادی بر طیف پاسخ طراحی در حوزه نزدیک گسل دارد و موجب افزایش بخش دوره تناوب بالاتر طیف می شود. حسنی و همکاران در سال ۲۰۱۸ [24]، آثار اندرکنش خاک و سازه بر روی نسبت تغییر مکان غیرالاستیک سازه های تخریب شده را بررسی کردند و مشاهده نمودند که به طور کلی اندرکنش خاک - سازه نسبت تغییر مکان غیرالاستیک را به جز در ساختمان هایی با دوره خیلی کوتاه، افزایش می دهد.

با توجه به مطالعات و تحقیقات صورت گرفته پیشین، نتایج نشان داد که مطالعاتی روی سیستم مهاربند ستون فقراتی تحت اثر خاک های مختلف پی با در نظر گرفتن اندرکنش خاک - سازه صورت نگرفته است. پس در این مقاله ابتدا دو تپ خاک ۲ و ۴ در زیر سازه ها در نظر گرفته شده و سپس سازه های مورد نظر در دو حالت پایه ثابت و پایه اندرکنشی، تحت زلزله های حوزه دور و نزدیک مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته اند.

۲. درستی آزمایی مدل سازی در نرم افزار

به منظور درستی آزمایی مدل سازی ها در نرم افزار، از مشخصات مدل مهاربند ستون فقراتی شش طبقه که توسط لی و ماهین [14]، در سال ۲۰۱۴، به وسیله نرم افزار OpenSees انجام شده بود، استفاده شده است. در این مدل از دو نوع فولاد برای مقاطع قوطی شکل و مقاطع I شکل استفاده شده است که به ترتیب دارای تنش تسلیم ۳۱۷ و ۳۴۵ مگاپاسکال هستند. مقدار مدول

شده است) مقایسه شد که نتایج آن در جدول (۱) قابل مشاهده است.

جدول ۱. مقایسه دوره تناوب اصلی سازه به دست آمده از نرم افزار SAP2000 و استاندارد ۲۸۰۰ زلزله ایران

Type 4 Soil		Type 2 Soil		model
T _{Regulations}	T _{SAP2000}	T _{Regulations}	T _{SAP2000}	
0.4757	0.4983	0.4564	0.4575	SBS 3-L/4
0.4565	0.4777	0.4305	0.4317	SBS 3-L/3
0.4297	0.4499	0.4067	0.4079	SBS 3-5L/12
0.7267	0.7362	0.6616	0.6631	SBS 6-L/4
0.7179	0.7205	0.6466	0.6481	SBS 6-L/3
0.6974	0.7012	0.6103	0.6117	SBS 6-5L/12
1.5765	1.5982	1.3368	1.3401	SBS 12-L/4
1.5678	1.5898	1.3264	1.3295	SBS 12-L/3
1.5544	1.5779	1.3023	1.3055	SBS 12-5L/12

Fig. 4. Comparison of the main period of structures obtained from SAP2000 software and Iranian earthquake standard NO.2800

همان گونه که از جدول (۱) مشخص است، زمان تناوب اصلی سازه به روش مخروطی در نرم افزار SAP2000 که در حالت پایه اندرکنشی به دست آمده، با دوره تناوب آیین نامه به روش زیرسازه تفاوت چندانی نداشته و قابل قبول است. بنابراین، توابع امیدانس به دست آمده از نرم افزار CONAN و چگونگی مدل سازی خاک به روش مخروطی در نرم افزار SAP2000 مناسب است.

۳. مبانی طراحی سیستم ستون فقراتی

مهاربند ستون فقراتی برای یکنواخت شدن جابه جایی نسبی طبقات و کاهش رفتار طبقه نرم در سازه طراحی شده است. البته مفهوم یکنواخت بودن یک مفهوم نسبی است و هرگز جابه جایی نسبی تمام طبقات یک سازه تحت زلزله، کاملاً یکسان و یکنواخت نخواهد بود. در طراحی هایی که به صورت معمول انجام می گیرد، معمولاً چگونگی توزیع جابه جایی نسبی طبقات کنترل نشده و این امر ممکن است باعث تمرکز جابه جایی نسبی در یک یا چند طبقه شود. با این حال، آیین نامه های لرزه ای محدودیت هایی را برای مقاومت و سختی طبقات در سازه ها در نظر گرفته اند، اما این محدودیت ها هم نمی تواند عدم تمرکز جابه جایی نسبی در سازه را تضمین کند. ولی می توان با رعایت مواردی، سازه را طوری طراحی کرد که تقریباً تمام طبقات جابه جایی نسبی های یکنواختی را تجربه کنند. طبق بررسی های انجام

و مشخصات آن ها وارد برنامه CONAN شده است تا توابع امیدانس خاک ها به دست آورده شود. سپس ضرایب سختی و میرایی به دست آمده برای هر نوع خاک، به نرم افزار SAP2000 معرفی شده و به سازه های مورد بررسی، اختصاص داده شده است.

شکل ۲. مشخصات مقاطع استفاده شده در مدل OpenSees [۱۴]

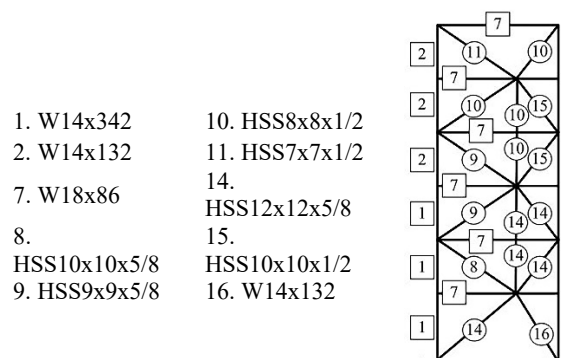


Fig. 2. Details of the strongback system in opensees model [14]

شکل ۳. مقایسه نتایج عددی نرم افزار SAP2000 با داده های نرم افزار مرجع OpenSees

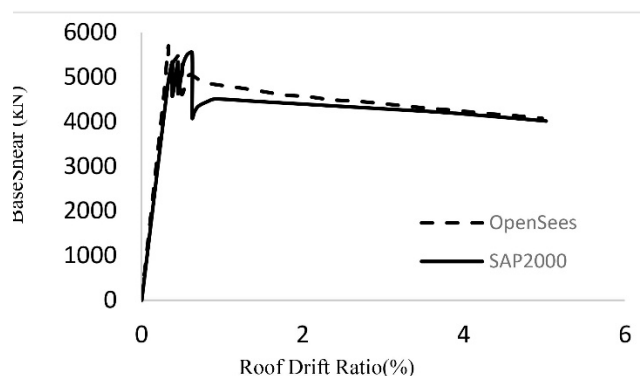


Fig. 3. Comparison of numerical results SAP2000 software with OpenSees software datas

نرم افزار CONAN یک برنامه ی تحلیلی سریع است که اطلاعات ورودی را به صورت فایل متنی دریافت کرده و در کمترین زمان ممکن، خروجی را به صورت فایل متنی ارائه می دهد. این برنامه می تواند برای محاسبه ضرایب سختی دینامیکی و یا حرکت ورودی موثر پی برای پی های سطحی و مدفون به کار برده شود. دوره تناوب اصلی این سازه ها در حالت تکیه گاه انعطاف پذیر که از نرم افزار به دست آمده، با دوره تناوب اصلی موثر سازه (که در پیوست پنجم استاندارد ۲۸۰۰ زلزله ی ایران ویرایش چهارم به دست آمده در حالتی که اندرکنش خاک - سازه در نظر گرفته

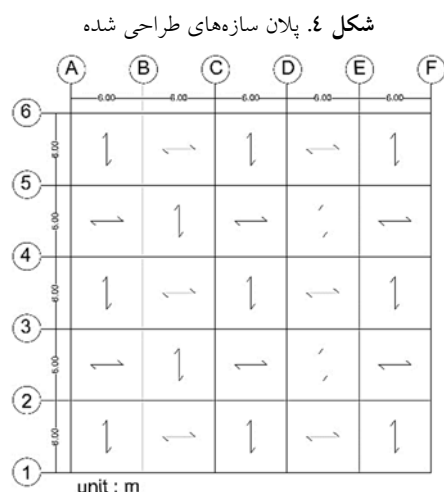


Fig. 4. Plan of Design Structures

شکل ۵. پیکربندی قاب‌های مورد مطالعه

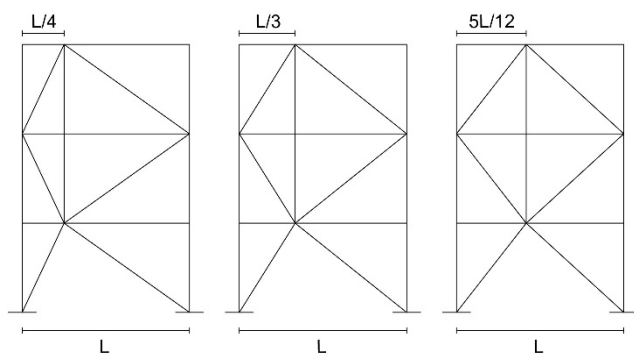


Fig. 5. Configuration the studied frames

ارتفاع طبقات ۳/۲ متر در نظر گرفته شده و کاربری ساختمان‌ها مسکونی است. شدت بار مرده طبقات، بار مرده بام، بار پارکینگ، بار زنده طبقات و بار زنده بام به ترتیب ۵۵۰، ۶۱۰، ۱۲۰، ۲۰۰ و ۱۵۰ کیلوگرم بر مترمربع در نظر گرفته شده است. سازه‌ها برای دو نمونه خاک تپ ۲ و چهار، براساس طبقه‌بندی استاندارد ۲۸۰۰ زلزله ایران ویرایش چهارم [25]، شتاب مبنای طرح ۰/۳۵ و ضریب اهمیت ۱ طراحی شده‌اند و با توجه به نتایج لی و ماهین [14]، ضریب رفتار سازه‌ها ۶ در نظر گرفته شده است. مصالح فرض شده برای مدل‌سازی و تحلیل از فولاد ST37 با تنش تسلیم ۲۴۰، تنش نهایی ۳۷۰ مگاپاسکال، مدول الاستیسیته ۲۱۰۰۰۰ مگاپاسکال و نسبت پواسون ۰/۳ در نظر گرفته شده است. برای تمام سازه‌ها میرایی برابر ۵ درصد در نظر گرفته شده است. منحنی تنش-کرنش فولاد به صورت نمودار دو خطی فرض شده است. با فرض وجود همسایه در اطراف، محیط پی برابر محیط ساختمان در نظر گرفته شده است. سازه‌های ۳، ۶ و

شده توسط لی و ماهین [14]، مشخص شد که روش طراحی مورد استفاده برای اعضای قسمت بالایی سیستم‌های ستون فقراتی کافی نیست و محدوده تسلیم خرابای ستون فقراتی نیز در این ترازها اتفاق می‌افتد. بنابراین، کنترل کمتر از ۰/۵ بودن نسبت تنش طراحی اجزای ستون فقراتی، کافی نبوده و برای یکنواخت شدن جابه‌جایی نسبی طبقات و جلوگیری از طبقه نرم، لازم است رابطه‌ای بین اجزای ستون فقراتی و مهاربندهای معمولی بدست آورده شود. تورانی در مطالعه خود روی سیستم مهاربند ستون فقراتی [16]، به این نتیجه رسید که باید محدودیت‌هایی در نسبت سختی مهاربندهای معمولی و اجزای ستون فقراتی در نظر گرفته شود. او بیان کرد که علاوه بر الاستیک ماندن اجزای ستون فقراتی در زلزله و کمتر از ۰/۵ بودن نسبت تنش طراحی در این اجزاء، باید نسبت سختی مهاربند الاستیک ستون فقراتی به مهاربند معمولی در هر طبقه، بزرگ‌تر مساوی با ۲/۵ در نظر گرفته شود و مقطع عضو زیپر و مهاربند ستون فقراتی در هر طبقه با هم یکسان باشند. در این سیستم ستون‌ها برای حداکثر نیروی قابل اعمال مهاربند و تیرها برای بار ثقلی طراحی می‌شوند. بنابراین، مدل‌های مورد نظر در این مقاله نیز با رعایت همین موارد برای خاک تپ ۲ و ۴ طراحی شده‌اند.

۴. فرضیات و مشخصات مدل‌ها

مطابق شکل (۴)، پلان مربع شکل با ۵ دهانه ۶ متری برای تحلیل سازه‌ها در نظر گرفته شده است. سیستم باربر جانبی که شامل مهاربندهای ستون فقراتی هستند در هر چهار جهت قرار دارند. مدل‌های مورد مطالعه شامل سازه‌های ۳، ۶ و ۱۲ طبقه با سه پیکربندی مختلف هستند که در محل تقاطع مهاربندها به تیر با سیستم مهاربند ستون فقراتی، باهم متفاوتند (شکل ۵). عرض خرابای ستون فقراتی طبق مطالعات لی و ماهین باید از نصف دهانه کمتر باشد. تورانی در مطالعات خود برای رسیدن به بهینه‌ترین حالت، محل تقاطع مهاربندها با تیر را در $\frac{1}{4}$ ، $\frac{1}{3}$ و $\frac{5}{12}$ طول تیر که همگی از نصف دهانه کمتر هستند، در نظر گرفت. بنابراین در این مقاله نیز این سه حالت برای تمام سازه‌های ۳، ۶ و ۱۲ طبقه در نظر گرفته شده است.

مشخصات آن‌ها قابل مشاهده است. این شتاب‌نگاشت‌ها براساس روش ذکر شده در بند ۲-۵-۳ استاندارد ۲۸۰۰ زلزله ایران ویرایش چهارم [25]، برای شهر تهران و خاک نوع ۲ و ۴ مقیاس-سازی شدند و طیف میانگین آن‌ها با طیف استاندارد آیین‌نامه مقایسه شد. طبق این بند، زوج شتاب‌نگاشت‌ها به روش زیر به مقیاس درآورده شدند:

۱. هر زوج شتاب‌نگاشت به مقدار حداکثر خود مقیاس شدند. بدین معنی که حداکثر شتاب در مولفه‌ای که دارای بیشینه بزرگ‌تری است، برابر با شتاب ثقل g شد.

۲. طیف پاسخ شتاب هر یک از زوج شتاب‌نگاشت‌های مقیاس شده با منظور کردن نسبت میرایی ۵ درصد تعیین شد.

۳. طیف‌های پاسخ هر زوج شتاب‌نگاشت با استفاده از روش جذر مجموع مربعات با یک‌دیگر ترکیب شده و یک طیف ترکیبی واحد برای هر زوج ساخته شد.

۴. هر زوج شتاب‌نگاشت چنان مقیاس شد که برای هر پریود در محدوده ۰.۲T الی ۱.۵T، مقدار متوسط طیف جذر مجموع مربعات مربوط به تمام زوج مولفه‌ها، بیش از ده درصد از $1/3$ برابر مقدار متناظر طیف طرح استاندارد کمتر نشود. T زمان تناوب اصلی ساختمان است.

۵. ضریب مقیاس تعیین شده در شتاب‌نگاشت‌های مقیاس شده در بند ۱ ضرب شد و در تحلیل دینامیکی مورد استفاده قرار گرفت.

در شکل (۶) طیف استاندارد آیین‌نامه ۲۸۰۰ زلزله ایران ویرایش چهارم و طیف پاسخ میانگین زلزله‌های حوزه نزدیک و دور انتخاب شده، برای خاک تیپ ۲ و ۴ قابل مشاهده است.

۱۲ طبقه بعد از بارگذاری، مطابق با آیین‌نامه AISC [26]، طراحی و با مبحث دهم مقررات ملی ساختمان (طرح و اجرای ساختمان‌های فولادی) [26] کنترل شدند. اتصالات تیر به ستون و اتصالات مهاربندها به صورت مفصلی و اتصالات پای ستون‌ها به صورت گیردار است. برای مقایسه دو حالت پایه ثابت و پایه اندرکنشی سیستم مهاربند ستون فقراتی، مدل‌های مورد نظر برای دو نمونه خاک تیپ ۲ و ۴ بر اساس طبقه‌بندی استاندارد ۲۸۰۰ زلزله ایران، طراحی شدند. مشخصات خاک‌های تیپ دو و چهار، در جدول (۲) قابل مشاهده است. در این جدول V_s سرعت موج برشی در خاک، ν نسبت پواسون، γ وزن مخصوص خاک، G مدول برشی و E مدول الاستیسیته خاک است. مشخصات این خاک‌ها ابتدا به نرم‌افزار CONAN معرفی شده و توابع امپدانس به‌دست آمده از آن، برای مدل‌سازی خاک زیر سازه در نرم‌افزار SAP2000 وارد شده است.

جدول ۲. مشخصات خاک مورد استفاده در تحلیل‌ها

V_s (m/s)	ν	γ (kg/m^3)	G (MPa)	E (MPa)	Soil
560	0.3	2100	659	1712	Type 2
150	0.4	1700	38	107	Type 4

Table 2. Soil characteristics used in the analyzes

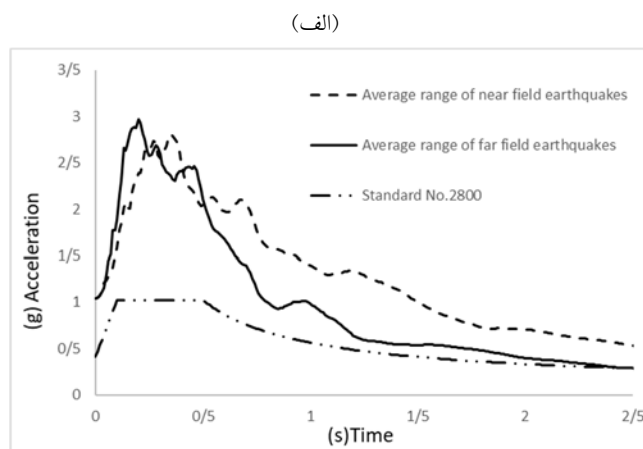
۵. تحلیل تاریخیچه زمانی غیرخطی مدل‌ها

برای ارزیابی نیازهای غیرخطی سازه‌ها، انتخاب شتاب‌نگاشت‌های مناسب در انجام تحلیل تاریخیچه زمانی غیرخطی، از اصلی‌ترین گام‌ها به شمار می‌رود. منظور از انتخاب شتاب‌نگاشت‌ها مناسب، در نظر گرفتن دو فاکتور مهم در انتخاب شتاب‌نگاشت‌ها، یعنی توجه به دور یا نزدیک بودن به گسل و تعداد شتاب‌نگاشت‌ها است. در این مقاله، برای انجام تحلیل‌های تاریخیچه زمانی غیرخطی از شتاب‌نگاشت‌های استخراج شده از سایت PEER [28]، استفاده شده است که هفت شتاب‌نگاشت برای حوزه نزدیک و هفت شتاب‌نگاشت برای حوزه دور انتخاب شده است. زلزله‌های دور از گسل در فاصله بیش از ۲۰ کیلومتر در نظر گرفته شده‌اند [16]. در جدول ۳ و ۴ اسامی و ایستگاه‌های مربوط به نگاشت‌های انتخابی حوزه نزدیک و دور و سایر

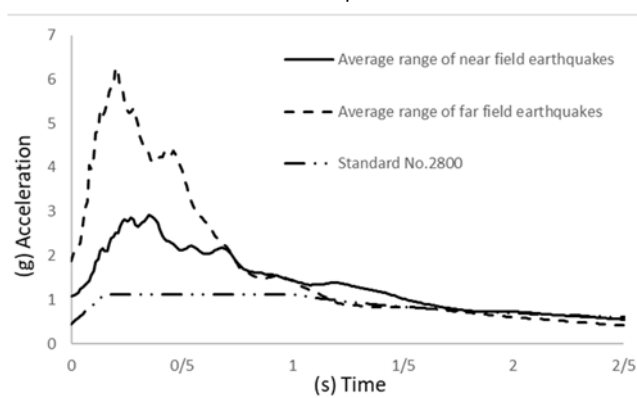
ستون فقراتی، عدد بعد از آن نشان دهنده تعداد طبقات و آخرین قسمت مربوط به محل تقاطع مهاربندها با تیر است. به عنوان نمونه SBS3-L/4 نشان دهنده مدل سه طبقه با سیستم مهاربند ستون فقراتی است که محل تقاطع مهاربندهای آن با تیر در $1/4$ طول تیر است.

در همه جداول درصد افزایش یا کاهش پارامترهای موردنظر در حالت پایه اندرکنشی نسبت به حالت پایه ثابت آورده شده است. چگونگی محاسبه اعداد به این گونه بوده است که ابتدا سازه‌های مورد نظر در نرم افزار SAP2000 یک بار در حالت پایه ثابت و بار دیگر در حالت پایه اندرکنشی تحت هفت زلزله حوزه دور و هفت زلزله حوزه نزدیک مورد تحلیل تاریخیچه زمانی دینامیکی قرار گرفته‌اند و نتایج هر کدام از آنها تحت هر یک از زلزله‌ها از برنامه استخراج شده است و بین نتایج مربوط به زلزله‌های حوزه نزدیک و دور میانگین گرفته شده و درصد افزایش یا کاهش با توجه به این میانگین‌ها در حالت پایه اندرکنشی نسبت به حالت پایه ثابت محاسبه شده و اعداد آن در جدول آورده شده است.

شکل ۶. مقایسه‌ی طیف میانگین زلزله‌های دور و نزدیک گسل با طیف استاندارد آیین نامه ۲۸۰۰ زلزله‌ی ایران ویرایش چهارم (الف) خاک تیپ دو (ب) خاک تیپ چهار



(الف)



(ب)

Fig. 6. Comparison of the average range of far and near earthquakes of faults with the standard range of 2800 Iranian earthquake regulations, fourth edition
a) Soil type 2 b) Soil type 4

۶. نتایج و بحث

به منظور ارزیابی لرزه‌ای رفتار سیستم مهاربند ستون فقراتی طراحی شده تحت اثر اندرکنش خاک - سازه براساس روش تحلیل دینامیکی تاریخیچه زمانی غیرخطی، در ابتدا مقادیر درصد تغییر حداکثر تغییر مکان بام کل سازه‌ها در حالت پایه اندرکنشی نسبت به حالت پایه ثابت، تحت میانگین زلزله‌های حوزه دور و نزدیک با دو تیپ خاک ۲ و ۴ همان‌گونه که در جداول (۵ و ۶) مشاهده می‌شود، محاسبه شده است. چگونگی نامگذاری مدل‌ها به این صورت است که کلمه SBS نمایانگر سیستم مهاربند

جدول ۳. زلزله‌های حوزه نزدیک انتخاب شده [۲۸]

No.	Name	Station	Year of occurrence	magnitude	d (km)	(m/s) V_s	PGA
1	Kocaeli - Turkey	Duzce	1999	7.51	13.60	281.86	0.364
2	Northridge - 01	N Hollywood-Coldwater can	1994	6.69	7.89	326.47	0.309
3	Imperial Valley	El Centro Array #4	1979	6.53	4.90	208.91	0.484
4	Chi-Chi	CHY 101	1999	7.62	9.94	258.89	0.398
5	Kobe - Japan	Port Island	1995	6.9	3.31	198.00	0.348
6	Landers	Coolwater	1992	7.28	19.74	352.98	0.417
7	LomaPrieta	Capitola	1989	6.93	15.23	288.62	0.511

Table 3. Selected near-field earthquakes [28]

جدول ۴. زلزله‌های حوزه دور انتخاب شده [۲۸]

No.	Name	Station	Year of occurrence	magnitude	d (km)	(m/s) V_s	PGA
1	Kocaeli - Turkey	Goynuk	1999	7.51	31.74	347.62	0.137
2	Northridge - 01	Glendale-Las Palmas	1994	6.69	21.64	371.07	0.365
3	Imperial Valley	Niland fire Station	1979	6.53	35.64	212.00	0.109
4	Chi-Chi	TAP095	1999	7.62	107.80	206.24	0.141
5	Kobe - Japan	Kakogawa	1995	6.9	22.50	312.00	0.324
6	Landers	Fort Irwin	1992	7.28	62.98	367.43	0.122
7	LomaPrieta	Gilroy Array	1989	6.93	22.68	333.85	0.323

Table 4. Selected far-field earthquakes [28]

تغییر مکان بام شده است. این افزایش در شتاب‌نگاشت‌های نزدیک گسل برای سازه‌های ۳ طبقه تا ۵/۵۲ درصد، سازه‌های ۶ طبقه تا ۷/۱۶ درصد و سازه‌های ۱۲ طبقه تا ۱۸/۲۲ درصد رسیده است. در شتاب‌نگاشت‌های دور از گسل برای سازه‌های ۳ طبقه تا ۳/۳۱ درصد، سازه‌های ۶ طبقه تا ۵/۰۶ درصد و سازه‌های ۱۲ طبقه تا ۱۲/۶۲ درصد افزایش را نشان می‌دهد.

تورانی و همکاران در مطالعات خود روی سیستم مهاربند ستون فقراتی، به این نتیجه رسیدند که بیشینه تغییر مکان بام

با توجه به جداول (۵ و ۶)، سازه‌های قرار گرفته روی خاک سخت (تیپ ۲) تحت شتاب‌نگاشت‌های نزدیک گسل با تغییرات ناچیز در بیشینه تغییر مکان بام همراه هستند و در شتاب‌نگاشت‌های دور از گسل نیز این تغییرات ناچیز بوده و برای سازه‌های ۳ طبقه تا ۰/۵۸ درصد افزایش، برای سازه‌های ۶ طبقه تا ۱/۰۴ درصد افزایش و برای سازه‌های ۱۲ طبقه تا ۱/۷۳ درصد کاهش داشته است. در سازه‌های واقع روی خاک نرم (تیپ ۴) تحت شتاب‌نگاشت‌های حوزه دور و نزدیک، اثر اندرکش خاک - سازه بیشتر به چشم می‌خورد و سبب افزایش مقادیر بیشینه

شکل ۷. مقادیر جابه‌جایی نسبی میان طبقه مدل SBS6-L/3، تحت زلزله‌های نزدیک گسل - خاک تیپ ۲، الف) پایه ثابت، ب) پایه اندرکنشی

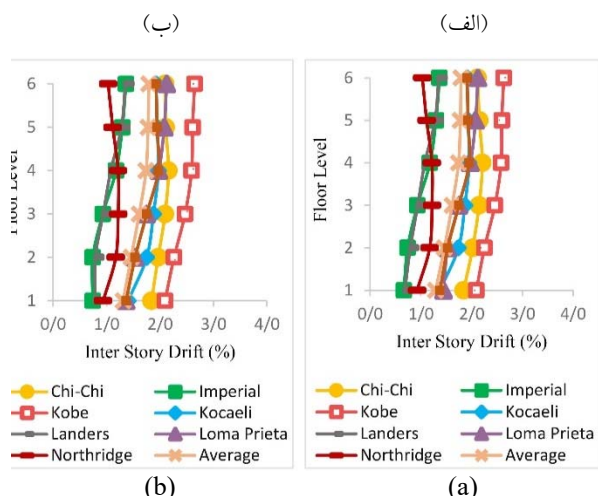


Fig. 7. Inter story drift values of SBS6-l/3 model, under the near-fault earthquake – type 2 soil, a) fix base b) interaction base

شکل ۸. مقادیر جابه‌جایی نسبی میان طبقه مدل SBS6-L/3، تحت زلزله‌های دور از گسل - خاک تیپ ۲، الف) پایه ثابت، ب) پایه اندرکنشی

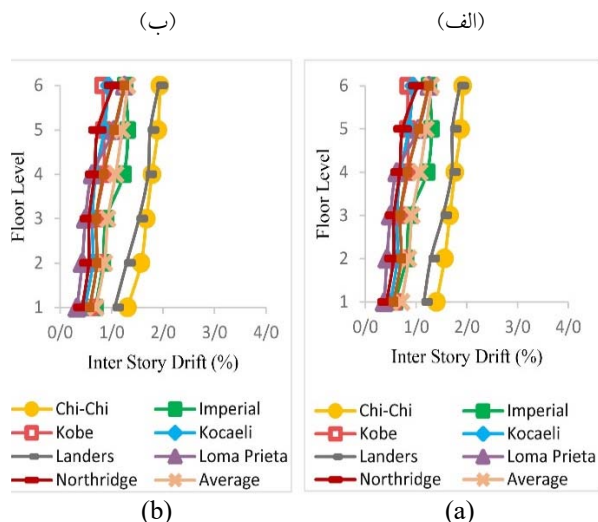


Fig. 8. Inter story drift values of SBS6-l/3 model, under the far-fault earthquake – type 2 soil, a) fix base b) interaction base

سازه‌ها در میانگین زلزله‌های نزدیک گسل بیشتر از میانگین زلزله‌های دور از گسل است [16].

جدول ۵. مقایسه درصد افزایش یا کاهش بیشینه تغییر مکان بام تحت میانگین زلزله‌های دور و نزدیک گسل - خاک تیپ ۲

Far-field		Near-field		Model
Percent of change		Percent of change		
increase	0.52	increase	0.25	SBS 3-L/4
increase	0.56	increase	0.26	SBS 3-L/3
increase	0.58	increase	0.30	SBS 3-5L/12
increase	1.01	increase	0.41	SBS 6-L/4
increase	1.02	increase	0.42	SBS 6-L/3
increase	1.04	increase	0.46	SBS 6-5L/12
decrease	1.73	decrease	2.19	SBS 12-L/4
decrease	1.34	decrease	1.90	SBS 12-L/3
decrease	1.16	decrease	1.41	SBS 12-5L/12

Table 5. Comparison the percentage increase or decrease of maximum displacement of roof under the average near and far fault Earthquakes - type 2 soil

جدول ۶. مقایسه درصد افزایش یا کاهش بیشینه تغییر مکان بام تحت میانگین زلزله‌های دور و نزدیک گسل - خاک تیپ ۴

Far-field		Near-field		Model
Percent of change		Percent of change		
increase	2.93	increase	4.44	SBS 3-L/4
increase	3.04	increase	4.91	SBS 3-L/3
increase	3.31	increase	5.52	SBS 3-5L/12
increase	4.11	increase	6.17	SBS 6-L/4
increase	4.39	increase	6.60	SBS 6-L/3
increase	5.06	increase	7.16	SBS 6-5L/12
increase	6.58	increase	13.8	SBS 12-L/4
increase	7.36	increase	17.1	SBS 12-L/3
increase	12.62	increase	18.2	SBS 12-5L/12

Table 6. Comparison the percentage increase or decrease of maximum displacement of roof under the average near and far fault Earthquakes - type 4 soil

در ادامه، مقادیر بیشینه نسبت جابه‌جایی نسبی میان طبقه و نسبت جابه‌جایی نسبی پسماند طبقات در سیستم ستون فقراتی، برای نمونه‌ای از سازه‌ها (مدل SBS6-L/3) به صورت مقایسه‌ای تحت زلزله‌های دور و نزدیک گسل، در هر دو حالت پایه ثابت و اندرکنشی با دو تیپ خاک ۲ و ۴ مطابق نمودارهای شکل‌های (۷ تا ۱۴) ارائه شده است. همچنین در جدول‌های (۷ تا ۱۴) تغییرات نسبت جابه‌جایی نسبی میان طبقه و جابه‌جایی نسبی پسماند طبقات برای همه سازه‌ها با یکدیگر مقایسه شده است.

شکل ۱۱. مقادیر جابه‌جایی نسبی پسماند مدل SBS6-L/3، تحت زلزله‌های نزدیک گسل - خاک تیپ ۲، الف) پایه ثابت، ب) پایه اندرکنشی

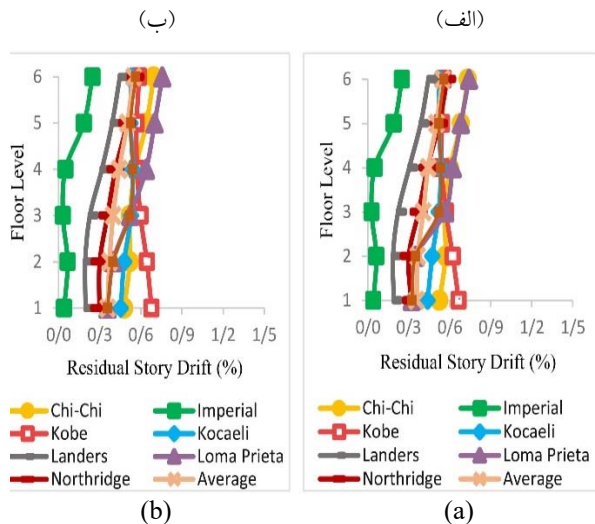


Fig. 11. Residual story drift values of SBS6-L/3 model, under the near-fault earthquake – type 2 soil , a) fix base, b) interaction base

شکل ۱۲. مقادیر جابه‌جایی نسبی پسماند مدل SBS6-L/3، تحت زلزله‌های دور از گسل - خاک تیپ ۲، الف) پایه ثابت، ب) پایه اندرکنشی

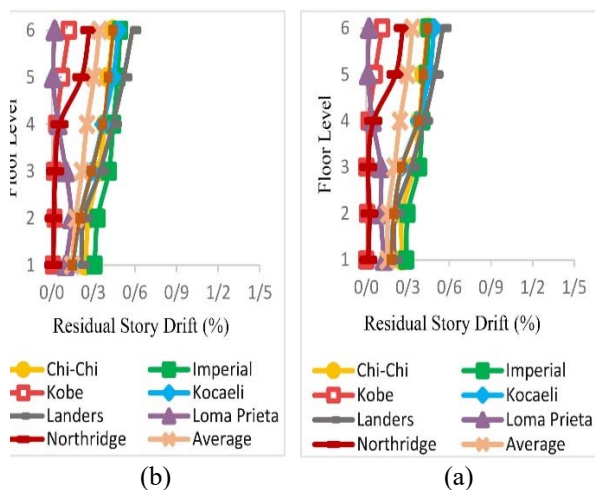


Fig. 12. Residual story drift values of SBS6-L/3 model, under the far-fault earthquake – type 2 soil , a) fix base, b) interaction base

شکل ۹. مقادیر جابه‌جایی نسبی میان طبقه مدل SBS6-L/3، تحت زلزله‌های نزدیک گسل - خاک تیپ ۴، الف) پایه ثابت، ب) پایه اندرکنشی

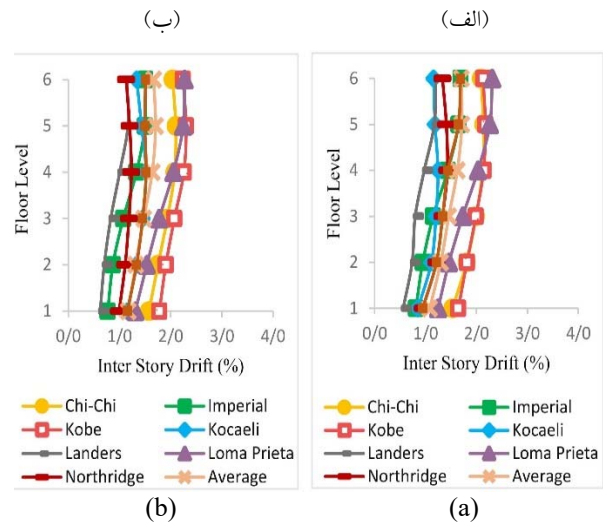


Fig. 9. Inter story drift values of SBS6-L/3 model, under the near-fault earthquake – type 4 soil , a) fix base b) interaction base

شکل ۱۰. مقادیر جابه‌جایی نسبی میان طبقه مدل SBS6-L/3، تحت زلزله‌های دور از گسل - خاک تیپ ۴، الف) پایه ثابت، ب) پایه اندرکنشی

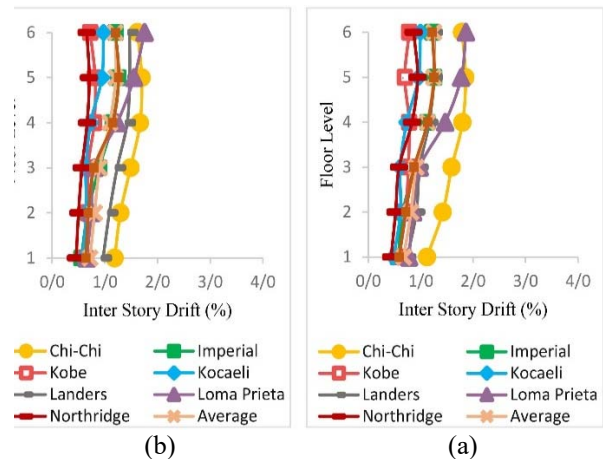


Fig. 10. Inter story drift values of SBS6-L/3 model, under the far-fault earthquake – type 4 soil , a) fix base b) interaction base

جدول ۷. مقایسه‌ی درصد تغییر نسبت جابه‌جایی نسبی میان طبقه - خاک

تیپ ۲

Far-field		Near-field		Model
Percent of change		Percent of change		
increase	0.44	increase	1.51	SBS 3-L/4
increase	0.31	increase	1.50	SBS 3-L/3
increase	0.16	increase	1.46	SBS 3-5L/12
increase	0.74	increase	3.60	SBS 6-L/4
increase	0.68	increase	3.52	SBS 6-L/3
increase	0.64	increase	3.18	SBS 6-5L/12
decrease	3.47	decrease	6.75	SBS 12-L/4
decrease	3.21	decrease	6.15	SBS 12-L/3
decrease	3.14	decrease	6.05	SBS 12-5L/12

Table 7. Comparison of inter story drift ratio change percentage - type 2 soil

جدول ۸. مقایسه‌ی درصد تغییر نسبت جابه‌جایی نسبی میان طبقه - خاک

تیپ ۴

Far-field		Near-field		Model
Percent of change		Percent of change		
decrease	3.04	increase	4.50	SBS 3-L/4
decrease	3.40	increase	4.47	SBS 3-L/3
decrease	3.58	increase	4.08	SBS 3-5L/12
decrease	4.31	increase	5.49	SBS 6-L/4
decrease	4.57	increase	5.47	SBS 6-L/3
decrease	4.86	increase	5.16	SBS 6-5L/12
increase	7.70	increase	11.67	SBS 12-L/4
increase	7.23	increase	11.03	SBS 12-L/3
increase	7.19	increase	10.53	SBS 12-5L/12

Table 8. Comparison of inter story drift ratio change percentage - type 4 soil

جدول ۹. مقایسه‌ی درصد تغییر نسبت جابه‌جایی نسبی پسماند طبقات - خاک تیپ ۲

خاک تیپ ۲

Far-field		Near-field		Model
Percent of change		Percent of change		
decrease	1.12	decrease	0.35	SBS 3-L/4
decrease	1.29	decrease	0.56	SBS 3-L/3
decrease	2.21	decrease	0.70	SBS 3-5L/12
increase	3.55	decrease	2.41	SBS 6-L/4
increase	3.88	decrease	2.59	SBS 6-L/3
increase	4.03	decrease	2.52	SBS 6-5L/12
increase	5.19	decrease	7.27	SBS 12-L/4
increase	5.68	decrease	8.52	SBS 12-L/3
increase	5.75	decrease	7.92	SBS 12-5L/12

Table 9. Comparison of residual story drift ratio change percentage - type 2 soil

شکل ۱۳. مقادیر جابه‌جایی نسبی پسماند مدل SBS6-L/3، تحت

زلزله‌های نزدیک گسل - خاک تیپ ۴، الف) پایه ثابت، ب) پایه

اندرکنشی

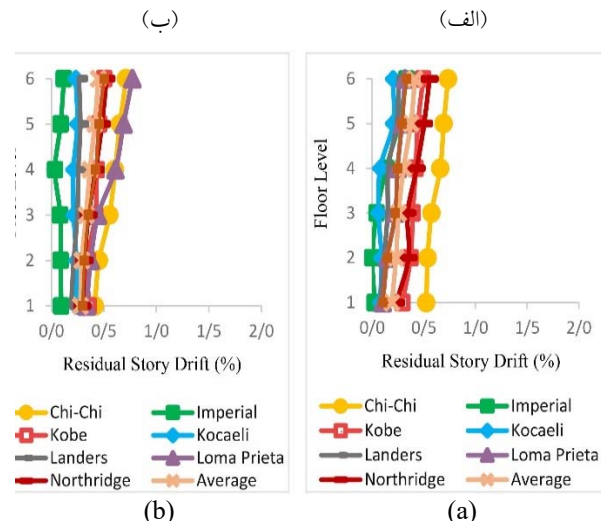


Fig. 13. Residual story drift values of SBS6-L/3 model, under the near-fault earthquake - type 4 soil, a) fix base, b) interaction base

شکل ۱۴. مقادیر جابه‌جایی نسبی پسماند مدل SBS6-L/3، تحت زلزله‌های

دور از گسل - خاک تیپ ۴، الف) پایه ثابت، ب) پایه اندرکنشی

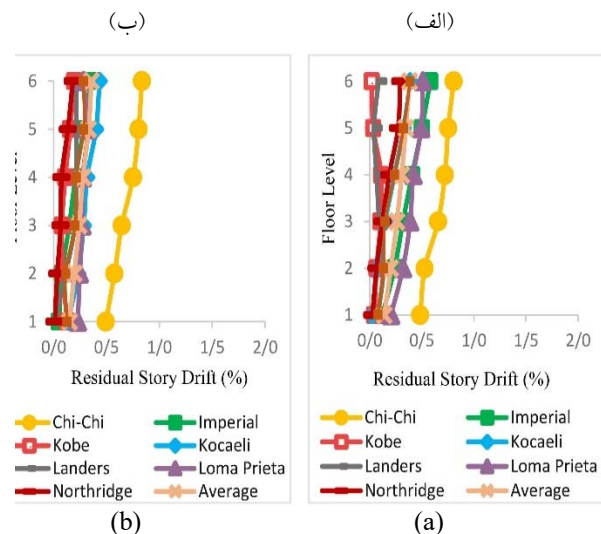


Fig. 14. Residual story drift values of SBS6-L/3 model, under the far-fault earthquake - type 4 soil, a) fix base, b) interaction base

جدول ۱۰. مقایسه‌ی درصد تغییر نسبت جابه‌جایی نسبی پسماند طبقات -

خاک تیپ ۴

Far-field		Near-field		Model
Percent of change		Percent of change		
decrease	5.00	increase	6.11	SBS 3-L/4
decrease	5.35	increase	6.61	SBS 3-L/3
decrease	5.86	increase	6.39	SBS 3-5L/12
decrease	6.85	increase	19.95	SBS 6-L/4
decrease	5.73	increase	19.26	SBS 6-L/3
decrease	5.13	increase	18.75	SBS 6-5L/12
increase	24.71	increase	36.02	SBS 12-L/4
increase	21.13	increase	35.57	SBS 12-L/3
increase	18.18	increase	30.07	SBS 12-5L/12

Table 10. Comparison of residual story drift ratio change percentage - type 4 soil

علاوه بر این، با توجه به شکل‌های (۱۱ تا ۱۴) و جداول (۹ و ۱۰) مشاهده می‌شود که نسبت جابه‌جایی نسبی پسماند طبقات در خاک سخت در اثر اندرکنش تحت میانگین زلزله‌های نزدیک گسل برای میانگین جابه‌جایی نسبی پسماند در همه سازه‌ها با کاهش همراه بوده که این میزان کاهش در سازه‌های ۳ طبقه ناچیز است، در سازه‌های ۶ طبقه ۲/۵۹ درصد و در سازه‌های ۱۲ طبقه ۸/۵۲ درصد می‌باشد. در میانگین زلزله‌های دور از گسل، در سازه‌های ۳ طبقه با ۲/۲۱ درصد کاهش، در سازه‌های ۶ طبقه با ۴/۰۳ درصد افزایش و در سازه‌های ۱۲ طبقه با ۵/۷۵ درصد افزایش مواجه شده است. در خاک نرم، تحت میانگین زلزله‌های نزدیک گسل برای سازه‌های ۳ طبقه ۶/۶۱ درصد افزایش، برای سازه‌های ۶ طبقه ۱۹/۹۵ درصد افزایش و برای سازه‌های ۱۲ طبقه ۳۶/۰۲ درصد افزایش به همراه داشته است. در میانگین زلزله‌های دور از گسل در سازه‌های ۳ طبقه ۵/۸۶ درصد کاهش، در سازه‌های ۶ طبقه ۶/۸۵ درصد کاهش و در سازه‌های ۱۲ طبقه ۲۴/۷۱ درصد افزایش داشته است.

لی و ماهین در در مطالعات خود روی سیستم مهاربند ستون فقراتی، نشان دادند که این سیستم در مقایسه با قاب مهاربندی شده شورون عملکرد بهتری در توزیع یکنواخت دررفت طبقات در ارتفاع سازه داشته است و همچنین باعث کاهش دررفت‌ها و تغییر مکان‌های پسماند شده است به گونه‌ای که همه دررفت‌های پسماند کمتر از ۰/۷ درصد بوده است [14].

بررسی‌های تورانی و همکاران در رابطه با نسبت دررفت پسماند طبقات سازه سیستم ستون فقراتی مورد مطالعه، نشان می‌دهد که این سیستم در حفظ توزیع یکنواختی دررفت پسماند طبقات میانگین زلزله‌ها بطور کلی در سازه‌های ۳ و ۶ طبقه، در مواجهه با زلزله‌های دور از گسل ۰/۰۵ تا ۰/۸۵ و ۰/۴ تا ۲ درصد و همچنین سازه‌های ۱۲ طبقه در مواجهه با زلزله‌های نزدیک گسل ۰/۸ تا ۱/۸ درصد عملکرد بهتری داشته است [16]

همان‌گونه که از شکل‌های (۷ تا ۱۰) و جداول (۷ و ۸) مشاهده می‌شود، در خاک سخت (تیپ ۲) نسبت جابه‌جایی نسبی میان طبقه در حالت اندرکنشی تحت میانگین زلزله‌های نزدیک گسل برای میانگین جابه‌جایی نسبی در سازه‌های ۳ طبقه با افزایش ناچیز همراه است، در سازه‌های ۶ طبقه به ترتیب ۳/۶۰ درصد افزایش و در سازه‌های ۱۲ طبقه ۶/۷۵ درصد کاهش داشته است. در میانگین زلزله‌های دور از گسل، در سازه‌های ۳ و ۶ طبقه افزایش ناچیزی در نسبت جابه‌جایی نسبی میان طبقه ایجاد شده و در سازه‌های ۱۲ طبقه با ۳/۴۷ درصد کاهش روبه‌رو شده است. در خاک نرم (تیپ ۴)، تحت میانگین زلزله‌های نزدیک گسل برای سازه‌های ۳ طبقه ۴/۵۰ درصد افزایش، برای سازه‌های ۶ طبقه ۵/۴۹ درصد افزایش و برای سازه‌های ۱۲ طبقه ۱۱/۶۷ درصد افزایش به همراه داشته است. در میانگین زلزله‌های دور از گسل در سازه‌های ۳ طبقه ۳/۵۸ درصد کاهش، در سازه‌های ۶ طبقه ۴/۸۶ درصد کاهش و در سازه‌های ۱۲ طبقه ۷/۷۰ درصد افزایش داشته است.

در پژوهش‌های گذشته تورانی و همکاران در مطالعات خود روی سیستم مهاربند ستون فقراتی به این نتیجه رسیدند که این سیستم در حفظ توزیع یکنواختی حداکثر دررفت طبقات میانگین زلزله‌ها به طور کلی در سازه‌های ۳ و ۱۲ طبقه در مواجهه با زلزله‌های نزدیک گسل به ترتیب ۰/۵ تا ۲/۵ و ۲/۱۵ تا ۶/۹ درصد و سازه‌های ۶ طبقه در مواجهه با زلزله‌های دور از گسل ۱/۴ تا ۲/۵ درصد عملکرد بهتری داشته است [16].

۷. نتیجه گیری

در این مقاله، به بررسی اثر اندرکنش خاک - سازه بر سازه‌های ۳، ۶ و ۱۲ طبقه دارای سیستم باربر جانبی مهاربند ستون فقراتی، با سه نمونه پیکربندی مختلف در محل تقاطع مهاربندها به تیر، تحت هفت شتاب‌نگاشت نزدیک گسل و هفت شتاب‌نگاشت دور از گسل قرار گرفته روی خاک‌های تیپ ۲ و ۴، پرداخته و نتایج زیر حاصل شده است:

- بیشینه تغییر مکان بام سازه‌های ۳ و ۶ طبقه برای خاک تیپ دو تحت زلزله‌های دور و نزدیک گسل با افزایش ناچیز همراه بوده و در سازه‌های ۱۲ طبقه تا ۲/۱۹ درصد کاهش داشته است. این مقادیر برای خاک تیپ چهار در سازه‌های ۳ تا ۱۲ طبقه در حوزه نزدیک تا ۱۸/۲۲ درصد و در حوزه دور تا ۱۲/۶۲ درصد افزایش داشته است.

- در خاک سخت، نسبت جابه‌جایی نسبی میان طبقه تحت زلزله‌های نزدیک گسل برای میانگین جابه‌جایی نسبی در سازه‌های ۳ و ۶ طبقه تا ۳/۶۰ درصد افزایش و در سازه‌های ۱۲ طبقه تا ۶/۷۵ درصد کاهش و تحت میانگین زلزله‌های دور از گسل سازه‌های ۳ و ۶ طبقه افزایش ناچیز و سازه‌های ۱۲ طبقه تا ۳/۴۷ درصد کاهش داشته است. در خاک نرم، تحت میانگین زلزله‌های نزدیک گسل برای سازه‌های ۳ تا ۱۲ طبقه بین ۴/۰۸ تا ۱۱/۶۷ درصد افزایش و در میانگین زلزله‌های دور از گسل، سازه‌های ۳ و ۶ طبقه تا ۴/۸۶ درصد کاهش و سازه‌های ۱۲ طبقه تا ۷/۷۰ درصد افزایش داشته‌اند.

- نسبت جابه‌جایی نسبی پسماند طبقات در خاک سخت تحت میانگین زلزله‌های نزدیک گسل برای میانگین دریافت در همه سازه‌ها با کاهش همراه بوده که این میزان کاهش در سازه‌های ۳ تا ۱۲ طبقه بین ۰/۳۵ تا ۸/۵۲ درصد بوده است و در میانگین زلزله‌های دور از گسل، در سازه‌های ۳ طبقه تا ۲/۲۱ درصد کاهش، در سازه‌های ۶ و ۱۲ طبقه تا ۵/۷۵ درصد افزایش مواجه شده است. در خاک نرم، تحت میانگین زلزله‌های نزدیک گسل برای سازه‌های ۳ تا ۱۲ طبقه بین ۶/۱۱ تا ۳۶/۰۲ درصد افزایش و در میانگین زلزله‌های دور از گسل در سازه‌های ۳ و ۶ طبقه تا

۸. مراجع

- [1] Khatib I.F., Mahin S.A., Pister K.S. 1988 Seismic behavior of concentrically braced frames, Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley, CA, Rept. No. UCB/EERC-88/01.
- [2] Chen C.C., Chen S.Y., Liaw J.J. 2001 Application of low yield strength steel on controlled plasticification ductile concentrically braced frames, *Canadian J. Civil Eng.*, 28(5): 823-836.
- [3] Mahin S.A., Uriz P., Aiken I.D., Field C., Ko E. 2004 Seismic performance of buckling restrained brace frame systems, *Proceedings, 13th World Conference on Earthquake Engineering*, Paper No. 1681, Vancouver, B.C., Canada.
- [4] Lai J.W., Tsai K.C., Lin S.L., Hsiao P.C. 2004 Large scale buckling restrained brace research in Taiwan, *Proceedings, 1st Asia Conference on Earthquake Engineering*, Manila, Philippines.
- [5] Aiken I.D., Nims D.K., Kelly J.M. 1992 Comparative study of four passive energy dissipation systems, *Bull. New Zealand Nat. Soc. Earthq. Eng.*, 25 (3): 175-192.
- [6] McCormick J., DesRoches R., Fugazza D., Auricchio F. 2007 Seismic assessment of concentrically braced steel frames with shape memory alloy braces, *ASCE J. Struct. Eng.*, 133(6): 862-870.
- [7] Christopoulos C., Tremblay R., Kim H.J., Lacerte M. 2008 Self-centering energy dissipative bracing system for the seismic resistance of structures: development and validation, *J. Struct. Eng.*, 134(1): 96-107.
- [8] Tremblay R., Haddad M., Martinez G., Richard J., Moffatt K. 2008 Inelastic cyclic testing of large size steel bracing members. *Proceedings, 14th World Conference on Earthquake Engineering*, Beijing, China.

- Characteristics of Adjacent Buildings. *Journal AJSR Civil and Enviromental Engineering*, 48 (3), pp.111-115.
- [21] Mirzaie F., Mahsuli M., & Ghannad M. A. 2017 Probabilistic analysis of soil-structure interaction effects on the seismic performance of structures. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 46(4), 641-660.
- [22] Balool S., Gholhaki M., & Rezayfar O. 2018 Study Behavior of Thin Steel Plate Shear Wall System by Effect of the Soil - Structure Interaction under Away from the Fault and Near the Fault Earthquakes. *Civil Engineering*, 35.2 (2.2), 81-95. (In Persian)
- [23] Gerami M., & Abdollahzadeh D. 2012 Estimation of forward directivity effect on design spectra in near field of fault. *Journal of Basic and Applied Scientific Research*, 2(9), 8670-8686.
- [24] Hassani N., Bararnia M., & Amiri G. G. 2018 Effect of soil-structure interaction on inelastic displacement ratios of degrading structures. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 104, 75-87.
- [25] Earthquake Resistant Design of building Regulations, 2800, 4th edition. Building and housing Reseach Center (2015).
- [26] AISC (American Institute of Steel Construction). (2005). Seismic Provisions for Structural Steel Buildings, Chicago.
- [27] Iranian National Building Code. (2013). Part 10, Design of Steel Building.
- [28] Peer berkeley center. Peer ground motion database.
https://ngawest2.berkeley.edu/users/sign_in?unauthenticated=true.
- [9] Yang C.S., DesRoches R., Leon R.T. 2010 Design and analysis of braced frames with shape memory alloy and energy-absorbing hybrid devices. *Eng. Struct.*, 32: 498-507.
- [10] Kiggins S., Uang C.M. 2006 Reducing residual drift of buckling-restrained braced frames as a dual system. *Eng. Struct.*, 28: 1525-1532.
- [11] Sabelli R. 2001 Research on Improving the Design and Analysis of Earthquake-Resistant Steel-Braced Frames. Earthquake Engineering Research Institute, the 2000 NEHRP Professional Fellowship Report, PF2000-9, Oakland, CA.
- [12] Tremblay, R. and Tirca, L. 2003 Behavior and Design of multi-story zipper concentrically braced steel frames for the mitigation of soft-story response. Proceedings of the conference on behavior of steel structures in seismic areas, P.471-477.
- [13] Yang C.S., DesRoches R., Leon R.T. 2010 Design and analysis of braced frames with shape memory alloy and energy-absorbing hybrid devices. *Eng. Struct.*, 32: 498-507.
- [14] Lai, J. and Mahin, S. 2014 Strongback System: A Way to Reduce Damage Concentration in Steel-Braced Frames. *J. Struct. Eng.*, 10.1061/(ASCE) ST.1943-541X.0001198, 04014223.
- [15] Barbara G. Simpson and Stephen A. Mahin, M. 2018 Experimental and Numerical Investigation of Strongback Braced Frame System to Mitigate Weak Story Behavior. *J. Struct. Eng.*, 2018, 144(2): 04017211.
- [16] Toorani A., Gholhaki M., & Vahdani R. 2020 The investigation into the effect of consecutive earthquakes on the strongback bracing system. In *Structures* (Vol. 24, pp. 477-488)
- [17] Trifunac M. D., Stewart J. P., Fenves G. L., & Seed R. B. 2000 Seismic Soil-Structure Interaction in Buildings. I: Analytical Methods; Seismic Soil-Structure Interaction in Buildings. II: Empirical Findings. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 126(7), 668-672.
- [18] El Ganainy H., & El Naggar M. H. 2009 Seismic performance of three-dimensional frame structures with underground stories. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 29(9), 1249-1261.
- [19] Kim Y. S., & Roesset J. M. 2004 Effect of nonlinear soil behavior on inelastic seismic response of a structure. *International Journal of Geomechanics*, 4(2), 104-114.
- [20] Forooghi H., Behnamfar F., and Madani B. 2016 Case Study for Evaluation of Dynamic

An Investigation into Effect of Soil-Structure Interaction on Seismic Behavior of Strong Back Bracing System under Near and Far-Field Earthquakes

Mahdis Taghizadeh¹, Majid Gholhaki^{2*}, Omid Rezayfar³

1- MSc, civil faculty, Semnan university, Semnan, iran. Mahdistaghizadeh1994@gmail.com

2- Associate professor, civil faculty, Semnan university, Semnan, iran. mgholhaki@semnan.ac.ir

3- Associate professor, civil faculty, Semnan university, Semnan, iran. orezayfar@semnan.ac.ir

Abstract

During the past years, researchers have developed ideas to thoroughly investigated into the behavior of structural bracing systems. Accordingly, one of these emerging systems is the Strong Back Bracing System (SBBS) by which the inter-storey drifts are maintained constant to prevent occurrence of failure. This system is comprised of the components of conventional concentrically braced frames together with a strong truss whose presence is aimed at uniform distribution of drifts along height of the building. This truss precludes concentration of damages in one or several stories in the concentrically braced frames. On the other hand, the near-filed earthquakes differ from the far-field ones in terms of both amplitude and frequency content. Thus, it is required to study the effects of such earthquakes on behavior of the SBBS. In addition to earthquake, the soil underlying the structure can affect the structural responses especially in cases when structure rests on soft soils. This system is comprised of the components of conventional concentrically braced frames together with a strong truss whose presence is aimed at uniform distribution of drifts along height of the building. This truss precludes concentration of damages in one or several stories in the concentrically braced frames. On the other hand, the near-filed earthquakes differ from the far-field ones in terms of both amplitude and frequency content. Thus, it is required to study the effects of such earthquakes on behavior of the SBBS. In addition to earthquake, the soil underlying the structure can affect the structural responses especially in cases when structure rests on soft soils. Typically, the codes provide methods for structural analysis assuming that the structure is located on a rigid base whereas in reality, this assumption does not always hold true highlighting the need for inclusion of soil-structure interaction into the analyses. Accordingly, this paper deals with seismic behavior of the structures equipped with the SBBS considering the soil-structure interaction under near and far-field earthquakes. In this respect, 3, 6 and 12-storey structures resting on stiff and loose soil (soil type II and IV according to classification of Standard 2800) have been analyzed. To this end, nonlinear time-history analyses using seven far and near-field earthquakes for both cases of rigid and flexible base, have been carried out. The results indicate that maximum roof displacement of 3, 6 and 12-storey structures founded on stiff soils (soil type II) vary insignificantly under the far and near-field earthquakes. Conversely, in the case of soft soils (soil type IV), displacements have increased by 2.93 to 18.22%. Moreover, it was found that drift ratios for the structures on stiff soil, in the case of 3 and 6-storey structures, increases slightly and reduced by 6.75% for the 12-storey structure. In the case of soft soil, all structures under the near-field motion, incurred increase in drift ratios by 11.67% and in the case of far-field, 3 and 6-storey structures experienced 4.86% decrease and conversely, the 12-storey structure encountered 7.7% increase. In addition, ratio of residual drift of the 3, 6 and 12-storey structures under average of near-field earthquakes, has decreased and increased by 8.52 and 36.02 in the case of stiff and soft soils, respectively.

Keywords: Strong Back Bracing System (SBBS), Soil-Structure Interaction (SSI), Near-Field earthquake, Far-Field earthquake.