

بررسی تأثیر رفتار غیرخطی روسازه بر عملکرد لرزه‌ای سازه‌های جداسازی شده

احمد رضا میربد^۱، حسین تاجمیر ریاحی^{۲*}، مریم داعی^۳

۱- دانشجوی دکتری سازه، گروه مهندسی عمران، دانشکده عمران و حمل و نقل، دانشگاه اصفهان

۲ و ۳- استادیار، گروه مهندسی عمران، دانشکده عمران و حمل و نقل، دانشگاه اصفهان

*tajmir@eng.ui.ac.ir

تاریخ پذیرش ۹۷/۰۳/۲۱

تاریخ دریافت ۹۶/۰۵/۰۸

چکیده

در طراحی سازه‌های متکی بر سیستم جداساز لرزه‌ای، این انتظار وجود دارد که جداساز به تنهایی وارد ناحیه غیرخطی شده و روسازه رفتار الاستیک خطی از خود نشان دهد. به همین دلیل در مدل‌سازی‌ها، رفتار روسازه به صورت ایده‌آل خطی در نظر گرفته می‌شود و در نتیجه به آن اجازه ورود به محدوده‌ی غیرخطی داده نمی‌شود؛ اما با توجه به این‌که تحت شرایط خاص مانند وقوع زلزله‌های شدید امکان ورود روسازه به حوزه‌ی رفتار غیرخطی وجود دارد، در این مطالعه به بررسی دقیق‌تر رفتار غیرخطی این گونه سازه‌ها پرداخته شده است. مطالعات این مقاله به دو بخش تفکیک می‌شود، در بخش اول به منظور بررسی تأثیر میزان غیرخطی شدن روسازه و اثر تغییر دیگر پارامترهای سیستم بر پاسخ سازه، از مدل دو درجه آزادی با جداساز خطی استفاده شده است. هم‌چنین تحلیل حساسیت به منظور یافتن پارامترهای مهم بر پاسخ این نوع سازه‌ها انجام شده است. این پارامترها شامل ضریب کاهش مقاومت، سختی و نسبت میرایی روسازه و هم‌چنین سختی و نسبت میرایی جداساز است. پاسخ تحلیل‌های مربوط به این قسمت نشان می‌دهد که با وارد شدن رفتار روسازه به محدوده‌ی غیرخطی، میزان شکل‌پذیری تقاضا به شدت با افزایش همراه خواهد بود که در بین پارامترهای مختلف مقدار سختی جداساز و روسازه بیشترین تأثیر را بر شکل‌پذیری تقاضا دارند. در گام دوم برای لحاظ کردن اثر موده‌های بالاتر به کمک مدل چند درجه آزادی و سیستم جداساز با فرم رفتار دوخطی، آثار تغییر پارامترهای سیستم مورد کنکاش قرار گرفته است که در این قسمت علاوه بر در نظر گرفتن سایر پارامترهای روسازه و جداساز، مقاومت تسلیم جداساز نیز متغیر در نظر گرفته شده است. نتایج بدست آمده در این قسمت نیز مؤید افزایش پاسخ سازه برای روسازه با مقاومت پایین است. در هر دو حالت با غیرخطی شدن رفتار روسازه از میزان جابه‌جایی جداساز کاسته می‌شود و جداسازها با سختی بالا و مقاومت تسلیم پایین موجب تغییر شکل کم‌تر در سطح خود و هم‌چنین کاهش شکل‌پذیری تقاضا در روسازه می‌شوند، اما با افزایش میرایی جداساز و سختی روسازه شکل‌پذیری تقاضا با افزایش همراه خواهد بود.

واژگان کلیدی: سیستم جداساز لرزه‌ای، روسازه، رفتار غیرخطی، شکل‌پذیری تقاضا.

۱- مقدمه

سازه‌های متکی بر انواع سیستم‌های جداساز اعم از الاستومری

و اصطکاکی که سختی افقی پایینی دارند، حدود ۲ الی ۴ برابر نسبت به سازه با پایه ثابت افزایش پیدا خواهد کرد [1]. بر

جداسازی لرزه‌ای یکی از شناخته شده‌ترین و پرکاربردترین روش‌های کنترل ارتعاش سازه‌هاست. به طور کلی دوره تناوب

همین اساس وجود جداساز موجب کاهش برش پایه سازه شده و در نهایت بیش‌ترین تقاضای تغییر شکل در جداساز را به دنبال خواهد داشت. تاکنون مطالعات پارامتری گسترده‌ای روی سیستم‌های جداسازی شده صورت گرفته که در آنها رفتار روسازه به صورت ایده‌آل خطی الاستیک مدل‌سازی شده است [2]. برای نمونه جانگید [3] به منظور بررسی اثر تغییر پارامترهایی هم‌چون جابه‌جایی تسلیم جداساز، دوره تناوب روسازه و جداساز و تعداد طبقات سازه، مدل‌های چند درجه آزادی با رفتار خطی متکی بر جداساز را مورد مطالعه قرار داد. در مطالعه دیگر نیز جانگید [4] به منظور تعیین مقدار بهینه‌ی مقاومت تسلیم جداساز با هدف کاهش میزان شتاب مطلق طبقه بام و جابه‌جایی جداساز، از روسازه به صورت قاب برشی با رفتار خطی و جداساز با رفتار دوخطی و میرایی ویسکوز استفاده کرد.

پورزینلی و ظریف [5] با استفاده از الگوریتم ژنتیک، برای دستیابی به مقادیر جرم، سختی و میرایی جداساز با هدف کاهش تغییر مکان بام و پایه و شتاب طبقه، از مدل روسازه با فرم رفتاری خطی استفاده کردند. علاوه بر این در آئین‌نامه‌های معتبر طراحی نیز ضریب رفتار به نسبت کوچکی برای این نوع سازه‌ها در نظر گرفته شده که پاسخ سازه تحت تحریک مربوط به سطح خطر طراحی را در محدوده‌ی الاستیک قرار می‌دهد؛ اما مطالعه عملکرد سازه‌های جداسازی شده با در نظر گرفتن رفتار غیرخطی سازه از چند جنبه قابل توجه است. اول از این دیدگاه که احتمال وقوع زلزله برای سازه‌هایی مانند سازه‌های موجود که مقاومت کافی ندارند یا سازه‌های تاریخی و با اهمیت وجود دارد که ممکن است در این حالت رفتار سازه از مرحله خطی عبور کرده و وارد مرحله غیرخطی شود. البته این موضوع تنها در رابطه با سازه‌های قدیمی نیست، بلکه در مورد سازه‌های نوساز که در معرض زلزله‌های شدید و حتی متوسط قرار می‌گیرند نیز این امکان وجود دارد. از موارد خاص این امکان، وقوع زلزله‌های نزدیک گسل و هم‌چنین برخورد سازه-ی جداسازی شده به کناره‌ها و ضربه ناشی از آن است. دوم این‌که در صورت ورود سازه به محدوده‌ی غیرخطی، از میزان جابه‌جایی جداساز در سطح پایه که خود یکی از معایب این نوع سیستم تلقی می‌شود، کاسته خواهد شد [6]. علاوه بر این

طراحی سازه‌های جداسازی شده براساس آئین‌نامه‌های کنونی منجر به برش پایه‌ی طرح نزدیک به برش پایه‌ی سازه با پایه ثابت مشابه خواهد شد [7]. این بدین مفهوم است که علاوه بر هزینه ناشی از تهیه و نصب سیستم جداساز، روسازه نیز با هزینه‌ی معادل یا حتی بیش‌تر نسبت به سازه با پایه ثابت طرح و ساخته خواهد شد. پس با استفاده از ظرفیت روسازه و کاهش هزینه ساخت این قسمت از سازه، بخشی از هزینه بکارگیری سیستم جداساز جبران می‌شود و در نهایت موجب کاربرد فراگیرتر این نوع سیستم کنترل ارتعاش برای سازه‌های با سطح عملکرد پائین‌تر خواهد شد و در نهایت از منظر اقتصادی به طرح بهینه‌ای می‌توان دست یافت. در نهایت نیاز به بررسی رفتار غیرخطی روسازه و در نظرگیری عوامل و پارامترهای مختلف سیستم و تأثیری که بر عملکرد روسازه می‌گذارند در این موارد احساس می‌شود و در نتیجه در مطالعات اخیر، در نظر گرفتن رفتار غیرخطی برای روسازه مورد توجه پژوهشگران قرار گرفته است.

از این رو اوردونز¹ و همکاران به مطالعه‌ی عددی در مورد پاسخ سازه‌های جداسازی شده با انواع جداسازهای الاستومری، الاستومری با هسته‌ی سربی و اصطکاکی به کمک مدل دو درجه آزادی، تحت ۶ رکورد زلزله با در نظر گرفتن رفتار غیرالاستیک روسازه پرداختند. جابه‌جایی جداساز، بام و هم‌چنین شکل‌پذیری تقاضا به عنوان معیار ارزیابی به ازای مقادیر مختلف مقاومت روسازه انتخاب شدند. نشان داده شد که جداسازهای الاستومری حساسیت کم‌تری به نسبت جداسازهای اصطکاکی به پلاستیک شدن رفتار روسازه از خود نشان می‌دهند و ضعیف شدن روسازه منجر به افزایش شکل‌پذیری تقاضا در سازه می‌شود [8]. کیکوچی و همکاران² [9] به بررسی اثر تسلیم در پاسخ لرزه‌ای سازه‌های جداسازی شده پرداختند و نشان دادند که رخداد تسلیم در سازه‌ی جداسازی شده کاملاً متفاوت از سازه با پایه ثابت خواهد بود و هم‌چنین شکل‌پذیری روسازه، تغییری اساسی در فرکانس کل سازه‌ی جداسازی شده ایجاد نمی‌کند؛ به عبارت دیگر در سازه عادی، با جذب انرژی زلزله، فرکانس سازه از فرکانس تحریک دور

1 Ordonez

2 Kikuchi

مقاومت را برابر $1/5$ و آیین‌نامه آمریکا 0.375 برابر ضریب کاهش مربوط به همان سازه با پایه ثابت و بیشینه مقدار ۲ را پیشنهاد داده‌است. پژوهشگران دلیل این امر را رفتارهای غیر خطی شدید این نوع سازه‌ها در صورت ورود به حوزه غیرخطی می‌دانند [6].

۳- انتخاب رکورد زلزله

به منظور تسهیل در توصیف پارامترهای تقاضای مهندسی و در نظر گرفتن تنوع در ویژگی‌های لرزه‌ای، باید مجموعه‌ای از تحریکات زمین که برای یک محل خاص با واقعیت نزدیک هستند، انتخاب شوند. در این مطالعه از دو مجموعه شامل شتاب‌نگاشت‌های با احتمال وقوع 10% و 2% در ۵۰ سال استفاده شده‌است. هر مجموعه شامل ۲۰ رکورد (۱۰ جفت رکورد) هست که به عنوان بخشی از پروژه فولاد SAC، برای منطقه لس‌آنجلس توسعه داده شده است. این شتاب‌نگاشت‌ها طوری مقیاس شده‌اند که منطبق بر طیف طرح آیین‌نامه 1997 NEHRP برای خاک سخت شوند [11, 12]. شکل‌های (۱-الف و ۱-ب) به ترتیب طیف پاسخ الاستیک مربوط به زلزله‌های با دوره بازگشت ۴۷۵ و ۲۴۷۵ سال را نشان می‌دهند.

شکل ۱. طیف پاسخ الاستیک با دوره بازگشت (الف) ۴۷۵ (ب) ۲۴۷۵ سال

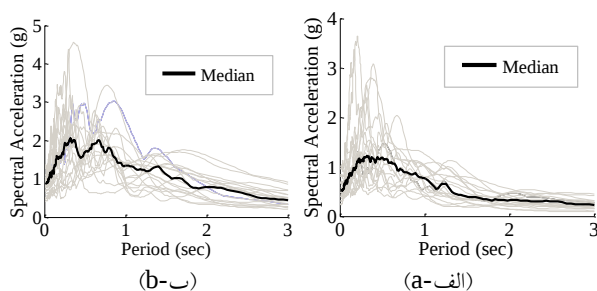


Fig. 1. Linear response spectra with return periods of a) 475 years; b) 2475 years

۴- سازه تک درجه آزادی متکی بر جداساز با رفتار خطی

در این بخش پس از ارائه توضیحاتی در مورد ضریب رفتار و مفهوم شکل‌پذیری، به مدل‌سازی سیستم جرم و فنر دو درجه آزادی پرداخته و پس از آن آنالیز حساسیت و تحلیل آثار پارامترهای جداساز و سازه بر تقاضای سازه انجام شده‌است.

می‌شود ولی سازه جداسازی شده رفتار غیرالاستیک کمتری را تجربه می‌کند و در نتیجه جذب انرژی ناشی از تسلیم در سازه جداسازی شده کمتر از سازه عادی خواهد بود. تسلیم در روسازه می‌تواند ناشی از تحریک بیش از حد زلزله طرح یا طرح نامناسب سیستم باربر جانبی روسازه باشد. کاسای و همکاران^۳ [6] به بررسی اثر رفتار غیرخطی روسازه در پاسخ لرزه‌ای کل سازه با هدف نشان دادن اثر تسلیم در پاسخ سازه و پیش‌بینی شکل‌پذیری تقاضا پرداختند. نتایج نشان داد که با کاهش مقاومت روسازه، به طرز چشم‌گیری شکل‌پذیری افزایش می‌یابد و هم‌زمان منجر به کاهش جابه‌جایی بیشینه در سطح جداساز می‌شود. کانستینو و کوآرشیه^۴ [10]، نیز به بررسی اثر تسلیم در پاسخ لرزه‌ای سازه جداسازی شده پرداختند و بر این مطلب صحه گذاشتند که اجازه ورود روسازه به ناحیه غیر خطی نیازمند بررسی دقیق‌تر است. مقاله حاضر در دو بخش مجزا انجام شده‌است که در قسمت اول به کمک مدل ساده دو درجه آزادی اثر ضعیف شدن روسازه در پاسخ کل سیستم بررسی شده و میزان حساسیت سازه‌های جداسازی شده به غیرخطی شدن رفتار روسازه مشخص شده است و گام دوم نیز همین روند برای سازه‌های چند درجه آزادی انجام شده‌است.

۲- رویکرد آیین‌نامه برای طرح سازه‌های جداسازی شده

آیین‌نامه‌های طراحی لرزه‌ای به سازه‌ها اجازه‌ی ورود به حوزه‌ی رفتار غیرخطی تحت زلزله سطح طرح را می‌دهند. در نتیجه حدودی را برای تغییر شکل‌های پلاستیک برای انواع سیستم‌های سازه‌ای در این سطح پیشنهاد می‌کنند. بر این مبنا در تحلیل‌های مختلف لرزه‌ای، ضریب کاهش نیرو R (ASCE7-10) یا ضریب رفتار q (Eurocode) پیشنهاد می‌شود که بیانگر نسبت برش پایه لازم برای باقی ماندن سازه در حوزه‌ی خطی به برش پایه طرح است؛ اما مقدار کاهش مقاومت برای طرح سازه‌های جداسازی شده به مقدار کمتری محدود می‌شود. برای نمونه آیین‌نامه اروپا بیشینه مجاز برای ضریب کاهش

3 Kasai

4 Constantinou and Quarshie

۴-۱- ضریب کاهش مقاومت روسازه

ضریب کاهش مقاومت سازه مطابق رابطه (۱)، نسبت مقدار نیرو بیشینه در حالت خطی به مقاومت تسلیم سازه را نشان می‌دهد.

$$R = \frac{f_{s0,el}}{f_{sy}} \quad (1)$$

در این رابطه، R ضریب کاهش مقاومت به علت شکل‌پذیری، $f_{s0,el}$ نیرو بیشینه در حالت خطی، f_{sy} مقاومت تسلیم سازه هستند. لازم به ذکر است که ضریب کاهش مقاومت این مطالعه با ضریب رفتار ارائه شده در آئین‌نامه‌ها متفاوت است و این اختلاف ناشی از لحاظ نشدن اضافه مقاومت سازه در مدل است.

۴-۲- انتخاب شکل‌پذیری سازه به عنوان شاخص خرابی

به منظور کمی‌سازی زیان‌های ناشی از زلزله می‌توان معیارهایی تحت عنوان شاخص خرابی که متناظر با صدمات ایجاد شده در سازه است، معرفی نمود. خرابی در سازه زمانی رخ می‌دهد که تغییرشکل‌های دائمی و بزرگ بر اثر بارهای وارد شده بر سازه، در آن ایجاد شود.

شکل‌پذیری که یک شاخص قدیمی برای خرابی سازه است بیانگر ظرفیت پذیرش تغییرشکل‌های خمیری است. همان‌طور که در رابطه (۲) آمده است، شکل‌پذیری μ معادل با نسبت جابه‌جایی بیشینه در حالت غیرخطی u_{s0} به جابه‌جایی در نقطه تسلیم سازه u_{sy} است.

$$\mu = \frac{u_{s0}}{u_{sy}} \quad (2)$$

مطابق رابطه (۳) که نشان دهنده‌ی رابطه‌ی بین شکل‌پذیری و ضریب کاهش مقاومت است، اگر رفتار روسازه کاملاً الاستیک باشد یعنی برای $R = 1.0$ ، آن‌گاه $\mu = 1.0$ خواهد شد و اگر $R > 1.0$ باشد، $\mu > 1.0$ می‌شود.

$$\mu = \frac{R \cdot u_{s0}}{u_{s0,el}} \quad (3)$$

که در آن $u_{s0,el}$ جابه‌جایی بیشینه سازه در حالت رفتار الاستیک است. مطالعات زیادی در مورد رابطه‌ی بین ضریب کاهش مقاومت R و شکل‌پذیری μ برای سازه‌های با پایه ثابت انجام شده‌است؛ اما تاکنون تنها تسیاووس و همکاران [13] و هم-

چنین میرید و همکاران [14] رابطه‌ای برای سازه‌های متکی بر سیستم جداساز لرزه‌ای پیشنهاد داده‌اند.

۴-۳- مدل دو درجه آزادی

برای شبیه‌سازی رفتار سازه مجهز به سیستم جداساز لرزه‌ای از مدل دو درجه آزادی مطابق شکل (۲) استفاده شده‌است. مطابق شکل (۳) سیستم جداساز لرزه‌ای به صورت ویسکوالاستیک و روسازه با فرض رفتار الاستوپلاستیک کامل مدل‌سازی شده‌اند. به کمک روابط (۴ و ۵) با انتخاب دوره تناوب روسازه و سیستم جداساز و نسبت میرایی آن‌ها، جرم و سختی روسازه و سیستم جداساز حاصل خواهند شد.

$$T_b = 2\pi \sqrt{\frac{m_b + m_s}{k_b}} \quad T_s = 2\pi \sqrt{\frac{m_s}{k_s}} \quad (4)$$

$$\xi_b = \frac{C_b T_b}{4\pi(m_b + m_s)} \quad \xi_s = \frac{C_s T_s}{4\pi m_s} \quad (5)$$

در این روابط T_s دوره تناوب، m_s جرم، k_s سختی، ξ_s نسبت میرایی و C_s ضریب میرایی روسازه و T_b دوره تناوب، m_b جرم دال پایه، k_b سختی، ξ_b نسبت میرایی و C_b ضریب میرایی سیستم جداساز لرزه‌ای هستند.

شکل ۲. مدل دو درجه آزادی سازه جداسازی شده

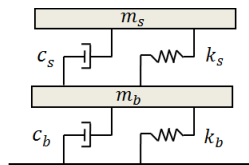


Fig. 2. 2DOF model of a seismically base isolated structure

شکل ۳. مدل رفتاری نیرو-جابه‌جایی (الف) سیستم جداساز، (ب) روسازه

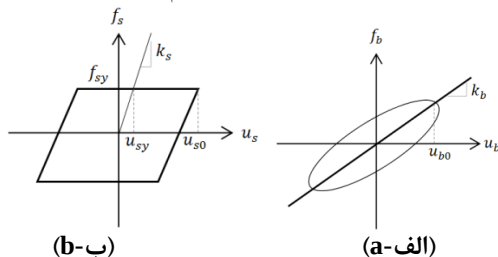


Fig. 3. Model of force-displacement relations for a) the isolation system and b) the superstructure

۴-۴- آنالیز حساسیت

در ادامه برای درک بهتر رفتار سازه‌ی متکی بر جداساز، با تغییر پارامترهای مختلف در مدل و محاسبه‌ی پاسخ سازه، چگونگی

مطابق انتظار، با افزایش ضریب کاهش مقاومت سازه از ۱ به ۴، جابه‌جایی و هم‌چنین شکل‌پذیری تقاضای روسازه افزایش می‌یابد؛ اما در نقطه مقابل این تغییر با کاهش میزان جابه‌جایی جداساز همراه است. این مسأله مبین این موضوع است که با خطی در نظر گرفتن رفتار روسازه، بیش‌ترین سهم انرژی توسط جداساز جذب شده و زلزله تأثیری بر سازه نخواهد گذاشت، اما با ضعیف‌تر شدن روسازه، کارایی جداساز در بهبود عملکرد کم‌تر شده است.

۴-۴-۲ بررسی تأثیر سختی جداساز

در این بخش تأثیر تغییرات مقاومت روسازه برای ۴ نوع جداساز با سختی‌های مختلف (دوره تناوب‌های ۱، ۲، ۳ و ۴ ثانیه) مورد ارزیابی قرار گرفته است. شکل (۵) تأثیر تغییرات ضریب کاهش مقاومت روسازه را به ازای مقادیر مختلف دوره تناوب جداساز، به ترتیب بر میزان جابه‌جایی جداساز، جابه‌جایی و شکل‌پذیری تقاضای روسازه نشان می‌دهد.

مطابق شکل (۵-الف) با نرم‌تر شدن جداساز (افزایش دوره تناوب)، در حالت روسازه الاستیک، میزان جابه‌جایی جداساز افزایش یافته است. این روند با ضعیف شدن روسازه نیز برقرار است. هم‌چنین در حالت روسازه با رفتار الاستیک، نرم‌تر شدن جداساز سبب کمتر شدن جابه‌جایی روسازه خواهد شد، اما این قانون با ورود روسازه به حوزه‌ی غیرخطی به صورت کامل برقرار نخواهد بود. برای نمونه برای روسازه با $R = 1.5$ ، جداساز نرم‌تر با دوره تناوب ۴ ثانیه مسبب بیش‌ترین میزان جابه‌جایی در سازه شده است. در همین مقدار مقاومت سازه، مطابق شکل (۵-ب) جداساز سخت‌تر کم‌ترین جابه‌جایی را در روسازه به دنبال داشته است. برای درک بهتر این موضوع مطابق شکل (۵-ج) از شکل‌پذیری تقاضا به عنوان معیار دیگر ارزیابی استفاده شده است. همان‌گونه که مشخص است در سازه‌های ضعیف، با نرم‌تر شدن جداساز شکل‌پذیری تقاضا افزایش چشم‌گیری خواهد یافت. در نتیجه مجهز کردن سازه‌های ضعیف به جداسازهای سخت‌تر گزینه‌ی مناسب‌تری تلقی می‌شود، چراکه در این حالت علاوه بر این‌که جابه‌جایی کم‌تری را در سطح پایه به دنبال خواهد داشت، موجب کم‌تر شدن تقاضای شکل‌پذیری روسازه نیز می‌شود.

اثرگذاری عوامل مختلف مورد بحث قرار می‌گیرد و برای ارزیابی تأثیر تغییرات از سه پارامتر تقاضای مهندسی^۵ (EDPs)، شامل جابه‌جایی روسازه، جابه‌جایی سیستم جداساز و شکل‌پذیری تقاضا در روسازه استفاده شده است. نتایج ارائه شده در این بخش مربوط به میانه بیشینه پاسخ سیستم تحت ۲۰ زلزله‌ی مقیاس شده با دوره بازگشت ۲۴۷۵ ساله است.

۴-۴-۱ بررسی تأثیر تغییرات ضریب کاهش مقاومت

به منظور بررسی تغییرات ضریب کاهش مقاومت روسازه بر پارامترهای تقاضای مهندسی اشاره شده، مقادیر ۱، ۱/۵، ۲، ۳، ۳/۵ و ۴ به عنوان ضریب کاهش مقاومت انتخاب شدند.

شکل ۴. تأثیر ضریب کاهش مقاومت روسازه R (الف) بر جابه‌جایی آن (ب) شکل‌پذیری تقاضا (ج) جابه‌جایی جداساز

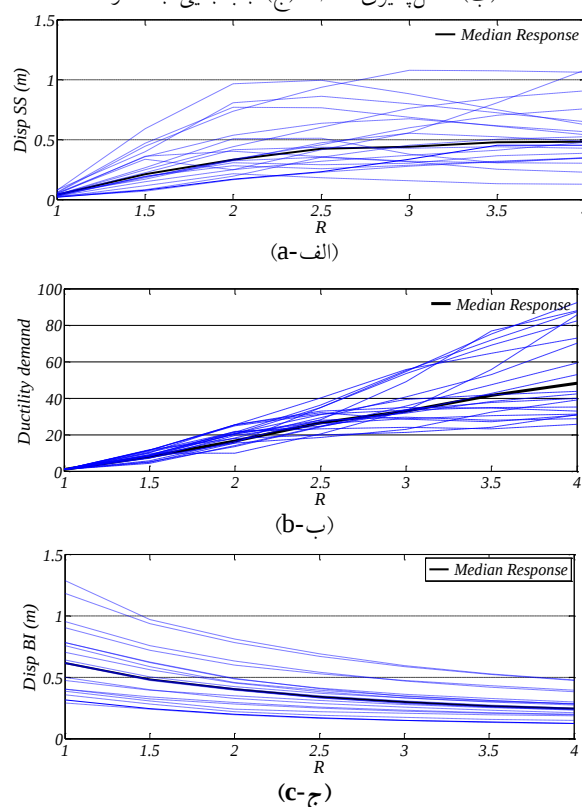


Fig. 4. The effect of strength reduction factor of superstructure on the a) Superstructure disp. b) ductility demand c) B.I. disp.

در همین راستا به ترتیب شکل (۴) تأثیر تغییرات ضریب کاهش مقاومت را بر جابه‌جایی، شکل‌پذیری تقاضای روسازه و هم‌چنین بر میزان جابه‌جایی سیستم جداساز نشان می‌دهند.

شکل ۵. اثر سختی جداساز بر میزان جابه‌جایی (الف) جداساز (ب) روسازه

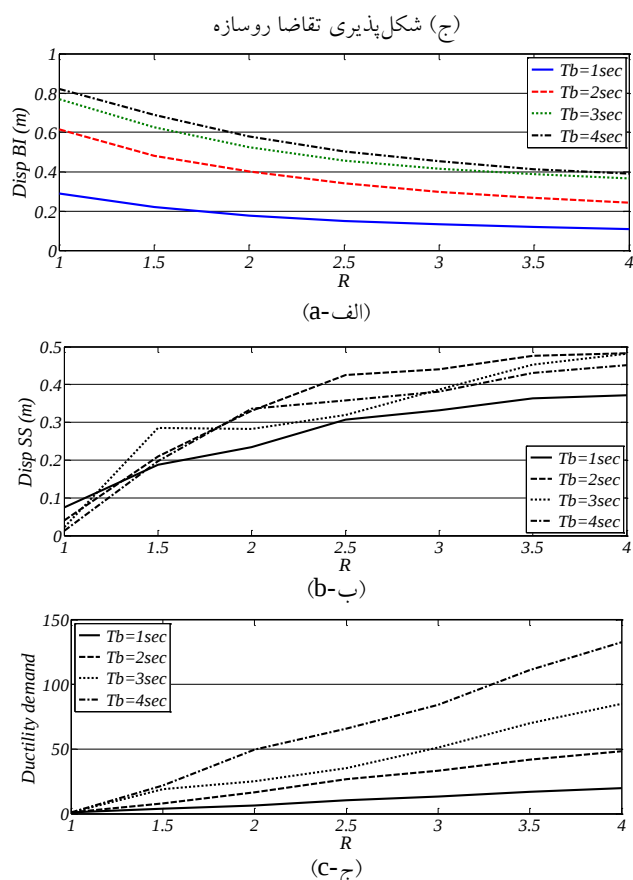


Fig. 5. The effect of base isolation system stiffness on the a) B.I. disp. b) Superstructure disp. c) ductility demand.

۴-۴-۴ بررسی تأثیر سختی روسازه

یکی دیگر از پارامترهای مهم و تأثیرگذار در پاسخ سازه، دوره تناوب آن محسوب می‌شود. در این جا هدف تحلیل تأثیر تغییرات سختی روسازه (دوره تناوب) بر عملکرد سیستم است. برای این منظور مقادیر 0.5 ، 1.0 و 1.5 ثانیه برای دوره تناوب روسازه در نظر گرفته شده است که نتایج مربوط به میزان جابه‌جایی روسازه، شکل‌پذیری تقاضای روسازه و همچنین میزان جابه‌جایی جداساز به ترتیب در شکل (۷) ارائه شده است. با ملاحظه شکل (۷-الف) می‌توان دریافت که روسازه نرم‌تر، جابه‌جایی بیشتری به همراه خواهد داشت؛ اما روسازه سخت‌تر مطابق شکل (۷-ب) تقاضای بیشتری از شکل‌پذیری را به دنبال دارد. میزان جابه‌جایی جداساز به طرز قابل تأملی از سختی روسازه تأثیر نمی‌پذیرد، اما با توجه به شکل (۷-ج) در حالتی که رفتار روسازه خطی است، روسازه با دوره تناوب 1.5 ثانیه به نسبت کم‌ترین و روسازه با دوره تناوب 1 ثانیه بیش‌ترین جابه‌جایی را در جداساز ایجاد کرده‌اند که این روند با ضعیف‌تر شدن روسازه نیز تا حدودی برقرار مانده است.

۴-۴-۳ بررسی تأثیر نسبت میرایی جداساز

برای بررسی تأثیر نسبت میرایی جداساز بر پاسخ‌ها، سه مقدار 0.02 ، 0.06 و 0.1 به عنوان نسبت میرایی برای سامانه‌ی جداساز انتخاب شدند که به ترتیب نتایج مربوطه در شکل (۶) ارائه شده‌اند. مطابق شکل (۶-الف)، با افزایش میرایی جداساز، از میزان جابه‌جایی آن، هم در حالت سازه با رفتار الاستیک و هم در روسازه‌های ضعیف‌تر کاسته خواهد شد. همین روند کاهشی نیز در شکل (۶-ب) برای جابه‌جایی روسازه مشاهده می‌شود، جداساز با میرایی کم‌تر، جابه‌جایی به نسبت بیش‌تری در روسازه را به دنبال خواهد داشت. همان‌گونه که در شکل (۶-ج) ملاحظه می‌شود، هر چند که تغییر در میرایی جداساز تأثیر چندانی بر شکل‌پذیری تقاضای روسازه نخواهد داشت، اما می‌توان گفت جداساز با میرایی کم‌تر در سازه‌های ضعیف، بر تقاضای روسازه می‌افزاید.

شکل ۶. بررسی تغییر نسبت میرایی جداساز بر میزان (الف) جابه‌جایی جداساز (ب) جابه‌جایی روسازه (ج) شکل‌پذیری تقاضا

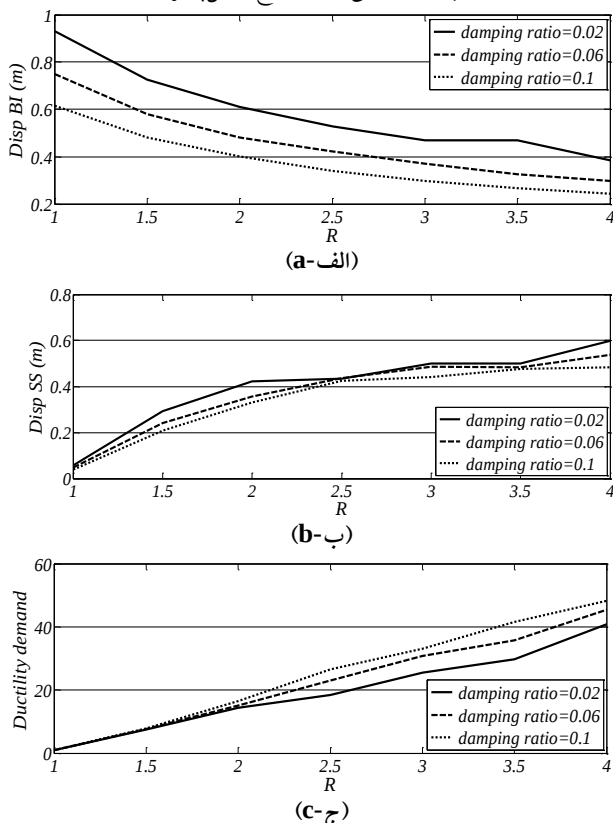


Fig. 6. The effect of base isolation system damping ratio on the a) B.I. disp. b) Superstructure disp. c) ductility demand.

شکل ۸. بررسی تغییر نسبت میرایی روسازه بر میزان (الف) جابه‌جایی

روسازه (ب) شکل‌پذیری طلب (ج) جابه‌جایی جداساز

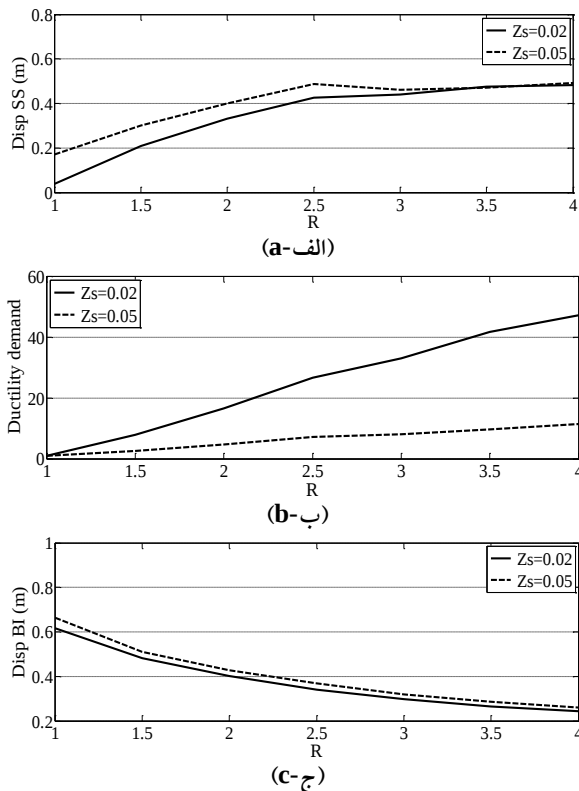


Fig. 8. The effect of superstructure damping ratio on the a) Superstructure disp b) ductility demand. c) B.I. disp.

۴-۵- مقایسه تقاضای شکل‌پذیری سازه جداسازی شده و پایه ثابت

به منظور مقایسه‌ی میزان و حساسیت پاسخ سازه‌ی ضعیف مجهز به جداساز نسبت به همان سازه با پایه ثابت، چهار نوع سیستم سازه‌ای با مشخصات ذیل برگزیده شده‌است. دو سازه-ی پایه ثابت با دوره تناوب ۰/۵ ثانیه، جرم ۱۰۰ تن، نسبت میرایی ۰/۰۲ و ضریب کاهش مقاومت ۱ و ۲ انتخاب شده‌اند، هم‌چنین دو سازه‌ی دیگر با همین مشخصات ولی متکی بر جداساز خطی با دوره تناوب ۱/۵ ثانیه، نسبت میرایی ۰/۰۲ و جرم ۰/۱ برابر جرم روسازه انتخاب گردیده‌اند. نتایج حاصل در جدول (۱) آورده شده‌است.

همان‌طور که ملاحظه می‌شود، با اضافه شدن سیستم جداساز به سازه، نیروی حداکثری روسازه حدود ۲/۶ برابر کاهش داشته که این مسأله تأییدی بر کاهش برش پایه‌ی تقاضای سازه‌ی جداسازی شده نسبت به پایه ثابت است، اما با ورود روسازه به حوزه‌ی غیرخطی، شکل‌پذیری تقاضا نسبت به حالت پایه

شکل ۷. بررسی تغییر سختی روسازه بر میزان (الف) جابه‌جایی روسازه

(ب) شکل‌پذیری تقاضا (ج) جابه‌جایی جداساز

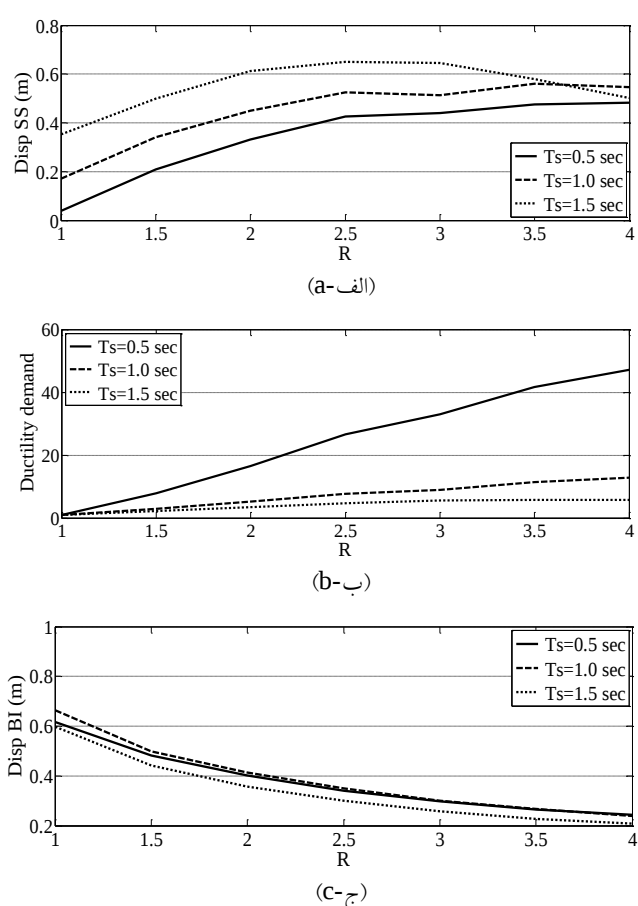


Fig. 7. The effect of superstructure stiffness on the a) Superstructure disp b) ductility demand. c) B.I. disp.

۴-۵- ارزیابی تأثیر نسبت میرایی روسازه

برای ارزیابی تغییر نسبت میرایی روسازه، دو مقدار ۰/۰۲ و ۰/۰۵ انتخاب شد که چگونگی تأثیرگذاری این دو مقدار بر جابه‌جایی و شکل‌پذیری تقاضای روسازه و میزان جابه‌جایی جداساز به ترتیب در شکل (۸) ارائه شده‌است. همان‌گونه که در شکل (۸-الف) ملاحظه می‌شود، تا حدود ضریب کاهش مقاومت ۳/۳، جابه‌جایی روسازه‌ی با میرایی کم‌تر از جابه‌جایی روسازه با میرایی بیش‌تر، کم‌تر است، ولی در ادامه میرایی روسازه تأثیری بر پاسخ ندارد. مطابق شکل (۸-ب) با کاهش میرایی روسازه، تقاضای بیشتری در روسازه رخ خواهد داد. ولی طی یک روند ثابت، سازه با میرایی بیش‌تر موجب جابه‌جایی زیادتری در سطح جداساز شده‌است (شکل ۸-ج).

به عنوان متغیر طراحی با هدف دستیابی به عملکرد لرزه‌ای بهینه این نوع از سازه‌ها در نظر گرفت؛ اما این تناسب برای قاب خمشی و قاب با دیوار برشی نمی‌تواند صحیح باشد چرا که با افزایش یا کاهش وزن المان‌های مقاوم سازه‌ای مثل تیر، ستون یا دال نمی‌توان این اطمینان را داشت که رابطه مستقیمی با مقاومت طلب کل وجود داشته باشد.

به علت پرکاربرد بودن و همچنین تأثیرگذاری و مشارکت مدل رفتار دوخطی جداساز در مودهای بالاتر، رفتار نیرو-جابجایی جداساز به صورت دوخطی، با پارامترهای F_y ، K_b و q که به ترتیب مبین تنش تسلیم، سختی پس از تسلیم، جابه‌جایی در لحظه تسلیم است، تعریف شده است. از جداسازهایی که رفتار ایده‌آل شده‌شان به فرم دوخطی است می‌توان به جداساز لاستیکی با میرایی بالا، لاستیکی با هسته سربی و اصطکاکی اشاره داشت. مدل در نظر گرفته شده در شکل (۹-ب) نشان داده شده است. مطابق رابطه (۴) سختی ثانویه جداساز به شکلی تنظیم می‌شود تا دوره تناوب آن به مقدار مدنظر برسد. مقاومت تسلیم جداساز به صورت نرمال شده بر وزن کل سیستم W ، به فرم رابطه (۶) نمایش داده می‌شود.

$$F_{yn} = \frac{F_y}{W} \quad \text{that } W = (m_b + m_s) \times g \quad (6)$$

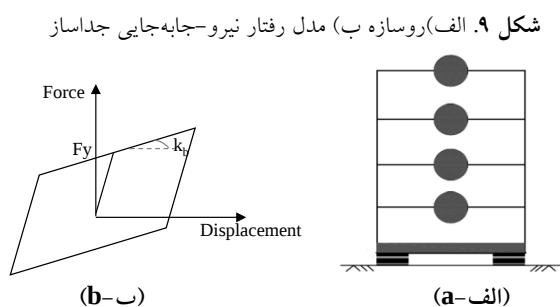


Fig. 9. (a) Structure system, (b) Bilinear force-displacement behavior of isolator

۵-۲- آنالیز حساسیت

۵-۲-۱ بررسی تأثیر تغییرات ضریب کاهش مقاومت در این قسمت برای شبیه‌سازی اثر ضعیف شدن روسازه، از دو مدل روسازه با رفتار الاستیک (مدل اول) و روسازه با رفتار دوخطی (مدل دوم) با مشخصات جداساز یکسان استفاده شده است. برای تعیین مقدار مقاومت (نیروی تسلیم) طبقات در

ثابت حدود ۶/۵ برابر افزایش داشته است، اگرچه هنوز جداساز با کاهش ۲ برابری مقدار برش پایه به نسبت سازه عادی موثر عمل نموده است. همان‌گونه که در گذشته بحث شد، با استفاده از ظرفیت روسازه میزان جابه‌جایی جداساز کاهش می‌یابد که در این‌جا نیز این اتفاق رخ داده است.

جدول ۱. مقایسه بین پاسخ سازه با و بدون جداساز

Superstructure Behavior	-	Fixed Base	Base Isolated
Linear	BI displacement (m)	-	0.7045
	$\frac{V_{b,superstructure}}{V_{b,fixbase}}$	1	0.381
Nonlinear	BI displacement (m)	-	0.4421
	$\frac{V_{b,superstructure}}{V_{b,fixbase}}$	1	0.498
	Ductility Demand	1.539	10.05

Table. 1. Comparison of structural response with and without base isolation

۵-۳ مدل چند درجه آزادی متکی بر سیستم جداساز دوخطی

۵-۱- فرضیات مدل‌سازی

بر طبق شکل (۹-الف) به منظور ساده سازی و در نظر گرفتن تأثیر مودهای بالاتر، از مدل چند درجه آزادی (قاب برشی) استفاده شده است [15, 16]. در این مدل هر طبقه به صورت جرم متمرکز با توزیع یکسان در طبقات و رفتار نیرو-تغییر شکل برشی طبقات به صورت دوخطی الاستو-پلاستیک شبیه‌سازی شده است. در این مدل از سازه‌ها الگوی توزیع سختی جانبی طبقات، مشابه الگوی توزیع مقاومت طبقات در ارتفاع سازه است که شکل این توزیع از الگوی بار جانبی طرح سازه تبعیت می‌کند. در این بخش از الگوی بار آیین-نامه ASCE7-10 استفاده شده است. در سازه‌های برشی هر افزایش در مصالح سازه با افزایش مقاومت همراه است، در نتیجه وزن کل سازه باید نسبتی از جمع کل مقاومت برشی طبقات لحاظ شود. از این‌رو مقاومت برشی طبقات را می‌توان

همان‌طور که در شکل (۱۰-الف) ملاحظه می‌شود، زمانی که روسازه رفتار خطی داشته باشد، بیش‌ترین جابه‌جایی در سطح جداساز رخ داده است؛ اما با ضعیف‌تر شدن روسازه هرچند که از میزان جابه‌جایی جداساز کاسته شده، اما جابه‌جایی روسازه با افزایش همراه بوده که این روند با انتخاب مقادیر R بزرگ‌تر به شکل تصاعدی ادامه داشته است.

مطابق شکل (۱۰-ب) ضعیف شدن روسازه سبب افزایش شدید شکل‌پذیری تقاضای طبقات شده است. این اتفاق در طبقات پایین بیش‌تر رخ داده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود با ۳ برابر شدن ضریب R ، شکل‌پذیری تقاضای بیشینه سازه حدود ۳۰ برابر افزایش پیدا کرده است.

در ادامه برای بررسی تأثیرگذاری مشخصه‌های مختلف جداساز و روسازه بر پاسخ کل سیستم با انتخاب مقادیر ۱، ۱/۵ و ۲ برای ضریب R ، پارامترهایی همچون سختی، مقاومت و میرایی از جداساز و دوره تناوب روسازه متغیر در نظر گرفته شده است. پارامترهای اولیه به‌منظور انجام آنالیز حساسیت به‌قرار جدول (۲) هستند.

جدول ۲. سازه‌ی اولیه

Base Isolation			Super Structure	
F_{yn}	$\xi_b = Z_b$	$T_b(s)$	$\xi_s = Z_s$	$T_s(s)$
0.15	0.05	1.5	0.02	0.5

Table 2. prototype structure.

۵-۲-۲ تغییرات سختی جداساز

به‌منظور بررسی تأثیر تغییرات سختی جداساز بر پارامترهای تقاضای موردبحث، مقادیر ۱، ۱/۵، ۲، ۲/۵ و ۳ ثانیه به‌عنوان دوره تناوب سیستم جداساز انتخاب شده‌اند.

شکل (۱۱) تأثیر تغییرات سختی جداساز بر توزیع تغییرات جابه‌جایی کل سیستم شامل جداساز و روسازه را به ترتیب برای مقادیر مختلف R از ۱ تا ۲ نشان می‌دهد. بر طبق شکل (۱۱-الف) در حالتی که روسازه رفتار الاستیک دارد، مطابق انتظار با افزایش دوره تناوب جداساز (نرم‌تر شدن) جابه‌جایی جداساز افزایش خواهد یافت که به دنبال آن جابه‌جایی روسازه نیز بیش‌تر می‌شود. همین روند نیز برای روسازه غیرخطی شده

مدل دوم تحت هر رکورد زلزله، به این‌گونه عمل شد که مقدار برش پایه از مدل اول به ضریبی (R) تقسیم و به‌عنوان برش پایه در مدل دوم اعمال شد. هنگامی که ضریب R مقدار یک دارد پاسخ دو مدل یکسان و در هر دو حالت روسازه رفتار خطی خواهد داشت و با افزایش این ضریب از میزان برش طرح روسازه کاسته شده و به‌تبع آن میزان مقاومت طبقات نیز کاهش خواهد یافت و سریع‌تر وارد حوزه‌ی رفتار غیرخطی می‌شوند.

در ادامه به‌منظور بررسی اثر ضعیف شدن روسازه بر عملکرد سیستم سازه‌ی جداسازی شده، جابه‌جایی کل سیستم و شکل‌پذیری تقاضا به‌عنوان معیار ارزیابی انتخاب شده‌اند. در این بخش به‌منظور انجام تحلیل تاریخچه زمانی غیرخطی از رکوردهای مجموعه SAC با دوره بازگشت ۴۷۵ ساله استفاده شده است. لازم به ذکر است که با توجه به غیرخطی بودن روسازه در مدل دوم، مقدار ۰/۰۲ به‌عنوان کرنش سختی طبقات در نظر گرفته شده است و به ضریب رفتار R که پارامتر کنترل‌کننده‌ی میزان غیرخطی شدن رفتار روسازه است مقادیر ۱ تا ۳ اختصاص داده شده است.

شکل ۱۰. مقایسه‌ی بین توزیع بیشینه پاسخ‌سازه برای ضرایب مختلف R .

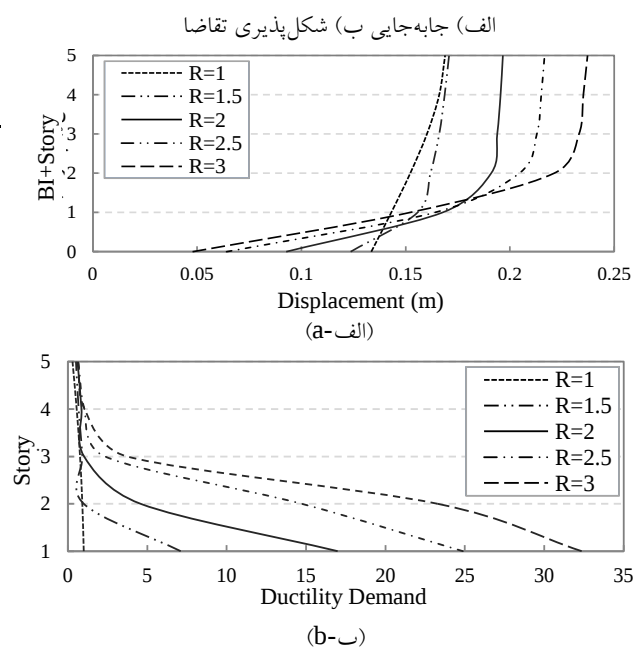


Fig. 10. Comparing the distribution a) max displacement b) ductility demand for various R factor.

شکل ۱۲. مقایسه‌ی الف) حداکثر جابه‌جایی بام، ب) بیشینه جابه‌جایی جداساز به ازای مقادیر مختلف سختی جداساز

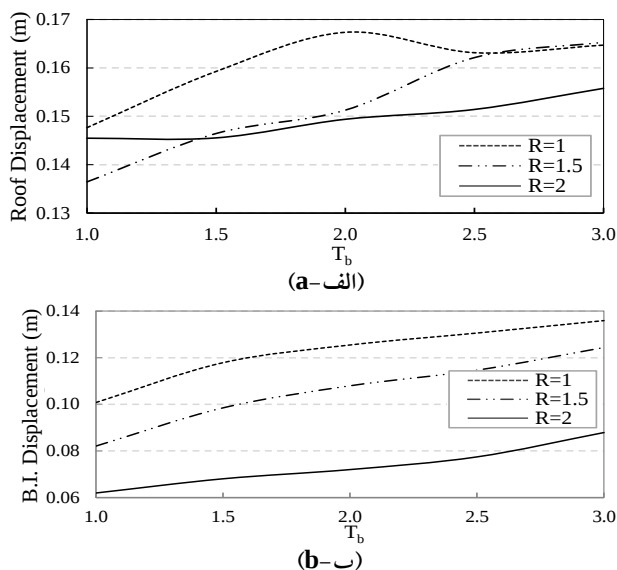


Fig. 12. Comparing the a) max roof displacement b) max BI displacement for various of base isolation system stiffness.

برای بررسی تأثیر تغییرات دوره تناوب جداساز بر توزیع شکل‌پذیری تقاضا در طبقات سازه، شکل (۱۳) ارائه شده است. شکل‌های (۱۳. الف و ب) به ترتیب تأثیر تغییرات سختی جداساز در توزیع شکل‌پذیری روسازه در حالات مختلف روسازه با R برابر ۱/۵ و ۲ را نشان می‌دهند. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، بیش‌ترین تقاضای شکل‌پذیری در طبقات پایین رخ داده که با غیرخطی شدن روسازه میزان تقاضا، افزایش شدیدی داشته است. با توجه به این‌که تأثیر سختی جداساز در دو نمودار زیر چندان مشهود نیست، شکل (۱۴) که همزمان میزان تغییرات سختی جداساز را برای حالات مختلف R برای بیشینه شکل‌پذیری کل روسازه نشان می‌دهد، ارائه شده است. با نرم‌تر شدن جداساز در حالتی که R برابر ۱/۵ است، تقاضای شکل‌پذیری تا حدود دوره تناوب ۲ ثانیه جداساز افزایش و سپس کاهش داشته، اما برای روسازه‌ی ضعیف‌تر میزان تقاضای شکل‌پذیری با افزایش دوره تناوب جداساز سیر صعودی داشته است؛ بنابراین دوره تناوب جداساز پارامتر مهمی برای کنترل شکل‌پذیری تقاضای سازه بر شمرده می‌شود.

با ضریب R برابر ۱/۵ و ۲ نیز دیده می‌شود، با این تفاوت که جابه‌جایی سیستم جداساز نسبت به حالت قبل کاهش داشته است. نکته‌ی مشترک دیگری که در سه حالت روسازه برقرار و در حالت روسازه الاستیک مشهودتر است، این است که با افزایش دوره تناوب جداساز، جابه‌جایی طبقات روسازه یکنواخت‌تر می‌شود. در شکل (۱۲) میزان بیشینه جابه‌جایی بام و جداساز به ازای مقادیر معرفی شده دوره تناوب در حالات مختلف ضریب R ارائه شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود با افزایش دوره تناوب جداساز، جابه‌جایی روسازه و جداساز افزایش داشته است.

شکل ۱۱. مقایسه‌ی توزیع جابه‌جایی سیستم الف) $R=1.0$ ب) $R=1.5$ ج) $R=2.0$

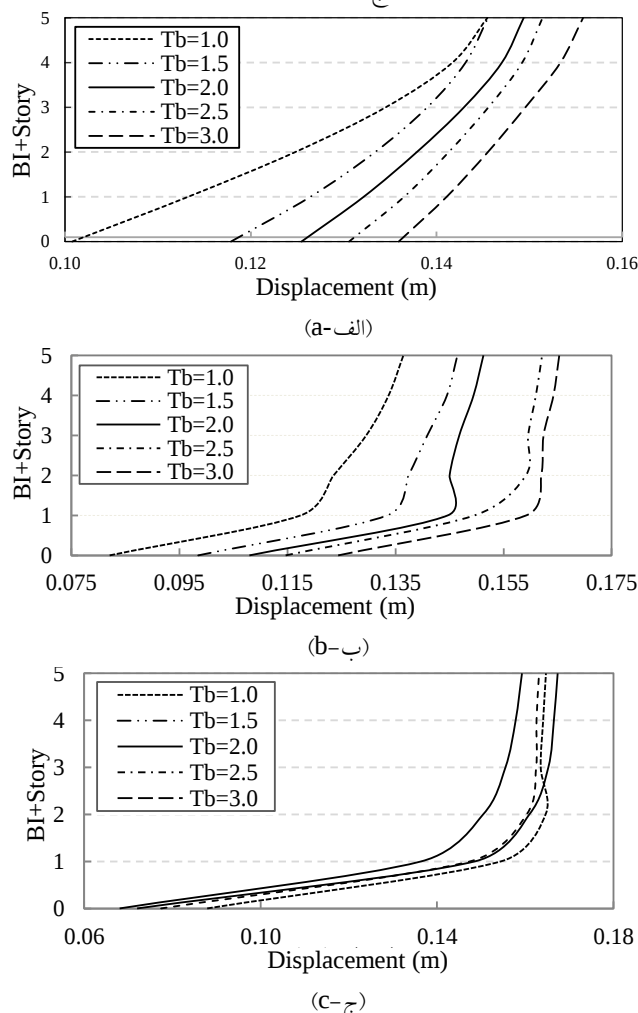


Fig. 11. Comparing the distribution of system displacement a) $R=1.0$ b) $R=1.5$ c) $R=2.0$

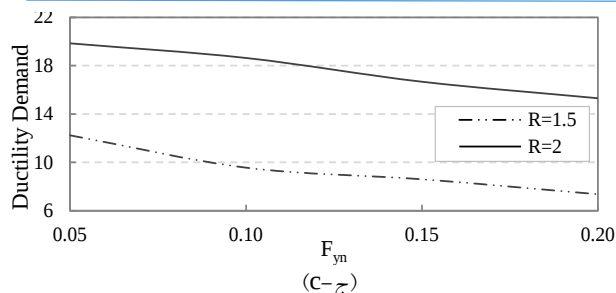


Fig. 15. Max. a) Roof disp. b) B.I. disp. c) ductility demand. for various of yield strength of base isolation

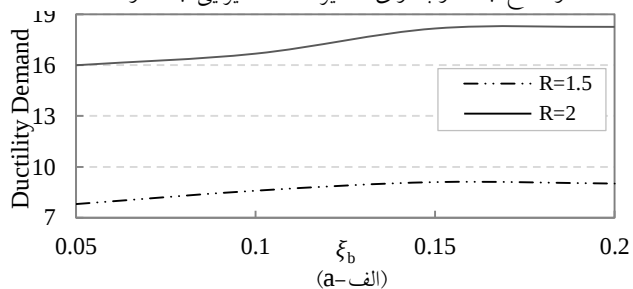
۳-۲-۵ تغییر نیروی تسلیم جداساز

برای ارزیابی تغییرات نیروی تسلیم جداساز، مقادیر مختلف $0/05$ ، $0/1$ ، $0/15$ و $0/2$ وزن سازه به عنوان نیروی تسلیم در نظر گرفته شده است. مطابق شکل‌های (۱۵-الف) و ب با افزایش مقدار نیروی تسلیم نرمال شده جداساز، میزان بیشینه جابه‌جایی بام و جداساز سیر نزولی داشته است. همچنین براساس شکل (۱۵-ج) با افزایش مقدار نیروی تسلیم نرمال شده جداساز، شکل‌پذیری تقاضای سازه با کاهش روبرو خواهد شد.

۴-۲-۵ تغییر نسبت میرایی جداساز

میزان بیشینه شکل‌پذیری سازه مربوط به مقادیر نسبت میرایی $0/05$ ، $0/1$ ، $0/15$ و $0/2$ برای جداساز توسط شکل (۱۶-الف) نشان داده شده است. نتایج برای ضرایب R برابر $1/5$ و 2 ارائه شده است. محور افقی نشان‌دهنده نسبت میرایی جداساز و محور قائم معرف بیشینه شکل‌پذیری تقاضا است. افزایش میرایی جداساز موجب فزونی شکل‌پذیری تقاضا در سازه شده است. همچنین مطابق شکل (۱۶-ب و ج) افزایش میرایی جداساز موجب کاهش جابه‌جایی بام و جداساز شده است.

شکل ۱۶. بیشینه (الف) شکل‌پذیری تقاضا (ب) جابه‌جایی بام (ج) جابه‌جایی در سطح جداساز به ازای مقادیر مختلف میرایی جداساز



شکل ۱۳. مقایسه‌ی توزیع شکل‌پذیری تقاضا، الف) $R=1.5$ ، ب) $R=2.0$

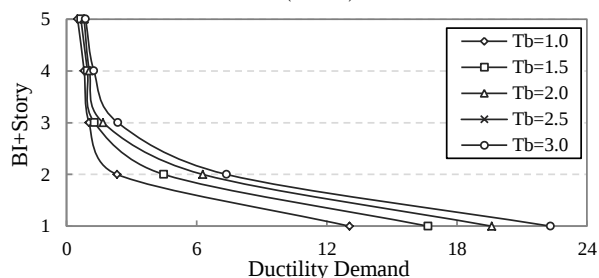
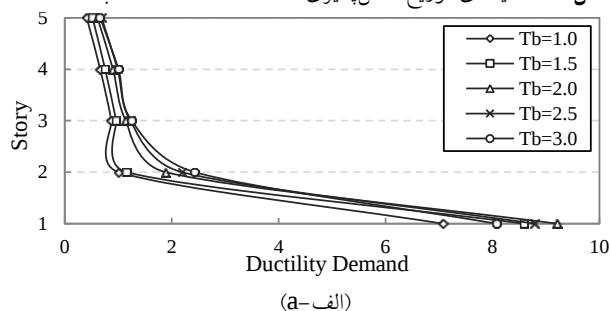


Fig. 13. Comparing the ductility demand distribution a) $R=1.5$, b) $R=2.0$

شکل ۱۴. بیشینه شکل‌پذیری تقاضا

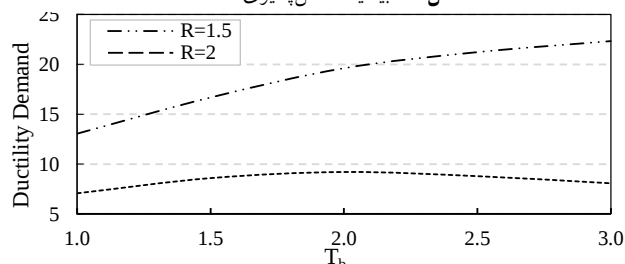
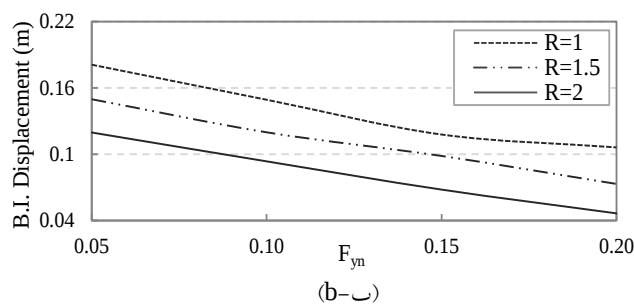
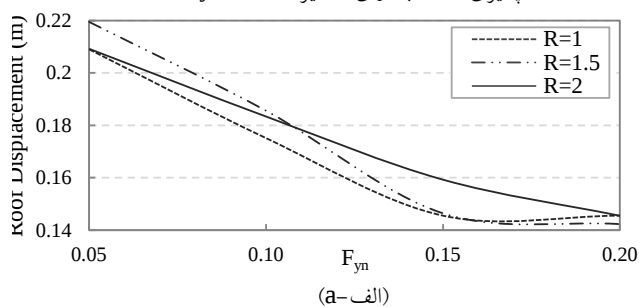


Fig. 14. Max. ductility demand.

شکل ۱۵. بیشینه (الف) جابه‌جایی بام (ب) جابه‌جایی جداساز (ج) شکل‌پذیری تقاضا به ازای مقادیر مختلف F_{yn}



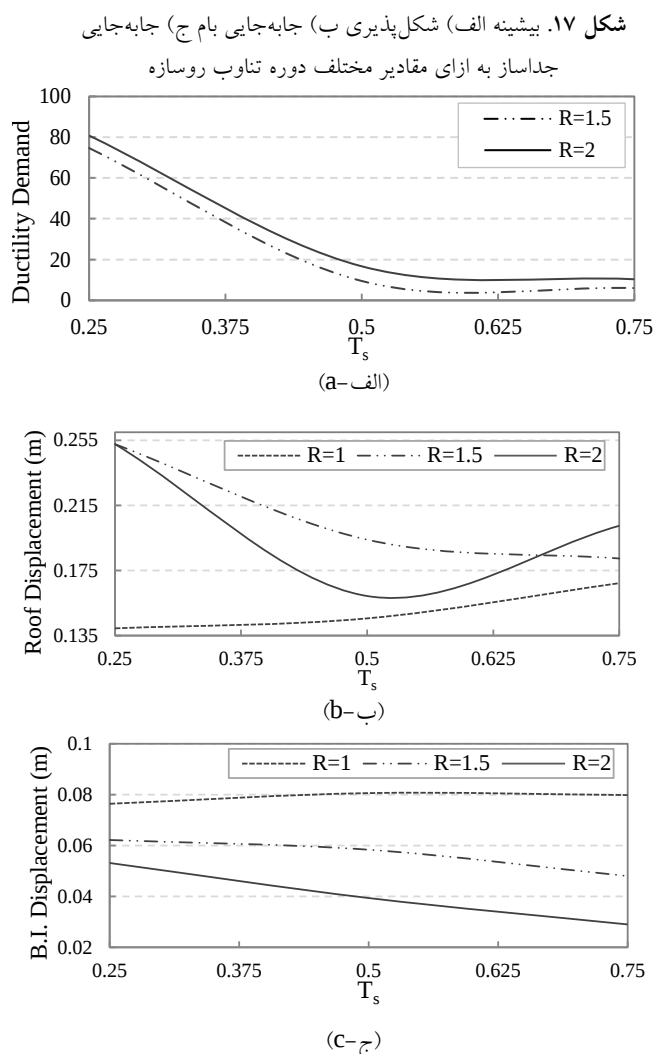


Fig. 17. Max. a) ductility demand. b) Roof disp c) B.I. disp. for various of period of super structure.

۶- نتیجه‌گیری

در این مقاله رفتار سازه‌ی غیرالاستیک متکی بر جداساز لرزه‌ای مورد مطالعه قرار گرفت که برای این منظور علاوه بر استفاده از مدل دو درجه آزادی با جداساز خطی، از مدل چند درجه آزادی همراه جداساز با فرم دوخطی نیز برای شبیه‌سازی رفتار روسازه استفاده شد. بر طبق نتایج، میزان تقاضای روسازه با ورود به حوزه رفتار غیرخطی نسبت به سازه پایه ثابت بسیار بیش‌تر خواهد بود. از همین‌رو طرح سازه‌های جداسازی شده بر اساس توصیه‌ی آیین‌نامه‌های موجود که اجازه ورود روسازه به حوزه غیر خطی را نمی‌دهند، منطقی است. در شرایطی که امکان ورود روسازه به حوزه غیرخطی وجود داشته باشد، باید تدابیر مناسبی اندیشیده شود. در ذیل بخشی از نتایج به طور خلاصه ارائه شده‌است:

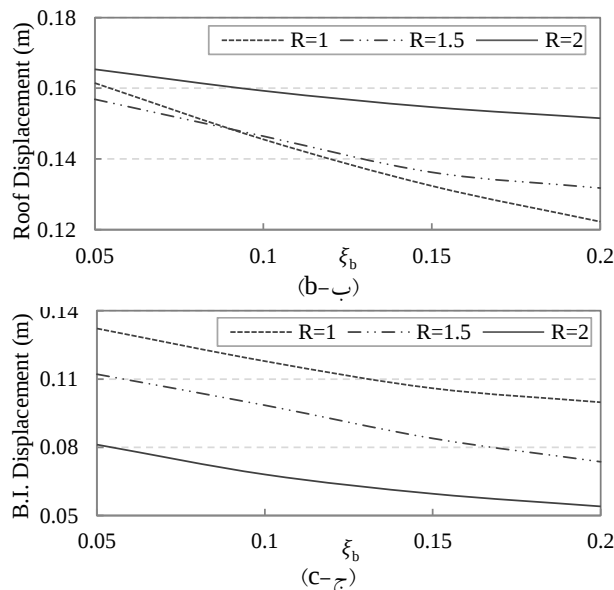


Fig. 16. Max. a) ductility demand. b) B.I. disp. c) Roof disp for various of damping of base isolation

۵-۲-۵ تغییر سختی روسازه

در این قسمت تأثیر تغییر دوره تناوب روسازه، مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. برای این منظور ۳ مقدار ۰/۲۵، ۰/۵ و ۰/۷۵ ثانیه برای دوره تناوب روسازه انتخاب شده‌است. شکل (۱۷-الف) تغییرات شکل‌پذیری تقاضای طبقات بر حسب دوره تناوب مربوط به روسازه را نشان می‌دهد. همان‌طور که ملاحظه می‌شود افزایش زمان تناوب روسازه موجب کاهش شدید شکل‌پذیری تقاضا شده‌است. مطابق شکل (۱۷-ب) که تغییرات جابه‌جایی بام بر اساس دوره تناوب مختلف روسازه را نشان می‌دهد، افزایش دوره تناوب روسازه‌ی با ضریب $R=1$ ، افزایش جابه‌جایی بام را به دنبال داشته و در حالتی که روسازه رفتار غیرخطی دارد، انعطاف‌پذیرتر شدن روسازه موجب کاهش جابه‌جایی بام می‌شود. تأثیر تغییر مقدار دوره تناوب روسازه بر میزان جابه‌جایی جداساز به ازای مقادیر مذکور برای ضریب R ، در شکل (۱۷-ج) نشان داده شده‌است. افزایش انعطاف‌پذیری روسازه (افزایش دوره تناوب از مقدار ۰/۲۵ به ۰/۷۵ ثانیه) در حالتی که ضریب R برابر یک است، افزایش نسبی جابه‌جایی در سطح جداساز را به دنبال خواهد داشت، اما در شرایطی که به ضریب R مقدار ۱/۵ و ۲ اختصاص داده شده‌است، افزایش دوره تناوب روسازه موجب کاهش جابه‌جایی جداساز شده‌است.

غیرخطی موجب کاهش میزان جابه‌جایی در سطح جداساز خواهد شد.

References

۷- منابع

- 1- Jain S. K., & Shashi K. T. 2004 Application of Base Isolation for Flexible Buildings. 13th World Conference on Earthquake Engineering, Canada.
- 2- Kelly J. M. 1986 Aseismic Base Isolation: Review and Bibliography. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 5, 202-16.
- 3- Matsagar V. A. & Jangid R. 2004 Influence of Isolator Characteristics on the Response of Base-Isolated Structures. Engineering structures, 26, 1735-49.
- 4- Jangid R. 2007 Optimum lead-Rubber Isolation Bearings for Near-Fault Motions. Engineering Structures, 29, 2503-13.
- 5- Pourzeynali S. & Zarif M. 2008 Multi-Objective Optimization of Seismically Isolated High-Rise Building Structures Using Genetic Algorithms. Journal of Sound and Vibration, 311, 41-60.
- 6- Thiravechyan P., Kasai K., & Morgan T. A. 2012 Response of base isolated structures considering inelastic behavior of superstructure, in Proc. 15th World Conference on Earthquake Engineering.
- 7- Vassiliou M. F., Tsiavos A. & Stojadinovic B. 2012 Dynamics of Inelastic Base Isolated Structures Subjected to Analytical Pulse Ground Motions. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 42, 2043-60.
- 8- Ordonez D., Foti D. & Bozzo L. 2003. Comparative Study of the Inelastic Response of Base Isolated Buildings." Earthquake engineering and structural dynamics, 32, 151-64.
- 9- Kikuchi M., Black C. J. & Aiken I. D. 2008 On the Response of Yielding Seismically isolated structures. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 37, 659-79.
- 10- Constantinou M. C. & Quarshie J. K. 1998 Response Modification Factors for Seismically Isolated Bridges, in *Technical Report MCEER*, ed: US Multidisciplinary Center for Earthquake Engineering Research (MCEER).
- 11- Somerville P., Anderson D., Sun J., Punyamurthula S. & Smith N. 1998 Generation of Ground Motion Time histories for Performance-Based Seismic Engineering. *Proceedings, 6th National Earthquake Engineering Conference, Seattle*.
- 12- Barroso L. R., Breneman S. E. & Smith H. A., 2002 Performance Evaluation of Controlled Steel Frames Under Multilevel Seismic Loads. *Journal of Structural Engineering, ASCE*, 128, 1368-78.
- 13- Tsiavos A., Vassiliou M. F., Mackie K. R. & Stojadinovic B., 2013 $R_y-\mu-T_n$ relations for seismically isolated structures, *4th ECCOMAS Thematic Conference on Computational Methods in Structural Dynamics and Earthquake Engineering, Kos Island, Greece, 12-14 June*.

تحلیل سیستم‌های دو درجه آزادی: می‌توان این نکته را متذکر شد که تسلیم روسازه از حرکت بیش‌تر جداساز جلوگیری می‌کند. با کاهش مقاومت روسازه، شکل‌پذیری مورد تقاضای روسازه افزایش می‌یابد. زمانی که $R \leq 1$ است، یعنی روسازه در محدوده الاستیک رفتار می‌کند، شکل‌پذیری معادل ضریب کاهش مقاومت برای هر جداساز با هر نسبت میرایی است. زمانی که $R \geq 1$ باشد، نیروی جانبی بر ظرفیت الاستیک غلبه می‌کند، در نتیجه تسلیم رخ خواهد داد. پس در این حالت پارامترهای جداساز یعنی نسبت میرایی و دوره تناوب جداساز تأثیرگذار می‌شوند. با نرم‌تر شدن جداساز (افزایش دوره تناوب)، شکل‌پذیری افزایش می‌یابد. این در حالی است که افزایش نسبت میرایی آن، به خصوص در دوره تناوب‌های بالا اثر کمی در کاهش شکل‌پذیری مورد تقاضا دارد. از پارامترهای روسازه و جداساز که موجب افزایش میزان تقاضای شکل‌پذیری می‌شوند، می‌توان به سختی روسازه و جداساز اشاره داشت. کنترل نسبت این دو مشخصه، می‌تواند کلید حل مشکل برای حالتی باشد که روسازه به نسبت ضعیف است.

تحلیل سیستم‌های چند درجه آزادی: در این حالت نیز با غیرخطی شدن رفتار روسازه (تغییر ضریب R)، میزان شکل‌پذیری تقاضا به شدت افزایش می‌یابد که این امر می‌تواند با تغییر پارامترهایی از جداساز و روسازه افزایش یا کاهش یابد. در تمامی حالات (ضرایب مختلف R)، انتخاب جداساز با دوره تناوب کم‌تر (جداساز سخت‌تر) و همچنین جداساز با نیروی تسلیم نرمال شده‌ی کم‌تر (جداساز با رفتار خطی‌تر) هر دو منجر به کم‌ترین مقدار جابه‌جایی جداساز و شکل‌پذیری تقاضا در روسازه شده‌است. افزایش سطح نسبت میرایی جداساز عاملی بر افزایش نسبی شکل‌پذیری تقاضا در روسازه خواهد شد که مطابق انتظار طبق این روند از میزان جابه‌جایی جداساز کاسته می‌شود.

روسازه‌ی نرم‌تر (دوره تناوب بیش‌تر) با رفتار غیرخطی، شکل‌پذیری تقاضای به مراتب کم‌تری به نسبت سازه‌ی مشابه سخت‌تر خواهد داشت، ولیکن در شرایطی که روسازه در حوزه‌ی خطی رفتار می‌کند، تغییرات دوره تناوب روسازه با میزان جابه‌جایی جداساز هم‌سو است و برای روسازه با رفتار

- 14-Mirbod A. R., Daei M., & Tajmir Riahi H., 2017 Development of R- μ relation for the seismically base isolated structures using modified ABC algorithm. *Iran University of Science & Technology*. 7(1), 25-44. <http://ijoce.iust.ac.ir/article-1-282-en.html>
- 15-Moghaddam H. & Mohammadi. R. K. 2006 More Efficient Seismic Loading for Multidegrees of Freedom Structures. *Journal of Structural Engineering*. 132(10).
- 16-Moghaddam H., & Hajirasouliha. I., 2004 A new approach for optimum design of structures under dynamic excitation, *Asian Journal of Civil Engineering*, 5, 69-84.

Investigation of the effect of nonlinear behavior of superstructure on seismic performance of base-isolated structures

Ahmad Reza Mirbod¹, Hossein Tajmir Riahi^{2*} and Maryam Daei²

1. PhD Candidate, Faculty of Civil Engineering & Transportation, University of Isfahan, Iran

2. Assistant Professor, Faculty of Civil Engineering & Transportation, University of Isfahan, Iran

*tajmir@eng.ui.ac.ir

Abstract:

In the design of seismically base-isolated structures, it is expected that the isolator will experience nonlinear behavior while the superstructure still behaves linearly. Therefore for modeling these systems, a linear behavior is assumed for superstructure and different nonlinear models are used for isolator. In seismic codes; strength reduction factor has been considered relatively small for base-isolated structures which put the seismic structural response in elastic area. But there are special conditions such as strong ground motions in which superstructure behave nonlinearly. In this study, the nonlinear behavior of seismically base-isolated structures is more accurately investigated. This is done using nonlinear time history analysis of structures using ground motions. Two sets of ground motions are selected which represent earthquakes with 475 and 2475 years return period. The ground motion records have been scaled so that those are matched to NEHRP1997. OpenSees and Matlab softwares are used for modeling these structures. Among the most applicable parameters of the structural response is drift of stories. However, since ductility in shear frames is frequently used as a damage index, in the present study, the ductility of the stories was selected as the damage index of the structure. Therefore, the ductility μ which is defined as the ratio of the maximum deformation of the structure in the non-linear situation to the displacement of the yield point. The effective parameters on the response of seismically base isolated structure which are investigated are: response modification factor of the superstructure, stiffness of the isolator, damping ratio of the isolator, stiffness of the superstructure and damping ratio of the superstructure. Studies of this paper are divided into two parts. In the first part, two-degree freedom model with viscoelastic isolator has been used to investigate the effect of superstructure nonlinearity. Also a sensitivity analysis is done to find important parameters which have more effects on the systems response. Results of this part show that, nonlinear behavior of superstructure increases system ductility demand drastically. It is concluded that the period of isolator and superstructure have the most effect on the ductility demand. In the second part, the effect of different parameters and higher mode effects on the response of seismically base-isolated structures is investigated using multi-degree of freedom models sited on isolator with bilinear behavior. Results obtained in this part also confirm the increase in the response of the system when the superstructure has low strength. Likewise in this condition, the isolator deformation decreases. Distribution of ductility demand in the height of structure is also non-uniform in this condition and lower stories are more vulnerable. Isolators with a lower fundamental period and also isolators with a lower yield force lead to the least amount of isolator deformation and ductility demand of superstructure. By increasing damping in the isolator, ductility demand of superstructure will increase. A stiffer superstructure with nonlinear behavior has a much more ductility demand rather than similar structure which is more flexible. But when the superstructure behaves linearly, the fundamental period of superstructure and isolator deformation increase or decrease together.

Keywords: Base-isolation system, Superstructure, Nonlinear behavior, Ductility Demand.