مجله علمی – پژوهشی
عمران مدرس
دوره شانزدهم، شماره ٤، سال ١٣٩٥

میزان درز انقطاع برای سازه‌های جداسازی شده لرزه‌ای تحت زلزله‌های حوزه نزدیک

مجتبی جانی[1]، بنیامین محبی[2*]

١- کارشناسی ارشد مهندسی عمران – سازه، دانشگاه بین المللی امام خمینی (ره)
٢- استادیار، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه بین المللی امام خمینی (ره)

mohebi@eng.ikiu.ac.ir

تاریخ دریافت: [١٣٩٣/٦/١٩] تاریخ پذیرش: [١٣٩٤/٥/٢١]

چکیده- یکی از پدیده‌های همراه زلزله، ضربه ساختمان‌های مجاور به یکدیگر است. برای حذف یا کاهش خسارت و خرابی ناشی از ضربه ساختمان‌های مجاور به یکدیگر، باید ساختمان‌ها با پیش‌بینی درز انقطاع از یکدیگر جدا شده و یا با فاصله‌ای حداقل از مرز مشترک، ساخته شوند. در این میان رکوردهای حاصل از زلزله‌های حوزه نزدیک به جهت نزدیکی فاصله محل منبع انتشار موج دارای خواص ویژه‌ای است که رفتار آنها را از سایر رکوردها متفاوت می‌سازد. آیین‌نامه زلزله ٢٨٠٠ ایران اشاره‌ای به زلزله‌های حوزه نزدیک نکرده است و طیف طرح ٢٨٠٠ بسیار نزدیک به طیف پاسخ زلزله‌های حوزه دور است. از طرفی یکی از روش‌های نوین برای کاهش آثار زلزله در سازه‌ها، استفاده از جداگرهای لرزه‌ای است. در این پژوهش تأثیر وجود جداگر برای پیش‌بینی میزان درز انقطاع در رفتار سازه‌های بتنی قاب خمشی (متوسط) در نزدیک گسل بررسی شده است، به این منظور مدل‌های دو بعدی با دهانه‌های یکسان و تعداد طبقات متفاوت (قاب‌های ٢، ٤، ٦ ، ٨ ، ١٠ ، ١٥ طبقه) که معرف سازه‌های کوتاه، متوسط و بلند مرتبه می‌باشد در نظر گرفته شده است. نتایج بیانگر آن است که میزان درز انقطاع لازم برای اینگونه سازه‌ها بیشتر از مقدار پیش‌بینی شده در آیین نامه ٢٨٠٠ است.

واژگان کلیدی: درز انقطاع، سازه‌های جداسازی شده، زلزله حوزه نزدیک، جداساز.

١- مقدمه

١-١- معرفی

یکی از مدرن‌ترین وپیشرفته‌ترین روش‌های طراحی لرزه‌ای ومقاوم‌سازی استفاده از جداساز پایه است. هر چند که ایده استفاده از عایق ارتعاشی به عنوان وسیله‌ای برای ابنیه در مقابل زلزله بیش از یکصد سال قدمت دارد، تا قبل از سال‌های اخیر تنها تعداد انگشت‌شماری از سازه‌ها با استفاده از این روش ساخته شده بودند [١].

مسئله اصلی که در طراحی سازه برای تأمین مقاومت لرزه‌ای آن وجود دارد به حداقل رساندن خسارت‌های وارد شده به سازه و همچنین اجزاء غیرسازه‌ای آن است. این مسئله می‌تواند با کاهش تغییرمکان بین طبقه‌ای و شتاب طبقات سازه صورت پذیرد چرا که تغییرمکان بین طبقه‌ای زیاد موجب خسارت دیدن عناصر سازه‌ای و شتاب بالای طبقات باعث خسارت دیدن اجزاء غیرسازه‌ای می‌شود [٤]. تغییرمکان بین طبقه‌ای را می‌توان با افزایش سختی سازه کاهش داد که درنتیجه‌ی آن شتاب طبقات بالا می‌رود. شتاب طبقات را نیز می‌توان با کاهش دادن سختی سازه و نرم کردن سیستم سازه-ای پایین آورد که در نتیجه آن تغییرمکان بین طبقه‌ای زیاد می‌شود. بنابراین باید از سازوکاری استفاده کرد که این دو عامل را به طور همزمان کاهش دهد [١١]. یکی از گسترده-ترین سیستم‌های حفاظت لرزه‌ای قابل قبول و به کاربرده شده در سازه‌ها، جداسازهای لرزه‌ای پایه است [٢].

مفهوم جداساز لرزه‌ای بسیار ساده است، سیستم جداساز با انعطاف‌پذیری افقی که بین سازه و پی ایجاد می‌کند سازه را از مؤلفه‌های افقی زلزله جدا می‌سازد [٢]. سازوکار اصلی

سیستم‌های جداساز شامل دو قسمت است: افزایش زمان تناوب اصلی سازه، ایجاد میرایی اضافی برای استهلاک انرژی وارد شده. این دو مشخصه می‌تواند به ترتیب شتاب طبقات و تغییرمکان بین طبقه‌ای را کاهش دهد [۱۱]. امروزه سازه‌های بسیاری در دنیا با سیستم جداسازی لرزه‌ای ساخته می‌شوند، نخستین سازه‌ای که به روش نوین جداساز در فونداسیون ساخته شد در سال ۱۹۷٤ در نیوزلند بود. همچنین نخستین سازه از این نوع در ایالات متحده در سال ۱۹۸٤ و در ژاپن در سال ۱۹۸۵ ساخته شد [۳].

۱,۲. پیشینه‌ی پژوهش در مورد سازه‌های جداسازی نزدیک گسل

زلزله‌هایی که در نزدیکی گسل‌ها اتفاق افتاده‌اند خسارات زیادی را به بار آورده‌اند. خسارات فراوان این زمین‌لرزه‌ها، متفاوت بودن پارامترهای زمین در زلزله‌های نزدیک گسل و نیز متفاوت بودن رفتار سازه‌ها در نزدیکی گسل باعث شده زلزله‌های حوزه نزدیک از هردو دیدگاه مهندسی زلزله وزلزله‌شناسی اهمیت بسیار داشته باشند [۱۵]. در سال‌های گذشته مطالعات زیادی روی رفتار سازه‌ها در نزدیکی گسل انجام شده است، به گونه‌ای که هرکدام از یک منظر به این موضوع پرداخته و آثار حوزه نزدیک را مطالعه کردند.

در سال ۱۹۸۷ اندرسون و برترو رفتار این سازه‌ها را تحت حرکت‌های پالسی زمین مورد مطالعه قرار دادند، به این منظور یک سازه فولادی ۱۰طبقه و۳ دهانه را تحت زلزله امپریال ولی (۱۹۷۹) بررسی کرده و نشان دادند که زلزله‌های نزدیک گسل باعث افزایش نیاز شکل‌پذیری سازه‌های صلب می‌شود[۳]. هال در سال ۱۹۹۵ با طراحی سازه‌هایی بر اساس آیین‌نامه‌های رایج و بررسی رفتار آنها در زلزله‌های حوزه نزدیک، ملاحظه کرد که نیاز تحمیلی به سازه‌های ایزوله شده و سازه‌های با پریود بلند و انعطاف پذیر، به شکل قابل ملاحظه‌ای از ظرفیت آنها تجاوز می‌کند. چوپرا در سال۱۹۹۸ نتیجه گرفت آنالیزهای طیف پاسخ برای کاربردهای مهندسی، صحیح است و این آنالیزها را به آنالیزهای طیف جابه‌جایی نسبی تغییرمکان ترجیح داد [٤]. درسال۲۰۰۱، لیو و همکاران برای بررسی ویژگی‌های پاسخ غیرخطی قاب‌های بتنی تحت زلزله‌های نزدیک گسل دو قالب خمشی۵ و ۱۲ طبقه را بر اساس آیین‌نامه ساختمانی تایوان طراحی کردند و تحت ٤ نگاشت نزدیک گسل از زلزله چی‌چی تایوان و تعدادی نگاشت از مناطق دیگر جهان تحلیل کردند. در این مطالعه مشخص شد که تغییرمکان نسبی در هر دو سازه ۵ و ۱۲ طبقه تحت زلزله‌های نزدیک گسل بیشتر از زلزله‌های دور از گسل است. درسال ۲۰۰۳ الشیخ و همکاران اثر زلزله‌های نزدیک گسل را بر روی قاب‌های بتنی ۳، ٦، ۱۲ و ۲۰ طبقه مطالعه کردند. نتایج حاصل از تحلیل باراستاتیکی افزاینده و تحلیل دینامیکی نشان دادند که برای برش پایه ثابت، تغییرمکان به دست آمده از روش بار افزاینده محافظه کارانه‌تر از روش تحلیل دینامیکی است، همچنین مشخص شد که روش استاتیکی بارافزاینده برای طراحی براساس تغییرمکان، برای سازه‌های تحت زلزله‌های نزدیک گسل مناسب‌تر است [۳]. در سال ۲۰۰۵، چوی، کیم، چون و سو به منظور بررسی ایمنی نیروگاه هسته‌ای کره در نزدیک گسل، یک قاب ۲ طبقه سه بعدی با پریود اصلی معادل با سازه‌های نیروگاه اتمی ساختند و با ورودی‌های مختلف روی میز لرزان مورد آزمایش قرار دادند. نتایج نشان دادند ورودی‌های زلزله که در چند جهت اثر می‌کند، همیشه باعث یک پاسخ بزرگتر در سازه‌های معمولی نمی‌شود و از پاسخ شتاب نمونه فولادی مشاهده‌شد که زلزله‌های نزدیک گسل همیشه باعث یک پاسخ بزرگ نمی‌شوند. با توجه به این مطلب، به نظر می‌آید که اثر زلزله‌های نزدیک گسل روی سازه‌های نیروگاه اتمی در محدوده خطی یا الاستیک، تا اندازه‌ای ناچیز بوده است [۱٦].

به تازگی در ایران نیز پژوهش‌های گسترده‌ای در خصوص استفاده از سیستم لغزشی خالص صورت پذیرفته است که بیشتر بر پایه‌ی آنالیز دینامیکی قاب‌های دوبعدی و مدل سازی‌های آزمایشگاهی روی میز لرزان استوار بوده و در آن سعی شده است تا ضمن اثبات فواید سیستم لغزشی، بهترین ماده برای کاربرد به عنوان لایه‌ی لغزنده تعیین شود. از مهمترین این پژوهشها می‌توان به مطالعات حسنی و همکاران [۱۳] اشاره کرد.

در این پژوهش سعی شده است که با بررسی اثر به دست آمده از استفاده فناوری جداسازی پایه در سازه‌های بتنی،

میزان بیشینه تغییرمکان سازه دارای جداساز و سازه بدون جداساز تحت زلزله‌های حوزه نزدیک و دور بررسی شود و میزان درز انقطاع مورد نیاز برای اینگونه سازه‌ها محاسبه و با مقادیر موجود در آئین‌نامه مقایسه شود. با استفاده از نتیجه این پژوهش می‌توان کفایت مقادیر ارائه شده در آئین‌نامه را برای حالات مختلف بررسی کرد.

۲- انواع جداساز

جداسازی لرزه‌ای عبارت است از جداکردن کل یا بخشی از سازه از زمین یا قسمتهای دیگر سازه به منظور کاهش پاسخ لرزه‌ای آن بخش در زمان رویداد زلزله [۱]. سازه‌های جداسازی شده نسبت به سازه‌های عادی و سنتی دارای جابه‌جایی بسیار کمتری در بام است [٤]. به طور کلی جداسازهای لرزه‌ای را می‌توان به دو دسته‌ی جداسازهای لاستیکی و جداسازهای اصطکاکی تقسیم‌بندی کرد. جداسازهای زیر از جداسازهای لاستیکی به شمار می‌روند:

-جداسازهای لاستیکی با ورقه‌های فولادی (و میرایی کم)

-جداسازهای لاستیکی با میرایی زیاد

-جداسازهای لاستیکی با هسته‌ی سربی

از جداسازهای اصطکاکی به طور عمده جداسازهای زیر در صنعت تولید می شوند:

-جداسازهای اصطکاکی

-جداساز های الاستیک اصطکاکی

- جداسازهای اصطکاکی پاندولی

برای استفاده‌ی همزمان از قابلیت‌های جداسازهای لاستیکی و اصطکاکی، این دو سامانه در موارد زیر با هم ترکیب شده اند:

-ترکیب سری جداسازهای اصطکاکی و لاستیکی

-ترکیب موازی جداسازهای اصطکاکی و لاستیکی [۱].

در فاصله‌ی نزدیک از کانون زلزله به دلیل آثار نزدیکی به گسل، وجود فرکانس‌های ارتعاشی کوتاه در ارتعاشات زلزله و وجود اثر ضربه‌ای در تحریکات ناشی از زلزله، عملکرد جداسازی لرزه‌ای پیچیده‌تر شده و باعث عدم قطعیت در کارکرد مناسب آن می‌شود [۵]. از این رو در مواردی که سازه‌ی مطالعه شده در فاصله‌ی نزدیکی از گسل فعال و با احتمال بالای فعالیت در طول عمر پیش‌بینی شده‌ی سازه قرار گرفته باشد و همچنین با توجه به احتمال وجود تجهیزات و دستگاه های حساس به شتاب در داخل سازه مانند دستگاه های ابزار دقیق و رایانه‌ها باید اثر تغییر مکانی حاصل از شتاب قائم زلزله به طور خاص مورد توجه قرار گیرد [١٤]. برای عملکرد مناسب‌تر سامانه‌ی جداسازی لرزه‌ای لازم است سهم عمده‌ی پاسخ سازه در مود اول حرکت آن قرار گیرد. افزایش سهم مودهای بالاتر باعث کاهش تاثیر جداسازی لرزه‌ای در عملکرد لرزه‌ای سازه می‌شود. یا به اصطلاح با "لاغرتر شدن ساختمان"، که به مفهوم افزایش دوره‌ی تناوب طبیعی آن است، سهم مودهای بالاتر ارتعاشی سازه افزایش می‌یابد، افزایش ارتفاع ساختمان در حالت کلی متناظر با افزایش دوره‌ی تناوب طبیعی آن است. در جداسازی لرزه‌ای ساختمان‌ها با نزدیک شدن دوره‌ی تناوب مودهای ارتعاشی در سازه بدون جداسازی لرزه‌ای به مود ارتعاشی سازه‌ی جداسازی شده، تاثیر روش جداسازی لرزه‌ای کاهش می‌یابد [۱].

۳- ویژگی‌های زلزله دور و نزدیک

زلزله حالت خاصی از تغییر شکل توده‌های سنگی است که در آن پدیده‌های گسیختگی در مقیاس متفاوت رخ می‌دهد. یا هر نوع لرزش زمین در اثر عبور امواج لرزه‌ای را زلزله گویند [۱۹].

۱,۳. زلزله حوزه دور

هنگام وقوع زلزله ویژگی‌های ارتعاشی هریک از نقاط زمین تابع بزرگای زلزله، فاصله منطقه از مرکز رهاشدن انرژی و ویژگی‌های زمین‌شناختی (اثر ساختگاه) است [۱۱]. در زلزله‌های حوزه دور از گسل (Far Field) کاهش شتاب تحت تأثیر بزرگی زلزله است [۱۹]. جداسازهای لرزه‌ای در زلزله‌های دور از گسل (FF) عملکرد مناسبی دارند. بطور کلی پیش‌بینی رفتار این نوع زلزله‌ها به واقعیت نزدیک‌تر است [٦]. آیین‌نامه زلزله ۲۸۰۰ ایران اشاره‌ای به زلزله‌های حوزه نزدیک نکرده است و طیف طرح ۲۸۰۰ بسیار نزدیک به طیف پاسخ زلزله‌های حوزه دور است.

۲,۳. زلزله حوزه نزدیک

محدوده نزدیک گسل معمولاً در داخل محدوده‌ای بین ۱۵ تا ٦۰ کیلومتری از گسل فعال فرض می‌شود [۱۹]. رکوردهای حاصل از زلزله‌های حوزه نزدیک به لحاظ نزدیکی فاصله محل منبع انتشار موج دارای خواص ویژه‌ای است که رفتار آنها را از سایر رکوردها متفاوت می‌سازد. زلزله‌های حوزه نزدیک دارای شتاب بالاتر و محتوای فرکانسی محدودتری در فرکانس‌های بالا نسبت به حوزه دور است. نگاشت این زلزله-ها، به ویژه زمانی که تحت انتشار گسلش قرار می‌گیرند، دارای پالس‌های پریود بلند با دامنه بزرگ است که بیشتر در ابتدای رکورد زلزله دیده می‌شود [۵]. برخی مطالعات نشان می‌دهد که رکوردهای زلزله‌های نزدیک را می‌توان به دو بخش، با ضربان و بدون ضربان تقسیم‌بندی کرد، که در بعضی مواقع، پدیده ضربان در تاریخچه شتاب، سرعت و تغییرمکان یکی از ویژگی‌هایی است که زلزله حوزه نزدیک را از زلزله حوزه دور متمایز می‌کند. ضربان در زمین‌لرزه به صورت ضربان شتاب، سرعت و جابه‌جایی است که می‌توان آنها را به تغییرات بزرگ در تاریخچه‌های شتاب، سرعت و جابه‌جایی تعریف کرد اما در حالت کلی نکته حائز اهمیت در زلزله‌های حوزه نزدیک پالس سرعت و تغییرمکان است. شکل (۱) تاریخچه‌های شتاب، سرعت و جابه‌جایی را برای سه حرکت زمین نزدیک گسل مصنوعی سیلمار و امپریال ولی و السنترو نشان می‌دهد. چنانچه در شکل (۱) مشاهده می‌شود، در زلزله‌های نزدیک گسل، حرکت زمین بر اثر گسل مصنوعی سیلمار و امپریال ولی با ضربان و بر اثر گسل السنترو، بدون ضربان است [۲].

به دلیل نزدیکی محل تا گسل، رکورد حاصل از سرعت و جابه‌جایی زمین به لحاظ اینکه نسبت به شتاب دارای شکل پالس مانند و پریود بالاتر، که یادآور تحریکی به صورت ضربه است. در زمین‌لرزه‌های حوزه نزدیک به لحاظ فاصله کوتاه بین محل شکست (منبع تولید موج) و محل دریافت آن فرصتی جهت مستهلک شدن فرکانس‌های بالا نبوده، از همین رو تاریخچه زمانی شتاب آنها محتوای فرکانسی بالایی دارند [۱۲]. همان‌گونه که پیش‌تر نیز گفته شد در زلزله‌های حوزه دور از گسل کاهش شتاب تحت تأثیر بزرگی زلزله است، پس در حوزه نزدیک گسل، کاهش شتاب تنها در زلزله‌های با شدت کم و نه برای زلزله‌های با شدت بالا، اتفاق می‌افتد [۱۹]. این معضل یکی از مهمترین مسائل در رابطه با زلزله-های نزدیک گسل است از این رو برای زلزله‌های نزدیک گسل، می‌توان از جداسازهای لاستیکی- سربی که یکی از رایج‌ترین انواع جداسازها است، استفاده نمود [٦].

شکل ۱- تاریخچه شتاب، سرعت و جابجایی برای حرکت زمین، نزدیک گسل [۲]

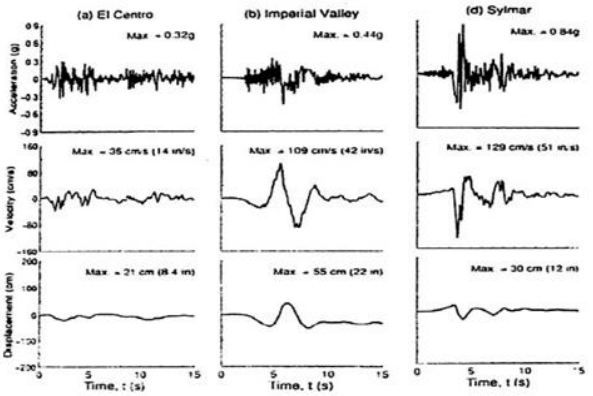

Fig. 1. Near-fault acceleration, velocity and displacement records [2]

۳,۳. جداسازی در حوزه نزدیک

جداسازهای لرزه‌ای در زلزله‌های دور از گسل عملکرد مناسبی دارند ولیکن در رابطه با زلزله‌های حوزه نزدیک با توجه به نیاز لرزه‌ای بالا، ناچار به استفاده از جداسازهای با ابعاد بزرگ و پرهزینه است. ممکن است در ارزیابی اولیه، استفاده از این گونه جداسازهای با ابعاد بزرگ، در تناقض با فلسفه‌ی بحث اقتصادی و مقاوم سازی لرزه‌ای در مقایسه با سایر روش‌های مقاوم سازی باشد ولیکن با توجه به اینکه سرعت بیشینه پالس‌ها و تکانه‌های وارد به سازه به حدود ۰,۵ متر بر ثانیه و مدت اعمال ۱ تا ۳ ثانیه می‌رسد، استفاده از این روش و توجیه این گونه از جداسازها امکان پذیر می‌شود [۱۵].

٤. مدلسازی

همان‌گونه که پیش‌تر اشاره شد، در این پژوهش تأثیر وجود جداگر برای پیش‌بینی درز انقطاع در رفتار سازه‌های بتنی قاب خمشی (متوسط) در نزدیک گسل بررسی شده است، به این

منظور مدل‌های دو بعدی با دهانه‌های یکسان و تعداد طبقات متفاوت که معرف سازه‌های کوتاه، متوسط و بلند مرتبه است را در نظر گرفته‌ایم. برای مدلسازی اولیه قاب‌ها از نرم افزار ETABS و SAP استفاده شده است. قاب‌های استفاده شده بتنی بوده و جزئیات آنها در ادامه به تفصیل آمده است. برای تحلیل دینامیکی غیرخطی از نرم افزار قدرتمند OpenSees که یک برنامه منبع آزاد، استفاده شده است.

ابتدا سازه‌ها بدون اعمال جداگر و بر اساس آیین‌نامه مقررات ملی ساختمان ایران طراحی و بارگذاری شده، مقاطع مناسب برای آنها به دست آمده و نیروها در اعضا محاسبه شده است. سپس برای هر شش سازه جداگرهای مناسب طراحی و به آنها اعمال شده است (با حفظ مقاطع قبلی) دوباره نیروها در اعضا محاسبه و با حالت قبل مقایسه شده است و در مورد مثبت بودن یا نبودن اعمال جداگر به سازه قضاوت شده است. سپس مدل‌های ٤ و ۸ طبقه دوباره با جداساز طراحی شده (مقاطع جدید و کوچکتر از حالات قبل) را دوباره تحت زلزله قرار داده و با دو حالت فوق مقایسه شد. در نهایت در جابه‌جایی مطلق و تغییرمکان جانبی نسبی سه حالت فوق، قضاوت شده و بازه‌ای از تغییرمکان حداکثری را که به ازای آن، اعمال جداگر تأثیر مناسب دارد، ارائه شده است.

۱,۴. انتخاب شتاب نگاشت‌ها

بر اساس مقررات ملی ساختمان باید رکوردهای انتخابی از نظر بزرگا، سازوکار گسلش و فاصله گسل تا محل ثبت با ساختگاه مورد نظر، هماهنگی داشته باشد. اگر رکوردهای مورد نیاز وجود نداشته باشند، می‌توان از رکوردهای اصلاح شده یا مصنوعی استفاده کرد [۷ و ۹]. تعداد رکوردهای مورد استفاده وچگونگی اصلاح رکوردها برای هماهنگی با شرایط موجود، سوالات مهمی است. برای این پژوهش انتخاب رکوردهای زلزله بر اساس توصیه FEMA P695 [۱۸] صورت گرفته که در آنجا ۲۲ رکورد زلزله برای حوزه دور و ۲۸ رکورد برای حوزه نزدیک گفته شده است. همچنین با توجه به عنوان پژوهش واهمیت نتایج در حوزه نزدیک و احساس نیاز به جامعه آماری بزرگتر در رکوردهای نزدیک گسل، یک سری رکورد حوزه نزدیک به ۲۸ رکورد گفته شده اضافه شد. برای انتخاب رکورد می‌توان از جستجوگر موجود در PEER استفاده کرد.

۲,۴. مقیاس شتاب نگاشت‌ها

در مقایسه طیفی و آیین نامه‌ای زلزله‌ها، دوره بازگشت مورد نظر باید برای طیف‌های پاسخ و طیف طرح آیین‌نامه‌ای یکسان باشد. به عبارت دیگر برای بررسی میزان اثر گذاری هر زلزله بر سازه و ارزیابی لرزه‌ای ساختمان‌ها لازم است که طیف‌های پاسخ با طیف‌های طرح مربوطه به دوره بازگشت مشخص سازگار یا مقیاس شوند [۷].

برای مقیاس کردن، از نرم افزار SeismoSignal استفاده شد و تمام رکوردها برای تمام حالات مقیاس شد:

شکل۲- مقایسه برای هر دو حالت دور و نزدیک

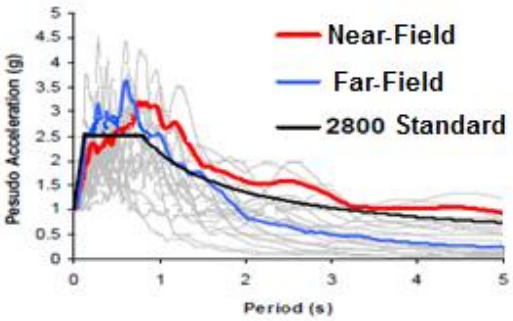

Fig. 2. Comparison of near-field and far-figure response spectra

۳,٤. قاب‌ها

۱,۳,۴ مشخصات قاب‌ها

در این پژوهش شش سازه بتنی بررسی شده است، که هر یک دارای سیستم قاب خمشی در هر دو جهت است. این سازه‌ها در منطقه با خطر نسبی زلزله بسیار زیاد با کاربری مسکونی و بر روی خاک نوع II قرار گرفته‌اند، از هر سازه یک قاب جدا شده و در مجموع هر شش قاب به صورت دو بعدی به مشخصات زیر در نرم افزار OpenSees تحلیل شده است.

تعداد طبقات عبارتند از ۲، ٤ ، ٦ ، ۸ ، ۱۰ و ۱۵ طبقه که به ترتیب بیانگر ساختمان‌های کوتاه، متوسط و بلند است. همه قاب‌ها دارای ٤ دهانه به طول ۵ متر، ارتفاع طبقه اول ٤ متر و ارتفاع سایر طبقات ۳ متر است.

مشخصات کلی سازه‌ها در جدول (۱) گفته شده است.

جدول۱- مشخصات قاب‌های مطالعه شده

Frame	Total Elevation [m]	Span Length [m]	Base Acceleration	Soil Type	Lateral Force Resisting System
2 Story	7	5	0.35 g	II	Intermediate Moment Resisting Frame
4 Story	13	5	0.35 g	II	Intermediate Moment Resisting Frame
6 Story	19	5	0.35 g	II	Intermediate Moment Resisting Frame
8 Story	25	5	0.35 g	II	Intermediate Moment Resisting Frame
10 Story	31	5	0.35 g	II	Intermediate Moment Resisting Frame
15 Story	49	5	0.35 g	II	Intermediate Moment Resisting Frame

Table 1. Specifications of the studied frames

۲,۳,۴ مشخصات جداسازها

سیستم جداگر استفاده شده در این پژوهش از نوع لاستیکی با هسته سربی (LRB) است و رفتار آنها مطابق شکل (۳) به صورت غیرالاستیک چند خطی مدل شده است.

برای مدل‌سازی جداگرها به پارامترهای سختی مؤثر K_{eff}، سختی اولیه K_1 ، نیروی جاری شدن f_y و نسبت سختی ثانویه به سختی اولیه η مورد نیاز است [٤]. هر یک از این مقادیر براساس زمان تناوب در نظر گرفته برای سازه با جداگر لرزه‌ای به دست آمده است.

شکل ۳- رفتار دو خطی برای مدلسازی جداگرهای لرزه‌ای [٤]

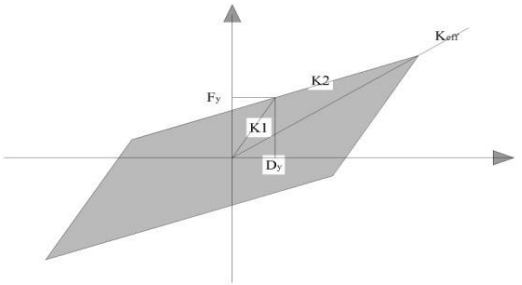

Fig. 3. Bilinear model for seismic isolators [4]

برای بررسی اثر جداگرهای LRB در زیر هر ستون پایه ساختمان، یک جداگر قرار داده شده است که چگونگی چیدمان جداسازها به صورت متقارن است تا مرکز سختی جداسازها از مرکز جرم عبور کرده و مسئله پیچش اتفاق نیافتد.

جدول۲-سختی جداسازهای مطالعه شده (کیلونیوتن بر متر)

Isolator	BI 1	BI 2	BI 3	BI 4	BI 5	BI6
K_{eff}	907	874	776	671	587	517
K_e	6851	6421	5862	5072	4432	3906

Table 2. Stiffness of isolators used (kN/m)

۳,۳,۴ بارگذاری

سازه‌های بررسی شده در این پروژه بر اساس مبحث ششم مقررات ملی ساختمان ایران بارگذاری شده‌اند. جدول ۳ مقادیر مورد نظر برای بارهای وارد شده به سازه‌ها را نشان می‌هد.

جدول۳- بارگذاری سازه

Story Load (Dead)	600 kg/m^2
Roof Load (Dead)	500 kg/m^2
Story Load (Live)	200 kg/m^2
Roof Load (Live)	150 kg/m^2

Table 3. Gravity loads

۴,۳,۴ معرفی به نرم افزار Opensees

بعد از معرفی هندسه مدل‌ها، شرایط بارگذاری، شرایط سازه-های معمولی (فیکس) و شرایط سازه جداسازی شده به نرم-افزار، معرفی می‌شود. برای مدلسازی بتن از مدل uniaxial Material Concrete01 استفاده شده است. برای این منظور از مدل Kent-Park کمک گرفته شده، که این مدل

بدون ناحیه کششی بوده و کاهش سختی را در باربرداری و بارگذاری دوباره لحاظ می‌کند، این مدل را هم می‌توان برای مصالح محصور و هم غیر محصور در نظر گرفت [۸].

شکل ٤- منحنی تنش کرنش بتن مورد استفاده [۱۰]

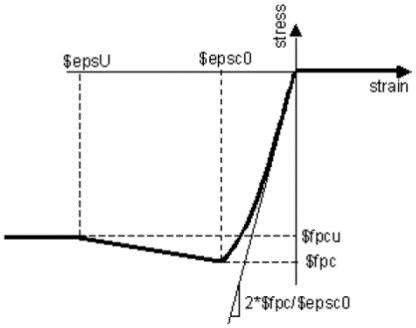

Fig. 4. The stress-strain curve of concrete [10]

اعضا به صورت فایبر(رشته‌ای) مدل شده است. المان‌ها به صورت المان dispBeamColumn و برای اتصال جداساز از المان zeroLength و برای انتقال از geomTransf استفاده شده است.

۴,۴. درز انقطاع

۱,۴,۴. دلیل پیش‌بینی درز انقطاع

برای حذف و یا کاهش خسارت و خرابی ناشی از ضربه ساختمان‌های مجاور به یکدیگر، ساختمان‌های با ارتفاع بیشتر از هشت‌متر و یا بلندتر از دو طبقه از تراز پایه باید با پیش‌بینی درز انقطاع از یکدیگر جدا شده و یا با فاصله‌ای حداقل از مرز مشترک با زمینه‌ای مجاور ساخته شوند [۷]. این مقدار بر اساس نتایج حاصل از میزان تغییرمکان‌های محتمل سازه حین زلزله به دست آمده است. در صورتی‌که فاصله دو ساختمان کمتر از مقدار مشخص شده باشد، احتمال برخورد دو ساختمان وجود دارد. بر این اساس و در سازه‌هایی که تحت زلزله‌های حوزه نزدیک قرار دارند ممکن است مقدار موجود در دستورالعمل‌ها کفایت لازم برای اطمینان از عدم برخورد دوسازه را نداشته باشند. برخورد دو ساختمان ممکن است موجب آسیب به اجزای سازه‌ای ساختمان شود.

۲,۴,۴. مقدار توصیه شده درز انقطاع طبق دستورالعمل ۲۸۰۰

عرض درز انقطاع در هر طبقه باید کمینه برابر با یک صدم ارتفاع آن طبقه از روی تراز پایه در نظر گرفته شود. برای تأمین این منظور، می‌توان فاصله هر طبقه ساختمان از مرز زمین مجاور را حداقل برابر با پنج هزارم ارتفاع آن طبقه از روی تراز پایه در نظر گرفت. در ساختمان‌های با اهمیت "خیلی زیاد و زیاد" و یا در سایر ساختمان‌های با هشت طبقه و بیشتر، عرض درز انقطاع در هر طبقه نباید کمتر از حاصل‌ضرب تغییرمکان جانبی نسبی طرح آن طبقه ضربدر ضریب رفتار R ، درنظر گرفته شود. هر یک از ساختمان‌های مجاور یکدیگر، ملزم به رعایت فاصله‌ای معادل حاصل‌ضرب ۰,۵R در تغییرمکان جانبی نسبی طرح آن ساختمان در هر طبقه است [۹].

۵. نتایج تحلیل

پس از طراحی سازه‌های مورد نظر، تحلیل دینامیکی غیر خطی با استفاده از زلزله‌های انتخابی (در گروه زلزله‌های حوزه دور و نزدیک) انجام شده و سپس پارامترهایی از سازه همچون بیشینه تغییرمکان قاب و تغییرمکان جانبی نسبی طبقات بررسی شده است.

شکل (۵) نشان دهنده بیشینه تغییرمکان جانبی نسبی برای قاب‌های ساده تحت میانگین زلزله‌های حوزه دور است. یکی از راه‌کارهای کاهش مشکل تغییرمکان جانبی نسبی طبقات، افزایش سختی طبقات است. اگر چه با افزایش سختی جابه‌جایی‌ها و تغییر شکل‌ها در حد پایین می‌ماند ولیکن با توجه به ابعاد و سختی مقاطع و قابلیت جذب انرژی بالا، سازه وارد مودهای بالاتر می‌شود و با توجه به ماهیت مودهای بالاتر (محتوای انرژی بالاتر و شکل‌ها تغییر شکلی پیچیده‌تر) سازه به جذب انرژی بیشتر و در نهایت تغییر شکل‌های پیچیده و زیاد که موجب انهدام دور از انتظار سازه می‌شود، می‌انجامد. از این رو در هنگام محاسبه‌ی تغییرمکان جانبی نسبی طبقات و تعیین سختی لازم، می‌بایست مسئله‌ی مودهای بالاتر را در رابطه با سازه مدنظر قرار داد. نتایج به دست آمده

که حاصل مقایسه تغییرمکان جانبی نسبی طبقات است نشان میدهد که با بالا رفتن ارتفاع ساختمان اثربخشی زلزله‌های حوزه دور کم شده و تغییرات تغییرمکان جانبی نسبی مشهود-تر است. گفتنی است که در زلزله‌های حوزه دور نتایج تغییرمکان جانبی نسبی مطابق انتظار است.

نمودارهای شکل (٦) نشان دهنده بیشینه تغییرمکان جانبی نسبی برای قاب‌های جداسازی شده تحت میانگین زلزله‌های حوزه نزدیک است. با توجه به این شکل، نتایج حاکی از مقادیر بزرگ برش پایه و تغییرمکان جانبی نسبی در طبقات است. همچنین مقایسه‌ی مقادیر مختلف تغییرمکان جانبی نسبی کلی سازه که تحت اثر تحریکات لرزه‌ای حوزه دور و نزدیک به وجود آمده‌اند، نشان دهنده‌ی این موضوع است که چگونگی تحریک لرزه‌ای این دو نوع از تحریکات با یکدیگر متفاوت بوده و زلزله‌های حوزه نزدیک آثار خود را روی سازه بیشتر نشان می‌دهد. در ضمن در بیشتر مدل‌ها بیشینه تغییرمکان جانبی نسبی در طبقه اول مشاهده شده و افزایش پریود سازه موجب افزایش جابجایی پایه می‌شود.

شکل (٧) نشان‌دهنده میانگین بیشینه تغییرمکان برای قاب‌های جداسازی شده تحت زلزله حوزه نزدیک است. نتایج حاصل از تحلیل رفتار سازه تحت زلزله حوزه نزدیک قابل پیش‌بینی نبوده و اینکه سازه‌های بلندمرتبه، به خودی خود دارای پریود بالا است، بنابراین نیاز به جداساز در آنها احساس نمی‌شود.

مقدار میانگین بیشینه تغییرمکان مطلق جدول (٤) برای رکوردهای حوزه دور و جدول (٥) مقدار میانگین بیشینه تغییرمکان مطلق برای رکوردهای حوزه نزدیک را نشان می‌دهد. و جدول (٦) شامل اختلاف قاب‌های با مقاطع قبلی و قاب‌های با مقاطع جدید برای مدل‌های ٤ و ٨ طبقه است. نتایج این جداول بیانگر آن است که بند آیین‌نامه مقررات ملی ساختمان، برای سازه‌های ساده، تحت زلزله حوزه دور منطقی و تا حدودی (برای سازه‌های بلند مرتبه‌تر) محافظه کارانه بوده و تحت زلزله حوزه نزدیک جوابگو نبوده و باید به میزان قابل‌توجهی افزایش یابد. برای سازه‌های جداسازی شده، تحت زلزله دور تقریبا جوابگو بوده (به جز قاب ٢ طبقه، که با کمی افزایش می‌شود مانع برخورد سازه‌های جداسازی شده به یکدیگر شد) اما برای حوزه نزدیک به هیچ وجه جوابگو نبوده وباید به مقدار زیادی افزایش یابد.

شکل ٥- نتایج حداکثر تغییرمکان جانبی نسبی برای قاب‌های ساده تحت میانگین زلزله‌های حوزه دور

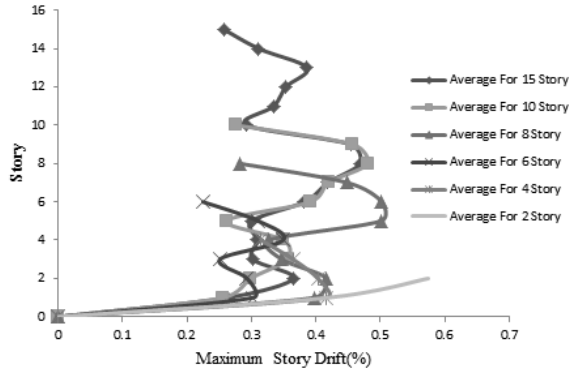

Fig. 5. Average of maximum interstory drift ratios for the fixed-base frames under far-field ground motions

شکل ٦- نتایج حداکثر تغییرمکان جانبی نسبی برای قاب‌های جداسازی شده تحت میانگین زلزله‌های حوزه نزدیک

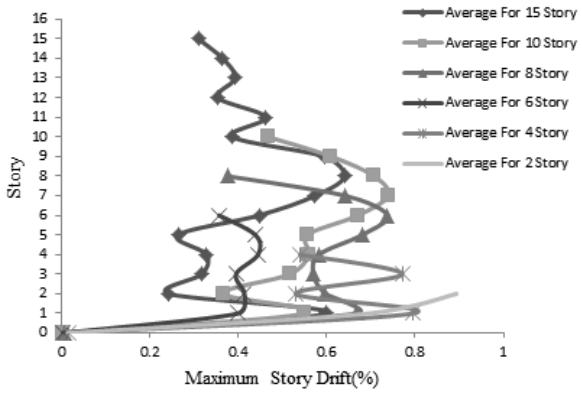

Fig. 6. Average of maximum interstory drift ratios for the isolated frames under near-field ground motions

شکل ٧- میانگین حداکثر تغییرمکان برای قاب‌های جداسازی شده تحت حوزه نزدیک

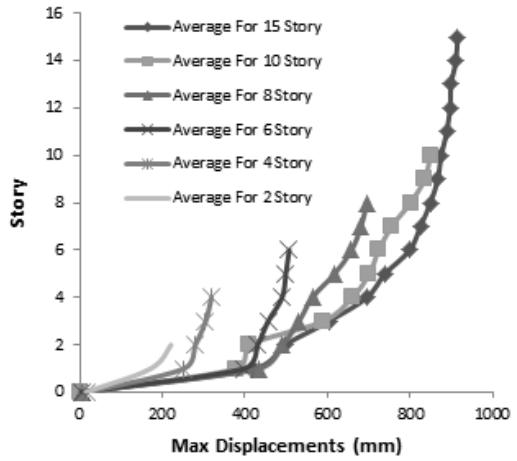

Fig. 7. Average of maximum displacemens for the isolated frames under near-field ground motions

جدول ٤- میانگین بیشینه تغییرمکان مطلق برای رکوردهای حوزه دور (بر حسب mm)

	fixed-base frames	Isolated Frames	Allowable Value
Average of Total Records for 2 Story Frame	21.96	37.34	35
Average of Total Records for 4 Story Frame	34.45	54.4	65
Average of Total Records for 6 Story Frame	42.01	58.13	95
Average of Total Records for 8 Story Frame	62.14	72.1	125
Average of Total Records for 10 Story Frame	64.05	81.87	155
Average of Total Records for 15 Story Frame	92.14	132.1	230

Table 4. Average of maximum displacements under far-field ground motions (mm)

جدول ٥- میانگین بیشینه تغییر مکان مطلق برای رکوردهای حوزه نزدیک (بر حسب mm)

	fixed-base frames	Isolated Frames	Allowable Value
Average of Total Records for 2 Story Frame	90.89	187.39	35
Average of Total Records for 4 Story Frame	171.59	293.17	65
Average of Total Records for 6 Story Frame	211.6	345.97	95
Average of Total Records for 8 Story Frame	295.86	376.49	125
Average of Total Records for 10 Story Frame	346.29	417.09	155
Average of Total Records for 15 Story Frame	394.11	437.96	230

Table 5. Average of maximum displacements under near-field ground motions (mm)

جدول ٦- مقایسه تغییرمکان برای قاب‌های ٤ و ٨ طبقه با (مقاطع قبلی و قاب‌های با مقاطع جدید) (بر حسب mm)

	fixed-base frames	frames with previous sections	frames with new sections
Average of Total Records for 4 Story Frame	34.45	54.4	64.04
Average of Total Records for 8 Story Frame	62.14	72.1	82.35

Table 6. Comparison of the displacement for 4 and 8 story frames (frames with previous and new sections) (mm)

جدول ٧- بیشینه تغییرمکان بالا و پایین جداساز (بر حسب mm)

Frame	2 Story	4 Story	6 Story	8 Story	10 Story	15 Story
Displacement	20.3	41.6	42.4	35.7	39.1	26.7

Table 7. The maximum relative displacement of the seismic isolator (mm)

در جدول (٧) مقدار تغییرمکان بالا و پایین جداساز در هر مدل (بیشینه تغییرمکان جداگر ساختمان) برای قاب‌های با طبقات متفاوت و برحسب میلی‌متر ارائه شده است.

٦. نتیجه‌گیری

در این پژوهش میزان درز انقطاع لازم برای سازه‌های جداسازی شده و نشده لرزه‌ای تحت زلزله‌های حوزه دور و نزدیک به صورت جداگانه بررسی شده است و با مقادیر آئین‌نامه مقایسه شده است. بر این اساس نتایج در این قسمت به تفکیک بیان شده است.

برای سازه‌های ساده تحت زلزله حوزه دور، بند آیین‌نامه قابل اعتماد است، حتی در سازه‌های با اهمیت کمتر و ارتفاع متوسط می‌تواند تا ١٠ درصد کاهش یابد. همچنین برای سازه‌های جداسازی شده تحت زلزله حوزه دور، افزایش ١٠ درصدی مقدار توصیه شده به وسیله‌ی مبحث ششم (برابر با پنج هزارم ارتفاع آن طبقه از روی تراز پایه، به شرطی که کمتر

از حاصل‌ضرب تغییرمکان جانبی نسبی طرح آن طبقه ضربدر ضریب رفتار درنظر گرفته شود) برای بیش از ۹۰٪ مدل‌های این پژوهش کفایت کرده است.

برای سازه‌های ساده تحت زلزله حوزه نزدیک افزایش ۱/۷ تا ۲,۷ برابری (برای میانگین تغییر مکان‌های این پژوهش افزایش ۲۲۰٪) میزان درز انقطاع توصیه شده در آیین نامه لازم است همچنین برای سازه‌های جداسازی شده تحت زلزله حوزه نزدیک، بند آیین‌نامه نیاز به افزایش ۲ تا ۵/۵ برابری (برای میانگین تغییرمکان‌های این پژوهش افزایش ۲۹۰٪) است. در نهایت برای سازه‌های با مقاطع کوچکتر (با جداساز طراحی شده)، میزان تغییرمکان مطلق و بالطبع آن درز انقطاع اندکی (حدود ۱۵ درصد) بیشتر از سازه‌های جداسازی شده با مقاطع ثابت است.

همان‌گونه که در بالا به تفکیک نوع سازه‌ها و زلزله‌ها بیان شد بر اساس نتایج این پژوهش بیشتر عدم همخوانی نتایج با مقادیر ارائه شده به وسیله‌ی آئین‌نامه مربوط به زلزله‌های حوزه نزدیک است که نیازمند افزایش مقادیر ارائه شده در آئین‌نامه خواهد بود.

۷. مراجع References

۱. دستورالعمل طراحی ساختمان‌های دارای جداساز لرزه‌ای. زیر نظر کمیته تخصصی (ویرایش اول)، مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن (۱۳۸۹).

۲. نعیم، ف. " طراحی سازه‌های ضد زلزله"، ترجمه رسول میرقادری، علی شریفی (۱۳۸۰).

۳. چراغی، ر. "اثر جداسازها در سازه‌های بتنی" پایان نامه کارشناسی ارشد مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه بین المللی امام خمینی (ره) (۱۳۸۹).

4. F.Naeim and J.M.Kelly."Design of Seismic Isolatated Structures:From Theory to Practice" Engineering Structures (1999) .

۵. اسکینر، آر، ورابینسون .اچ. " جداسازی لرزه‌ای در مقابل زلزله" ، ترجمه محسن تهرانیزاده، فرزانه حامدی (۱۳۷۸).

6. Heaton, T. H., Hall, J. F., Wald, D. J., and Halling, M. W. ‘‘Response of high-rise and base-isolated buildings in a hypothetical Mw 7.0 blind thrust earthquake’’ (1995).

۷. مقررات ملی ساختمان، مبحث ششم. " بارهای وارد بر ساختمان"، وزارت مسکن و شهرسازی، دفتر تدوین و ترویج مقررات ملی ساختمان (۱۳۸۵).

8. OpenSees, “Open System for Earthquake Engineering Simulation, Pacific Earthquake Engineering” Research Center, University of California, Berkeley, Available at http://opensees.berkeley.edu/ (2007).

۹. مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن "آیین نامه طراحی ساختمانها در برابر زلزله، استاندارد شماره ۲۸۰۰"، ویرایش سوم (۱۳۸٤).

۱۰. کماچی، ی. "مدل سازی کاربردی با استفاده از نرم افزار OpenSees"، انتشارات فدک ایساتیس (۱۳۹۱).

۱۱. تابش پور، م.ر. "مبانی مهندسی زلزله"، انتشارات فدک ایساتیس (۱۳۸۹).

12. Adam, M. A. and Shaaban, I. G. “Seismic response of R.C. building frames subjected to combined horizontal and vertical excitation”, Civil Eng. Dept, Faculty of Eng. (Shoubra), Zagazig University publishing, Cairo, Egypt (2006).

۱۳. حسنی، الف. ، تهرانی‌زاده، م. و محمدی تهرانی، ف.(۱۳۷۵)، "سیستم پی لغزشی برای محافظت از ساختمان های کوچک در برابر زلزله،" تهران، انتشارات مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن.

14. Ghodrati Amiri, G., Naderpour, H., and Hoseini Vaez, S.R. “Numerical Evaluation of Base-Isolated Structures with Optimized Distribution of LRB and FPS Isolators”, (2010).

15. Haselton, C.B., Mitrani-Reiser, J., Goulet, C., Deierlein, G.G., Beck, J., Porter, K.A., Stewart, J., and Taciroglu, E., “An Assessment to Benchmark the Seismic Performance of a Code-Conforming Reinforced-Concrete Moment-Frame Building”, (2008).

16. H. Yoshioka; J. C. Ramallo; and B. F. Spencer Jr. “Base Isolation Strategies Employing Magnetorheological Dampers” (2011).

17. Eurocode 8. “Design of structures for earthquake resistance” (2005) .

18. FEMA, “Quantification of Building Seismic Performance Factors”. FEMA P695, prepared by the Applied Technology Council for the Federal Emergency Management Agency, Washington, D.C. (2009).

۱۹. برگی، خ. "اصول مهندسی زلزله" انتشارات دانشگاه تهران (۱۳۸٦).

Investigating the Amount of Structural Gap for Base-Isolated Structures, Subjected To Near-Fault Earthquake Records

Jani M. [1], Mohebi B. [2*]

1- M.Sc., Civil Structural Engineering, Internationa University of Imam Khomeini, Qazvin
2- Asist. Prof., Technical Faculty of Engineering, Internationa University of Imam Khomeini, Qazvin

mohebi@eng.ikiu.ac.ir

Abstract:
One of the important effects of earthquakes is the impact of adjacent buildings. To eliminate or reduce the damage and destruction caused by this effect, adjacent structures should be separated by a gap or be constructed with a minimum distance from the border. It has been witnessed that he properties of earthquake records from the fields close to the source of wave propagation, are different from those of other records. Seismic design spectrum in Iranian Seismic Code (Standard 2800) discusses far field earthquakes, while the near-field earthquake response spectrum is not mentioned in it. On the other hand, a new method to reduce the effects of earthquakes on structures is using base isolators. In this study, effects of base isolators in predicting the behavior of concrete moment frames (medium ductility) which are located near the source of earthquake have been investigated. For this aim, several two-dimensional frames with same bays and different number of floors (2 4, 6, 8, 10 and 15 story frames) -representing the short, medium and high buildings- have been considered. Results indicate that the required gap for isolated buildings located near faults is more than the predicted amount in the Iranian Seismic Code. Intermediate reinforced concrete frames are used for all the models which are separated from regular structures. One of the modern techniques for designing seismic resistant structures is using base isolations. There are several types of isolators which can be used practically in the structures. There are wide ranges of damping amounts based on the isolators' types. The main idea in this regard is to reduce the strength demand in the structures and also reduce the nonstructural damages even during severe earthquakes. Also, it is possible to reduce non-structural damages by using base isolators. Base isolators with high damping, absorb earthquake energy using displacement. Although it is an excellent idea to use base isolators in seismic areas, but the gap should be produced between adjacent buildings to prevent their contact. This is very dangerous, especially when the heights of the two buildings are not the same. In this case, a concentrated load will be induced to the middle of the other building. In this research, attempt has been made to find the suitable amount of gap for base isolated structures. Also, for considering near-fault effects, the structures considered to be retrofitted by base isolators, which show near-fault behavior, have been selected and used. For calculating displacement demand of the structures subjected to earthquakes, the nonlinear time history analyses have been used. All the analyses were performed using OPENSEES software and scaled records. Results show that the amount of Gap in Iranian Seismic Code (Standard 2800) is suitable for structures which are not in near-fault regions. Naturally, there are some differences between the code and the results achieved in this research. But for the structures in near-fault regions the amount of gap proposed in the code is less than the required amount from the results of this research.

Keywords: Structural Gap, Base-Isolated Structures, Near-Fault Earthquake, Isolator