

## اثر برخورد سازه‌های مجاور بر نیازهای لرزه‌ای سازه‌های جداگر لرزه‌ای در اثر زلزله

غلامرضا قدرتی امیری<sup>۱\*</sup>، مجید برارنیا<sup>۲</sup>، محمد عابدیپور<sup>۳</sup>، پژمان نمیرانیان<sup>۴</sup>

اطلاعات مقاله	چکیده
<b>واژگان کلیدی:</b> جداگر لرزه‌ای، برخورد، درز لرزه‌ای، نیازهای لرزه‌ای، دینامیکی غیرخطی.	در این مقاله، نتایج حاصل از مطالعات انجام شده روی سازه‌های با جداگر لرزه‌ای و اثر درز لرزه‌ای بین این سازه‌ها با ساختمان‌های مجاور در زمان زلزله ارائه شده است. این تحقیق از این جهت اهمیت دارد که می‌توان از نتایج آن برای ارزیابی اثر فواصل بین سازه‌ها با در نظر گرفتن مشخصات سازه با جداگر لرزه‌ای که در معرض زلزله قرار دارند، استفاده کرد. اطلاعات آماری با بررسی ساختمان‌های سه، پنج و هفت طبقه که در معرض ۲۰ رکورد زلزله قرار دارند، به دست آمده است. هر یک از ساختمان‌ها بر اثر رکوردهای زلزله انتخاب شده مورد تحلیل قرار گرفت و تأثیرات برخورد بین سازه‌ها در زمان زلزله بر نیازهای لرزه‌ای مورد بررسی قرار گرفته است. فاصله بین سازه‌ها براساس مشخصات سازه‌های با جداگر تغییر می‌کند تا بتواند دید قابل درکی را ارائه دهد. هر یک از سازه‌ها برای فواصل گوناگون و رکوردهای انتخابی مورد تحلیل قرار گرفته است. در مجموع، برای بررسی تأثیر برخورد بر نیازهای لرزه‌ای سازه‌ها با جداگر لرزه‌ای ۵۴۰ تحلیل تاریخچه زمانی غیر خطی انجام شده است. با جمع بندی نتایج، یک رابطه ساده و تأثیرگذار برای کاهش اثر برخورد دو سازه مجاور ارائه شده است.

### ۱- مقدمه

فونداسیون با سازه و یا به صورت برخورد سازه مورد نظر با سازه مجاور که به آن خیلی نزدیک است، اتفاق بیفتد. به دلیل موارد معماری و قیمت زمین‌های مختلف، این امکان که درز لرزه‌ای به هر اندازه که بخواهیم آنرا بیشتر در نظر بگیریم وجود ندارد و در بیشتر مواقع مجبور به رعایت حداقل این مقدار هستیم. در مجموع باید این واقعیت را در نظر گرفت که در بیشتر مواقع به دلیل نامشخص بودن کامل ماهیت سازه، زلزله، سازه مجاور این مقادیر دقیق نخواهد بود، ولی می‌توان به صورت تقریبی با دقتی مناسب به محدوده خوبی از درز لرزه‌ای اشاره کرد.

### ۱-۱- تاریخچه و تحقیقات

زلزله‌هایی که تاکنون اتفاق افتاده تأثیر زبان‌آور برخورد دو سازه مجاور در ساختمان‌های با پایه گیردار را آشکار کرده است، این خسارات از خرابی سطحی تا تخریب طبقات در موارد مختلف دیده شده است. تأثیرات زلزله بر سازه‌های با سیستم جداگر لرزه‌ای می‌تواند بیشتر نیز باشد. چنین برخوردی ممکن است در دیواره حائل (خندق) اطراف

### ۱-۲- رویداد برخورد سازه‌ها طی زلزله‌های قبل

ساختمان با سیستم جداگر لرزه‌ای مرکز کنترل و فرمان آتش سوزی (FCC) در لس آنجلس، که این تجربه را در

\* پست الکترونیک نویسنده مسئول: ghodrati@iust.ac.ir

۱. استاد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران

۲. دانشجوی دکتری مهندسی زلزله، دانشگاه صنعت آب و برق

۳. کارشناس ارشد سازه، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران جنوب

۴. دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران

مالهوترا [۴] اولین نفراتی بودند که با تحقیقاتی تقریباً مشابه در این زمینه کار کردند. این تحقیقات تحلیلی روی سازه‌های با سیستم جداساز لرزه‌ای انجام شده و به بررسی احتمال برخورد آنها به دیواره خندق اطراف فونداسیون پرداخته شده است. هر دو محقق، بنای فوقانی سازه‌های جدا شده لرزه‌ای را همچون تیر برشی ممتد فرض نموده و برخورد آن به یک متوقف کننده (کناره خندق اطراف سازه) و تأثیرات آن بر پاسخ لرزه‌ای سازه را با استفاده از تئوری امواج تحلیل کردند. تسی پاسخ شتابی بسیار شدید در حین برخورد سازه با دیواره خندق یا دیواره حائل در تراز فونداسیون جدا شده، مشاهده نمود. حال آنکه مالهوترا نتیجه گرفت که نیروی برشی پایه با سختی روبنا یا دیواره حائل افزایش خواهد یافت، و گاهی اوقات این نیروی برشی از وزن کل سازه جدا شده لرزه‌ای بیشتر می‌شود.

ماتساگار و جنگید [۵] به صورت عددی و پارامتری مورد برخورد سازه‌های جدا شده لرزه‌ای با سیستم چند درجه آزادی (MDOF) را در سیستم‌های مختلف جداساز لرزه‌ای آزمایش کردند. آنها به این نتیجه رسیدند که تأثیر برخورد سازه‌های مجاور زمانی با افزایش شکل‌پذیر رو سازه و افزایش تعداد طبقات یا سختی نسبی سازه مجاور بیشتر خواهد شد. کامادراماس و همکاران [۶] و کامادراماس [۷] تحقیقاتی به صورت تحلیل پارامتریک انجام داده‌اند که در آن تأثیرات برخورد یک سازه با سیستم جدا شده لرزه‌ای با دیواره حائل اطراف خندق را در نظر گرفتند. آنها فقط سازه‌های چهار طبقه فلزی را در کنار سازه‌های با پایه گیردار قرار داده و نحوه برخورد را مدل‌سازی کردند.

پولیکاراپو و کامادراماس [۸] نتیجه‌گیری کردند که محاسبه فاصله دو سازه از یکدیگر توسط فرمول (۱)، برخورد دو سازه در ۵۰٪ از زلزله‌های مورد بررسی را کاهش می‌دهد. این فرمول به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$D_{SRSS} = \sqrt{\max D_{ISO}^2 + \max D_{FIXED}^2} \quad (1)$$

زلزله نورث‌ریچ ۱۹۹۴ داشته و ثبت گردیده است. با مطالعه رکورد‌های حرکت زمین برای این سازه، چند مورد برخورد سازه‌های مجاور به هم مشاهده می‌شود. در این ساختمان دو طبقه فلزی از های مستهلک کننده الاستومری به عنوان سیستم جداگر لرزه‌ای استفاده شده است. بر اساس گزارش‌ها، در بررسی اولیه، در یکی از بعدهای سازه برخورد تیر (پل) بتنی در ضلع شمالی ساختمان مشاهده شده است. شتاب نگاشت‌هایی که در هر طبقه متصل شده بودند، دامنه پاسخ شتاب را در تراز جداگر مشخص کرده‌اند، که نشان می‌دهد در جهت برخورد، شتاب از  $0.122g$  به  $0.35g$  که اوج شتاب بوده، رسیده است. در حالی که در دیگر جهت‌ها، شتاب زمین از  $0.18g$  به  $0.07g$  کاهش یافته بود، که این از تأثیرات سیستم جداگر لرزه‌ای بوده است.

موارد گزارش شده در زلزله‌های مکزیکوسیتی ۱۹۸۵، نورث‌ریچ آمریکا ۱۹۹۴، کوبه ژاپن ۱۹۹۵، کوچایی ترکیه ۱۹۹۹ و سیچان چین ۲۰۰۸ نمونه‌هایی از این مقوله‌اند.

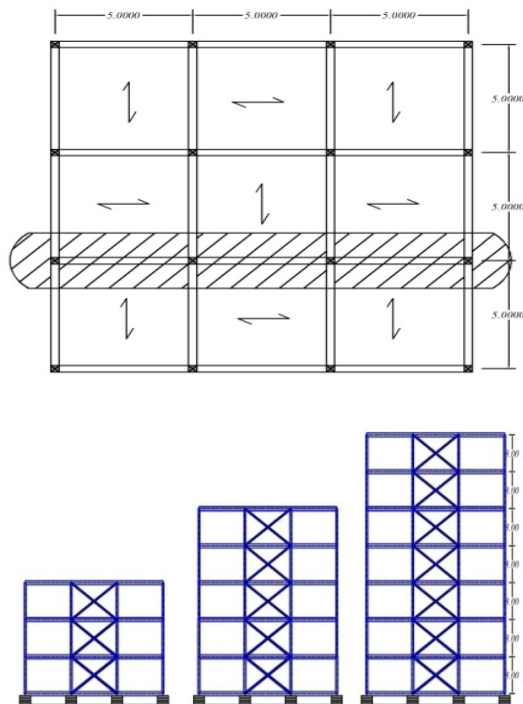
### ۳-۱- مطالعات صورت گرفته در مورد برخورد سازه‌های مجاور

تاکنون به طور مکرر در مورد سازه‌های با سیستم پایه‌های گیردار در سراسر جهان مطالعاتی صورت گرفته است، خصوصاً در جریان زلزله‌های شدید، که طی تحقیقات زیاد به اطلاعات مناسبی در این زمینه رسیده‌اند. اناگنوستوپولوس [۱] از اولین کسانی بود که از شبیه‌سازی عددی در حل این مسئله استفاده نمود. توجه او به سازه‌ای با سیستم یک درجه آزادی (SDOF) تحت رکورد زلزله‌های مختلف بود. بعد از آن، چند مطالعه دیگر به صورت تحقیقات عددی و تجربی که روی سازه‌های با پایه گیردار متمرکز شده بود، انجام گرفت [۲].

در مقایسه با تحقیقات زیادی که روی سازه‌های عادی و پل‌ها انجام شده، مطالعات محدودی روی سازه‌های با سیستم جدا شده لرزه‌ای انجام شده است. تسی [۳] و

## ۲- روش تحقیق و سیستم‌های سازه‌ای مورد مطالعه

در این تحقیق از ۳ سازه سه، پنج و هفت طبقه با جداگر لرزه‌ای استفاده شده است. سازه‌ها به صورت دو بعدی مدل شده و رفتار رو سازه در سیستم‌های با جداگر لرزه‌ای و ساختمان‌های با پای گیردار اطراف در زمان زلزله الاستیک فرض شده است.



شکل ۱- پلان سازه طراحی شده و قاب‌های مورد تحلیل

### ۱-۲- مدل سازی سازه‌ها با جداگر لرزه‌ای

سازه‌ها از نوع فولادی و سیستم باربر جانبی آنها از نوع مهاربند هم محور است و بر مبنای دستورالعمل طراحی ساختمان‌های دارای جداساز لرزه‌ای ایران [۱۰] تحلیل شده‌اند. بارگذاری لرزه‌ای سازه‌ها بر اساس خاک نوع سوم و منطقه با لرزه خیزی خیلی زیاد انجام شده است. طراحی اعضا بر اساس آیین‌نامه 94 AISC-LRFD [۱۱] صورت گرفته است. فولاد مصرفی دارای تنش تسلیم  $2400 \text{ kg/cm}^2$  و بارگذاری آن بر مبنای مبحث ششم مقررات ملی ساختمان [۱۲] می‌باشد. بار مرده و زنده

که در آن  $\max D_{\text{ISO}}$  و  $\max D_{\text{Fixed}}$  به ترتیب بیشترین تغییر مکان‌های افقی سازه با جداگر لرزه‌ای و سازه با پای گیردار در یک لرزه یکسان است. اما چند نکته قابل ذکر است: ۱- تعداد رکوردهای انتخابی در این تحقیق ۴ عدد می‌باشد که از نظر آماری ضعیف است و ۲- در زمان کاربرد محاسبه، بیشترین تغییر مکان افقی سازه مجاور در بیشتر مواقع سخت و گاهی به دلیل در دست نبودن اطلاعات کافی غیر ممکن است. با توجه به دلایل ذکر شده، به نظر می‌رسد که استفاده از فرمول (۱) برای محاسبه فاصله بین دو سازه مجاور در حالت با جداگر لرزه‌ای کاری سخت و طاقت فرسا باشد.

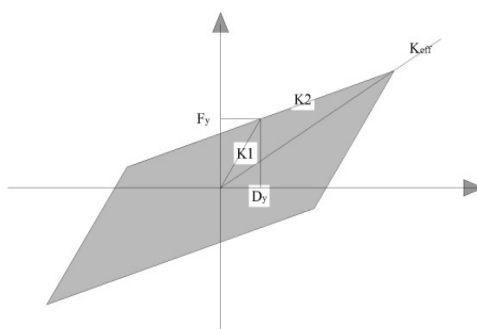
اخیراً اگاروال و همکاران [۹] مورد برخورد دو سازه دو طبقه، هر دو با پایه گیردار و هر دو با پایه جدا شده لرزه-ای را آزمایش کرده‌اند، که در مورد سازه‌های با سیستم جدا شده لرزه‌ای سیستم جداگر لرزه‌ای در آنها از روش لغزشی استفاده نموده، و با توجه به اصطکاک‌های مختلف انجام گردید. در این تحقیق، سعی گردید سازه‌های با فقط دو درجه آزادی مورد بررسی قرار گیرد.

اگرچه در گذشته روی موارد برخورد سازه‌های مجاور با سیستم‌های جدا شده لرزه‌ای تحقیقاتی صورت گرفته است، اما هنوز نیاز به بررسی آثار برخورد بر نیازهای لرزه-ای سازه‌های با جداگر لرزه‌ای وجود دارد تا درک بهتری از تأثیر این مسئله بر سازه‌های با جداگر لرزه‌ای در ذهن طراحان ایجاد شود.

با در نظر گرفتن تمامی موارد بررسی شده قبلی، انتخاب فاصله درست سازه‌های با جداگر لرزه‌ای از یکدیگر و یا با سازه‌های با پایه گیردار لازم است. در این تحقیق سعی بر آن بوده که با وابسته کردن فاصله‌های مورد بررسی به سازه‌های دارای جداگر لرزه‌ای، رفتار سازه در زمان برخورد بررسی شود. تأثیر برخورد سازه‌ها در زمان زلزله بر رفتار سازه و نیازهای لرزه‌ای آن مورد بررسی قرار گرفته است و در انتها نیز فرمولی کاربردی، ساده و در عین حال با دقت مناسب ارائه شده است تا از برخورد سازه‌های با جداگر لرزه تا حدود زیادی کاسته شود.

مقادیر براساس زمان تناوب در نظر گرفته برای سازه با جداگر لرزه‌ای به دست آمده است. مقادیر این پارامترها برای هر یک از سازه‌ها در جدول ۱ ارائه شده است. رفتار سیستم رو سازه در زمان نوسان، الاستیک در نظر گرفته شده و میرایی سازه‌های با سیستم جداگر لرزه‌ای به غیر از مد اول که مربوط به سیستم جداگر است و ۲٪ میرایی بحرانی انتخاب شده، برای دیگر مدها برابر ۵٪ در نظر گرفته شده است [۱۵]. زمان تناوب مدهای اول و دوم هر یک از سازه‌ها در جدول ۲ ارائه شده است.

گسترده به ترتیب ۴۵۰ و ۲۰۰ کیلوگرم بر متر مربع در نظر گرفته شده است. در شکل ۱ پلان ساختمان طراحی شده و قاب‌های مورد تحلیل نشان داده شده است. در هر سه سازه، پلان ثابت و تعداد طبقات افزایش یافته است. سیستم جداگر مورد استفاده در این تحقیق از نوع الاستومری با هسته سربی است و رفتار آنها به صورت غیر الاستیک چند خطی مدل شده است (شکل ۲). برای مدل سازی جداگرها به پارامترهای سختی مؤثر  $K_{eff}$ ، سختی اولیه  $K_1$ ، نیروی جاری شدن  $f_y$  و نسبت سختی ثانویه به سختی اولیه  $\eta$  مورد نیاز است [۱۳ و ۱۴]. هر یک از این



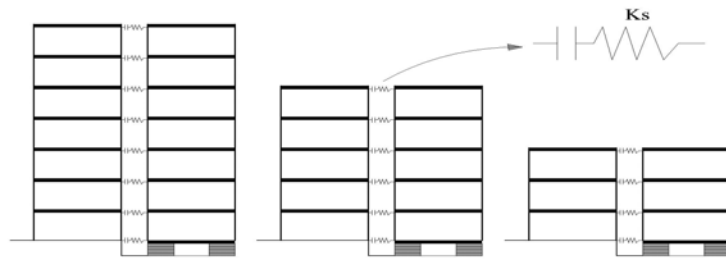
شکل ۲- رفتار دو خطی برای مدل سازی جداگرهای لرزه‌ای

جدول ۱- مشخصات جداگرهای لرزه‌ای (کیلو نیوتن بر متر)

جداگرها	سازه‌ها		
	3 story	5 story	7 story
$K_{eff}$	۶۷۵/۹۷۱۲	۶۴۱/۶۸۷۸	۵۸۰/۱۰۳۴
$K_1$	۳۹۳۳/۵۲۹	۳۷۳۴/۰۳۱	۳۳۷۵/۶۶۷
$F_y$	۶۴/۸۶۱۷۶	۹۰/۳۵۸۵۵	۸۱/۰۴۳۳۸
$\eta$	۰/۰۹۸۳۷۷	۰/۰۹۸۳۷۷	۰/۰۹۸۳۷۷

جدول ۲- مشخصات دینامیکی سازه‌های مورد مطالعه (دوره تناوب)

سازه‌ها	جداسازی شده			با یای گیردار		
	مد اول	مد دوم	مد اول (آیین نامه)	مد اول	مد دوم	مد اول (آیین نامه)
سه طبقه	۱/۵۳	۰/۱۸۵	۱/۵	۰/۷۴	۰/۲۳	۰/۴۱
پنج طبقه	۲/۰۶	۰/۲۸	۲	۰/۸۹	۰/۳۲	۰/۶
هفت طبقه	۲/۶۲	۰/۴۵	۳	۱/۴	۰/۴۸	۰/۷۸



شکل ۳- سازه‌های مورد استفاده برای بررسی اثر برخورد

لرزه‌ای یکسان است، مقدار سختی برخورد برابر سختی محوری تیرهای موجود در محل برخورد در نظر گرفته شده است.

### ۳-۲- رکوردهای انتخاب شده

به منظور انجام تحلیل‌های تاریخچه زمانی غیر خطی از ۲۰ رکورد مربوط به زلزله‌های گوناگون استفاده شده است. بیشتر رکوردهای مورد استفاده از نظر ساختگاه دارای شرایط خاک یکسان با خاک نوع سوم آیین‌نامه ۲۸۰۰ [۱۸] هستند. هیچیک از زلزله‌ها در طبقه بندی زلزله‌های حوزه نزدیک پالسونگه قرار ندارند.

برای انجام تحلیل، هر یک از رکوردها، به صورتی که در ادامه توضیح داده می‌شود، مقیاس شده‌اند. در ابتدا طیف پاسخ شتاب مربوط به هر یک از رکوردهای افقی ثبت شده را به دست آورده و جذر مجموع مربعات SRSS دو طیف محاسبه شده، به دست می‌آید. متوسط طیف مربوط به جذر مجموع مربعات رکوردهای انتخابی در محدوده زمان تناوب‌های  $0.5T_D$  و  $1/25T_M$  با طیف طراحی مقایسه می‌گردد. در این محدوده، مقادیر میانگین نباید کمتر از  $1/2$  برابر مقدار نظیر آن در طیف طراحی باشند.  $T_D$  و  $T_M$  به ترتیب زمان تناوب مؤثر سازه دارای جداساز لرزه‌ای متناظر با تغییر مکان طرح و بیشترین تغییر مکان می‌باشد که در این مرحله برابر  $T_D$  در نظر گرفته شده‌اند.

### ۲-۲- مدل‌سازی برخورد

برای بررسی برخورد سازه‌های دارای جداگر لرزه‌ای با ساختمان‌های مجاور، فرض بر گیردار بودن ساختمان‌های مجاور است و برخورد تنها با یکی از ساختمان‌های اطراف صورت می‌گیرد (شکل ۳). برخورد سازه‌ها در طبقات به وقوع می‌پیوندد و تعداد طبقات سازه‌ها برابر می‌باشد.

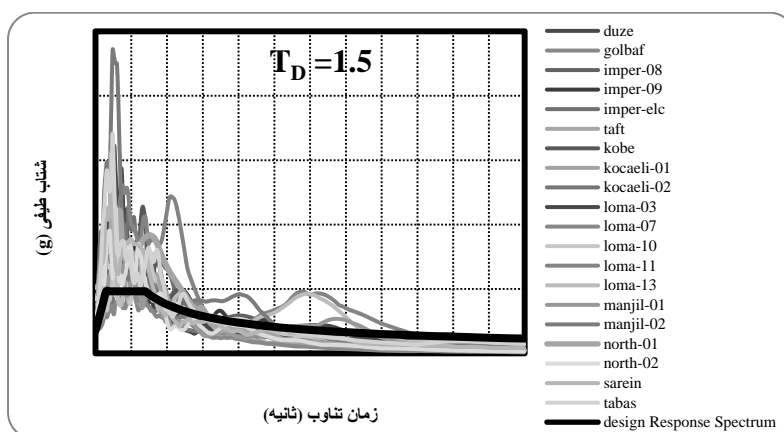
برای مدل‌سازی برخورد سازه از المان‌های الاستیک [۱۶]، ویسکو الاستیک خطی و یا ویسکو الاستیک غیر خطی استفاده می‌شود [۱۷]. در این تحقیق، برای مدل‌سازی از المان‌های الاستیک استفاده شده و از اتلاف انرژی در زمان برخورد صرف‌نظر شده است. به همین منظور، رفتار المان به گونه‌ای تعریف شده که دارای سختی کششی نباشد و در حالت فشاری نیز از رابطه زیر پیروی می‌کند:

$$f_s = \begin{cases} k_s [(u_i - u_j) - gap] & \text{if } u_i - u_j > gap \\ 0 & \text{if } u_i - u_j < gap \end{cases} \quad (2)$$

که در آن  $f_s$  نیروی انتقالی از یک سازه به سازه دیگر،  $k_s$  سختی برخورد است که مقدار آن همچنان ناشناخته بوده و تحقیقات گوناگونی برای به دست آوردن و ارائه یک مدل فیزیکی در حال انجام است [۱۷] و  $u_i$  و  $u_j$  تغییرمکان دو انتهای  $i$  و  $j$  المان برخورد می‌باشند. به دلیل اینکه محل برخورد دو سازه در نواحی تیرهای فرض شده است و پلان ساختمان مجاور با سازه دارای جداگر

جدول ۳- مشخصات رکوردهای زلزله مورد استفاده در تحقیق

Record	Earthquake Name	Station	Year	Moment Magnitude	PGA	Scale Factor		
						T=1.5Sec	T=2Sec	T=2.5Sec
DUZE	Duzce, Turkey	Duzce	۱۹۹۹	۷/۱۴	۰/۴۲۷۳	۱/۲۲۵	۱/۳۴۰۸	۱/۳۹۴۵
GOLBAF		GOLBAF	۱۹۸۱	۷/۰	۰/۲۳	۲/۲۸۸۷	۳/۳۹۰۴	۵/۷۷۹۶
IMPER-08	Imperial Valley-05	EL CENTRO ARRAY #12	۱۹۷۹	۶/۵۳	۰/۱۳۸۲	۴/۴۴۴۳	۴/۰۰۴۳	۴/۵۵۶۲
IMPER-09	Imperial Valley-06	EL CENTRO ARRAY #13	۱۹۷۹	۶/۵۳	۰/۱۲۱۲	۵/۹۸۱۱	۵/۷۷۰۲	۶/۷۰۷۳
IMPER-ELC	Imperial Valley-02	EL CENTRO ARRAY #9	۱۹۴۰	۶/۹۵	۰/۲۵۸۴	۲/۶۷۴۶	۲/۷۲۲۹	۳/۱۰۲۶
TAFT	Kern County	Taft Lincoln School	۱۹۵۲	۷/۳۶	۰/۱۷۲۸	۴/۱۵۳۹	۶/۸۸۵۵	۷/۰۳۸۲
KOBE	Kobe, Japan	Shin-Osaka	۱۹۹۵	۶/۹	۰/۲۲۹۳	۲/۵۲۷۵	۳/۲۰۰۸	۳/۹۵۳۲
KOCAELI-01	Kocaeli ,Turkey	Ambarli	۱۹۹۹	۷/۵۱	۰/۲۲۲۸	۱/۹۶۱	۳/۹۵۱۱	۳/۹۲۷۲
KOCAELI-02	Kocaeli ,Turkey	DUZCE	۱۹۹۹	۷/۵۱	۰/۳۲۵۵	۱/۴۷۴۳	۱,۷۲۵۵	۲/۳۳۱۶
LOMA-03	LOMA PRIETA	Agnews State Hospital	۱۹۸۹	۶/۹۳	۰/۱۵۴۷	۴/۳۸۵۳	۴/۰۸۹۸	۴/۰۴۸۹
LOMA-07	LOMA PRIETA	Foster City - APEEL 1	۱۹۸۹	۶/۹۳	۰/۲۹۱۲	۱/۴۴۶	۲/۳۸۳۵	۲/۳۷۵۸
LOMA-10	LOMA PRIETA	Hollister Diff. Array	۱۹۸۹	۶/۹۳	۰/۲۶۳۵	۱/۸۸۶۳	۲/۳۷۲۵	۲/۳۹۸
LOMA-11	LOMA PRIETA	Palo Alto ۱۹۰۰ - Embarc.	۱۹۸۹	۶/۹۳	۰/۲۰۸۹	۳/۵۶۸۲	۳/۳۹۰۸	۳/۲۷۱۱
LOMA-13	LOMA PRIETA	Sunnyvale - Colton Ave.	۱۹۸۹	۶/۹۳	۰/۲۱۱۷	۲/۷۴۲۷	۲/۶۸۹	۲/۵۱۹۵
MANJIL-01	Manjil, Iran	Abhar	۱۹۹۰	۷/۳۷	۰/۱۷۰۳	۳/۱۸۰۱	۳/۱۴۷۵	۳/۰۵۱
MANJIL-02	Manjil, Iran	Qazvin	۱۹۹۰	۷/۳۷	۰/۱۵۹۵	۵/۷۰۵۸	۵/۶۸۱۸	۶/۱۴۷۳
NORTHR-01	Northridge-01	Arleta - Nordhoff Fire Sta	۱۹۹۴	۶/۶۹	۰/۳۲۹۸	۲/۵۵۹۴	۳/۱۶۰۲	۳/۰۷۱۶
NORTHR-02	Northridge-02	Canoga Park - Topanga Can	۱۹۹۴	۶/۶۹	۰/۳۷۶۴	۱/۷۱۴۴	۱/۸۳۰۷	۲/۶۳۵
SAREIN		Ardebil 2	۱۹۹۷	۶	۰/۱۶۸۰	۶/۰۶۶۳	۶/۴۱۶۶	۶/۵۵۲۲
TABAS	Tabas, Iran	TABAS	۱۹۷۸	۷/۳۵	۰/۸۱۲۸	۱/۰۰۷۲	۱/۰۲۲۳	۱/۰۹۳



شکل ۴- طیف پاسخ شتاب مؤلفه مقیاس شده مورد استفاده در تحلیل مربوط به سازه سه طبقه

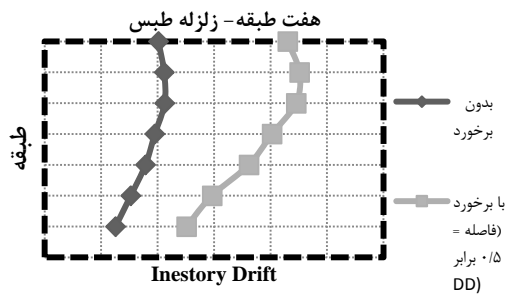
### ۴- تحلیل سازه‌ها در اثر برخورد با سازه

#### مجاور

برای بررسی اثر برخورد سازه‌های با جداگر لرزه‌ای به سازه‌های مجاور ۳ ساختمان با تعداد طبقات برابر با سه،

در جدول ۳ مشخصات مربوط به زلزله‌های انتخابی و مقادیر ضریب مقیاس ارائه شده است. در شکل ۴ طیف پاسخ شتاب مؤلفه مقیاس شده مورد استفاده در تحلیل مربوط به سازه سه طبقه نشان داده شده است.

نیروی انتقالی ناشی از برخورد را در طبقه هفتم برای سازه مورد بحث در شکل ۵ نشان می‌دهد.

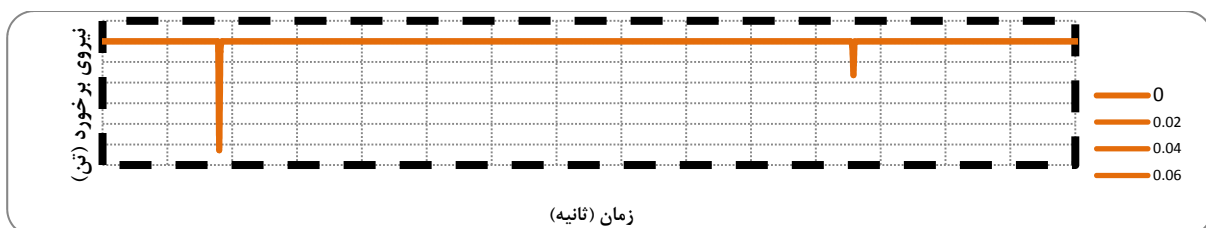


شکل ۵- تغییرات جابجایی نسبی طبقات برای سازه هفت طبقه در اثر زلزله طبس

فاصله بین ساختمان‌ها به ترتیب  $0.1$ ،  $0.25$ ،  $0.5$ ،  $0.75$ ،  $1$ ،  $1.25$ ،  $1.5$  و  $2$  برابر تغییر مکان طرح (DD) سازه‌های دارای جداگر لرزه‌ای انتخاب شده است. هر یک از سازه‌ها برای این فواصل و رکوردهای انتخابی مورد تحلیل تاریخیچه زمانی غیر خطی قرار گرفته است. در مجموع برای بررسی تأثیر برخورد بر نیازهای لرزه‌ای  $540$  تحلیل تاریخیچه زمانی غیر خطی انجام شده است.

پنج و هفت در نظر گرفته شده است. ساختمان‌های مجاور نیز دارای تعداد طبقات و جرم برابر با سازه‌های دارای جداگر لرزه‌ای است، با این تفاوت که سیستم سازه‌ای آنها قاب خمشی است. مشخصات دینامیکی هر یک از سازه‌های با پای گیردار در جدول ۲ ارائه شده است. برای تحلیل سازه‌ها از نرم‌افزار Sap 2000 [۱۹] استفاده شده است.

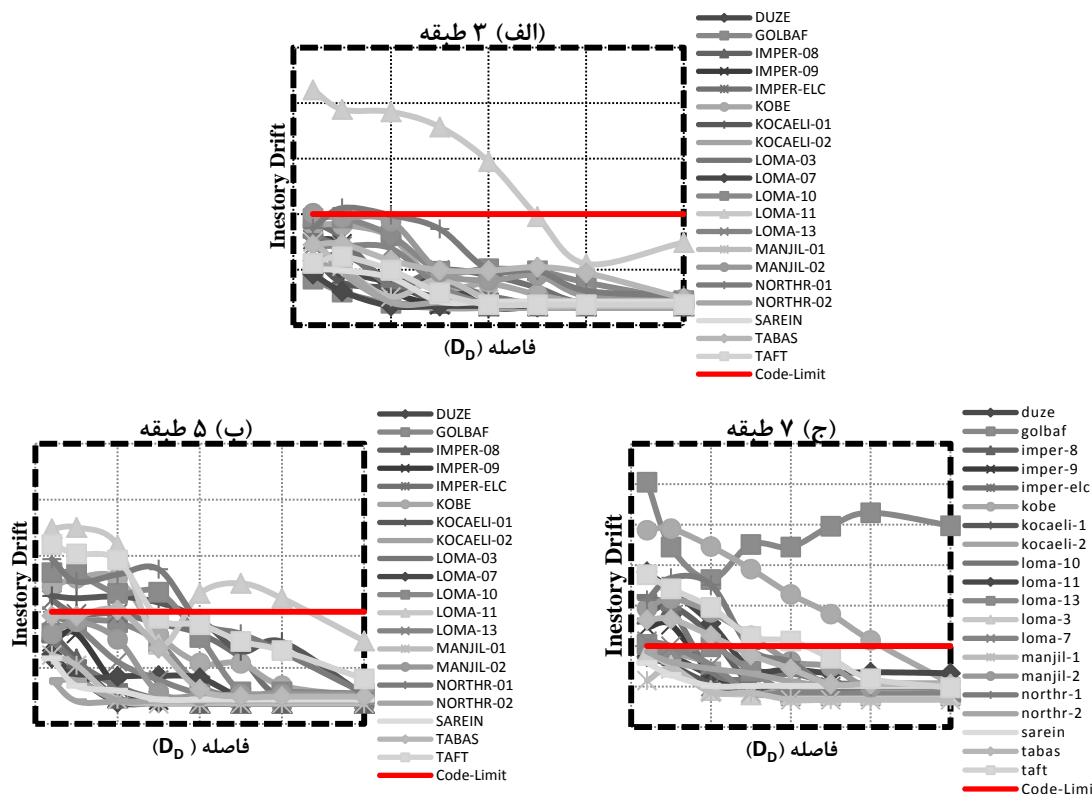
هر یک از سازه‌ها بر اثر رکوردهای زلزله انتخاب شده مورد تحلیل قرار گرفتند و تأثیرات برخورد بین سازه‌ها در زمان زلزله بر نیازهای لرزه‌ای مورد بررسی قرار گرفت. فاصله بین سازه‌ها برخلاف بسیاری از تحقیقات گذشته براساس تغییرمکان طرح سازه‌های با جداگر تغییر می‌کند تا بتواند دید قابل درکی را ارائه دهد. در شکل ۵ تغییرات جابجایی نسبی طبقات برای سازه هفت طبقه را در دو حالت بدون برخورد و در حالتی که فاصله بین دو سازه برابر نصف تغییر مکان طرح سازه جداگر لرزه است نشان می‌دهد. این شکل برای زلزله طبس است و همانطور که قابل مشاهده است برخورد دو سازه تأثیر به‌سزایی دارد و مقادیر را تا حد زیادی افزایش می‌دهد. شکل ۶ تاریخیچه



شکل ۶- تاریخیچه نیروی انتقالی ناشی از برخورد در طبقه هفتم برای سازه هفت طبقه در اثر زلزله طبس و فاصله  $0.5$  برابر DD

$0.1$  می‌شوند، افزایش قابل توجه داشته است. این افزایش برای ساختمان هفت طبقه بیشتر است و علاوه بر آن تغییرات نرخ افزایش مقادیر نامنظم‌تر و دارای پراکندگی بیشتری نسبت به دو حالت قبل می‌باشد. از این رو می‌توان نتیجه گرفت که با افزایش تعداد طبقات تأثیر برخورد بر تغییرمکان نسبی طبقات افزایش می‌یابد.

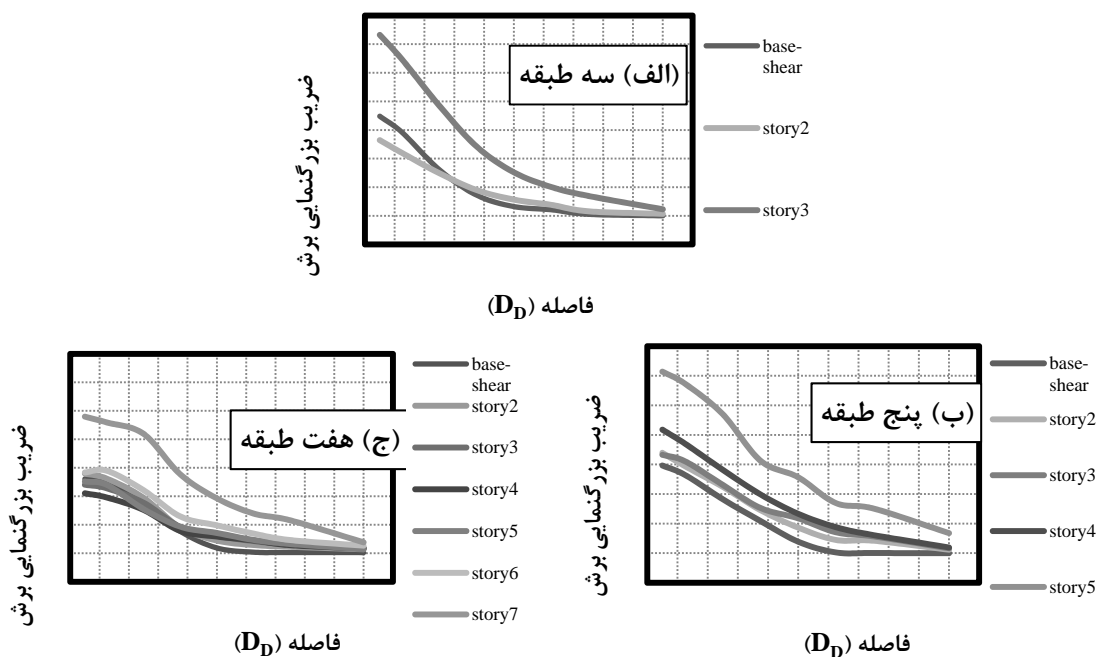
در شکل ۷، تغییرات حداکثر تغییرمکان نسبی ایجاد شده بر اثر هر رکورد در برابر فاصله بین دو سازه برای هر سه ساختمان مورد بررسی ترسیم شده است. در شکل ۷-الف می‌توان دید که تنها یکی از رکوردها در فاصله‌های کمتر از  $1.25DD$  در سازه سه طبقه باعث ایجاد تغییرمکان نسبی بیش از  $0.1$  شده است. در شکل ۷-ب که مربوط به سازه پنج طبقه است، مقادیر تغییرمکان نسبی و تعداد رکوردهایی که باعث ایجاد تغییرمکان‌های نسبی بیش از



شکل ۷- تغییرات حداکثر تغییرمکان نسبی ایجاد شده بر اثر هر رکورد در برابر فاصله بین دو سازه: (الف) سازه سه طبقه، (ب) پنج طبقه و (ج) هفت طبقه

در ادامه، به بررسی این افزایش مقادیر تغییر مکان نسبی بر برش طبقات پرداخته می‌شود. به این منظور، برش طبقات در دو حالت با در نظر گرفتن برخورد و بدون در نظر گرفتن برخورد به دست آورده می‌شود. حاصل تقسیم برش طبقه در حالت با برخورد به حالت بدون برخورد،

ضریب بزرگنمایی برش میانگین ضریب بزرگنمایی حاصل از تحلیل‌های انجام شده را در برابر فاصله بین دو سازه نشان می‌دهد. در این تحقیق، نمودار نشان داده شده در شکل ۸ طیف برخورد نامیده می‌شود و در ادامه از این نام استفاده می‌گردد.



شکل ۸- طیف برخورد برای سازه‌های: (الف) سه طبقه، (ب) پنج طبقه و (ج) هفت طبقه



فاصله بین دو سازه برابر جمع دو مقدار تغییرمکان طرح سازه با جداگر لرزه‌ای ( $D_D$ ) و تغییرمکان طیفی سازه با پای گیردار ( $D_{fix}$ ) در نظر گرفته می‌شود. پس خواهیم داشت:

$$Gap = D_D + \frac{S_a}{\left(\frac{2\pi}{T_{fix}}\right)^2} \quad (۴)$$

برای بررسی اینکه این فاصله به دست آمده از روش توضیح داده شده در بالا تا چه مقدار کارآمد است و برخورد بین سازه‌ها را کاهش می‌دهد، هر سه ساختمان برای این فاصله تحلیل و با مقادیر حاصل از بخش‌های قبل مقایسه شدند.

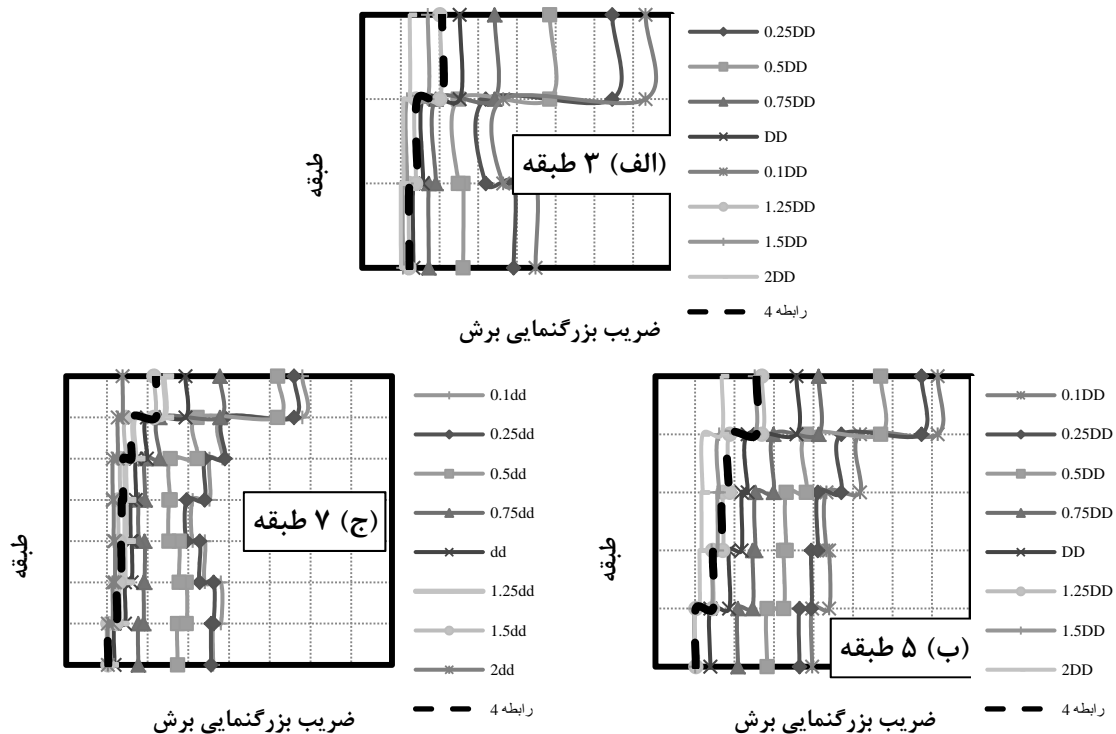
در شکل ۹ میانگین ضریب بزرگنمایی برش برای هر طبقه بر اساس فاصله بین دو ساختمان مجاور رسم شده است. مقدار خط‌چین حاصل به دست آمده از روش فوق است. همانطور که ملاحظه می‌شود، در هر سه سازه این فاصله ضریب بزرگنمایی را به میزان نسبتاً زیادی کاهش می‌دهد و می‌توان دید که به طور قابل ملاحظه‌ای مؤثر می‌باشد.

طیف برخورد برای تمام طبقات ساختمان‌های مورد تحلیل به دست آمده است. همان طور که از شکل ۸ قابل مشاهده است، ضریب بزرگنمایی مربوط به برش پایه نسبت به دیگر طبقات زودتر به مقدار واحد می‌رسد. علاوه بر این، می‌توان دید که تغییرات ضریب بزرگنمایی برش به غیر از طبقه بام، برای دیگر طبقات دارای یک روند و مقادیر نزدیک به هم است. اما در هر سه ساختمان مورد بررسی ضریب بزرگنمایی برای طبقه بام بیش از دیگر طبقات است و اختلاف چشمگیری نیز وجود دارد.

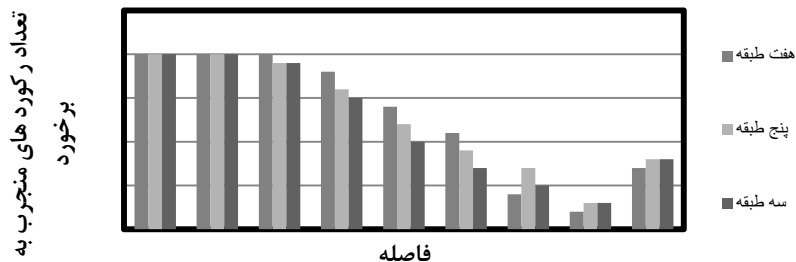
در ادامه این تحقیق، تعیین یک رابطه برای کاهش اثر برخورد دو سازه مجاور بررسی می‌شود. به این منظور، تغییرمکان طیفی برای سازه با پای گیردار به صورت رابطه ۳ تعریف می‌شود:

$$D_{fix} = \frac{S_a}{\omega^2} = \frac{S_a}{\left(\frac{2\pi}{T_{fix}}\right)^2} \quad (۳)$$

که در آن  $S_a$  مقدار طیفی شتاب حاصل از طیف طراحی برای دوره تناوب سازه با پای گیردار ( $T_{fix}$ ) است. حال،



شکل ۹- میانگین ضریب بزرگنمایی برش برای هر طبقه بر اساس فاصله بین دو ساختمان مجاور: الف) سه طبقه، ب) پنج طبقه و ج) هفت طبقه



شکل ۱۰- تعداد رکوردهایی که برای هر یک از فواصل مورد مطالعه باعث ایجاد برخورد بین دو سازه می‌شوند

جدول ۴- حداقل فاصله بین دو ساختمان براساس رابطه

شماره ساختمان	تعداد طبقه	سازه فولادی- با پای گیردار	مشخصات سازه با جداگر لرزه‌ای							
			$T_D = 1.5 \text{ sec}$		$T_D = 2 \text{ sec}$		$T_D = 2.5 \text{ sec}$			
			Tfix(sec)	Sa(g)	$D_D(m)$	Gap(m)	$D_D(m)$	Gap(m)	$D_D(m)$	Gap(m)
۱	۱		۰/۱۸۲۴	۰/۹۶۳	۰/۲	۰/۲۰۷۹۵	۰/۳	۰/۳۰۷۹۵	۰/۴	۰/۴۰۷۹۵
۲	۲		۰/۳۰۶۷	۰/۹۶۳	۰/۲	۰/۲۲۲۵	۰/۳	۰/۳۲۲۵	۰/۴	۰/۴۲۲۵
۳	۳		۰/۴۱۵۷	۰/۹۶۳	۰/۲	۰/۲۴۱۳۳	۰/۳	۰/۳۴۱۳۳	۰/۴	۰/۴۴۱۳۳
۴	۴		۰/۵۱۵۸	۰/۹۶۳	۰/۲	۰/۲۶۳۶۳	۰/۳	۰/۳۶۳۶۳	۰/۴	۰/۴۶۳۶۳
۵	۵		۰/۶۰۹۸	۰/۹۶۳	۰/۲	۰/۲۸۸۹۳	۰/۳	۰/۳۸۸۹۳	۰/۴	۰/۴۸۸۹۳
۶	۶		۰/۶۹۹۱	۰/۹۶۳	۰/۲	۰/۳۱۶۹	۰/۳	۰/۴۱۶۹	۰/۴	۰/۵۱۶۹
۷	۷		۰/۷۸۴۸	۰/۸۹۲	۰/۲	۰/۳۳۶۴۹	۰/۳	۰/۴۳۶۴۹	۰/۴	۰/۵۳۶۴۹
۸	۸		۰/۸۶۷۵	۰/۸۳۴	۰/۲	۰/۳۵۵۹۹	۰/۳	۰/۴۵۵۹۹	۰/۴	۰/۵۵۵۹۹
۹	۹		۰/۹۴۷۶	۰/۷۸۷	۰/۲	۰/۳۷۵۴۹	۰/۳	۰/۴۷۵۴۹	۰/۴	۰/۵۷۵۴۹
۱۰	۱۰		۱/۰۲۵۵	۰/۷۴۶	۰/۲	۰/۳۹۴۹۹	۰/۳	۰/۴۹۴۹۹	۰/۴	۰/۵۹۴۹۹

#### ۴- نتیجه گیری

با در نظر گرفتن بررسی انجام شده می‌توان نتیجه گرفت که :

۱- در اثر برخورد زمانی که فاصله بین دو سازه کم می‌باشد، تغییرمکان نسبی بین طبقات به میزان قابل توجهی از مقدار مجاز آیین‌نامه افزایش زیادتر می‌شود.

۲- تغییرات مقادیر تغییرمکان نسبی طبقات در سازه بلندتر در اثر برخورد با سازه مجاور،

بعلاوه، در شکل ۱۰ تعداد رکوردهایی که باعث ایجاد برخورد بین دو سازه می‌شوند برای هر یک از فواصل نشان داده شده است. همانطور که می‌توان دید، فاصله به دست آمده از رابطه ۴ از برخورد در ۶۰٪ از رکوردها جلوگیری می‌کند.

در جدول ۴ مقادیر رابطه ۴ برای سازه تا ۱۰ طبقه با پای گیردار در مجاورت سازه‌های با جداگر لرزه‌ای دارای دوره‌های تناوب ۱/۵، ۲ و ۲/۵ ثانیه ارائه شده است.

- ۵- در هر سه ساختمان مورد بررسی، ضریب بزرگنمایی برای طبقه بام بیش از دیگر طبقات است و اختلاف چشمگیری نیز وجود دارد.
- ۶- با بررسی تعداد رکوردهای منتج به برخورد می-توان دید که در فواصل کمتر از ۰/۵ برابر تغییرمکان طرح تمام رکوردها باعث ایجاد برخورد می-شوند و حتی در فاصله برابر تغییرمکان طرح بیش از ۵۰٪ رکوردها باعث ایجاد برخورد می-شوند.
- ۷- در انتها یک رابطه ساده برای به دست آوردن فاصله بین دو سازه مجاور ارائه شده است. برای این فاصله تمام سازه‌ها مورد تحلیل قرار گرفته‌اند و نشان داده شد که در ۶۰٪ از رکوردها از برخورد بین دو سازه جلوگیری شده است.

- نامنظم‌تر و دارای پراکندگی بیشتری نسبت به سازه‌های کوتاهتر است. همچنین مقادیر تغییرمکان نسبی در سازه‌های بلندتر بیشتر می‌باشد. از این رو می‌توان نتیجه گرفت که با افزایش تعداد طبقات، تأثیر برخورد بر تغییرمکان نسبی طبقات افزایش می‌یابد.
- ۳- با توجه به طیف برخورد می‌توان دید که در اثر برخورد در فواصل کم مقدار برش پایه می‌تواند تا ۴/۵ برابر افزایش یابد. همچنین می‌توان دید که با کاهش تعداد طبقات، ضریب بزرگنمایی برش طبقه افزایش می‌یابد.
- ۴- ضریب بزرگنمایی مربوط به برش پایه نسبت به دیگر طبقات زودتر به مقدار واحد می‌رسد. علاوه بر آن می‌توان دید که تغییرات ضریب بزرگنمایی برش به غیر از طبقه بام، برای دیگر طبقات دارای یک روند و مقادیر نزدیک به هم است.

## مراجع

- [1] Anagnostopoulos, S.A. (1988), "Pounding of buildings in series during earthquakes". Earthquake Eng. Struc. Dynamics, Vol. 16, pp. 443-456.
- [2] Anagnostopoulos, S.A., Spiliopoulos, K.V. (1992), "An investigation of earthquake induced pounding between adjacent buildings". Earthquake Eng. Struc. Dynamics, Vol. 21, pp. 289-302.
- [3] Tsai, H.C. (1997), "Dynamic analysis of base-isolated shear beams bumping against Stops". Earthquake Eng. Struc. Dynamics, Vol. 26, pp. 515-528.
- [4] Malhotra, P.K. (1997), "Dynamics of seismic impacts in base-isolated buildings." Earthquake Eng. Struc. Dynamics, Vol. 26, pp. 797-813.
- [5] Matsagar, V.A., Jangid, R.S. (2003), "Seismic response of base-isolated structures during impact with adjacent structures". Eng. Struc., Vol. 25, pp. 1311-1333.
- [6] Komodromos, P., Polycarpou, P.C., Papaloizou, L., Phocas, M.C. (2007), "Response of seismically isolated buildings considering poundings". Earthquake Eng. Struc. Dynamics, Vol. 36, pp. 1605-1622.
- [7] Komodromos, P. (2008), "Simulation of the earthquake-induced pounding of seismically isolated buildings". Computers Struc., Vol. 86, pp. 618-626.
- [8] Polycarpou, P.C., Komodromos, P. (2010), "Earthquake-induced poundings of a seismically isolated building with adjacent structures". Eng. Struc., Vol. 32, pp. 1937-1951.

- [9] Agarwala, V.K., Niedzweckia, J.M., Lindtb, J.W. (2007), "Earthquake induced pounding in friction varying base isolated buildings". Eng. Struc., Vol. 29, pp. 2825-2832.
- [۱۰] دستورالعمل طراحی ساختمان‌های دارای جداساز لرزه‌ای (۱۳۸۹). زیر نظر کمیته تخصصی (ویرایش اول)، مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن، تهران.
- [11] AISC. (1994), "Load and resistance factor design specification". Am. Inst. of Steel Construc., Chicago, Illinois.
- [۱۲] مقررات ملی ساختمان مبحث ششم (۱۳۸۵). بارهای وارد بر ساختمان. وزارت مسکن و شهر سازی، دفتر تدوین و ترویج مقررات ملی ساختمان.
- [13] Naeim, F., Kelly, J.M. (1999), "Design of Seismic Isolated Structures : From Theory to Practice". John Wiley & Sons, Inc.
- [14] Cheng, F.Y., Jiang, H., Lou, K. (2008), "Smart Structures: Innovative Systems of Seismic Response Control". Taylor & Francis Group.
- [15] Ozdemir, G.C., Constantinou, M. (2010), "Evaluation of equivalent lateral force procedure in estimating seismic isolator displacements". Soil Dynamics and Earthquake Eng., Vol. 30, pp.1036-1042.
- [16] Kun, Y., Li, L., Hongping, Z. (2009), "A modified Kelvin impact model for pounding simulation of base-isolated building with adjacent structures". Earthquake Eng. Eng. Vibr>, Vol. 8, pp. 433-446.
- [17] Jankowski, R. (2005), "Non-linear viscoelastic modelling of earthquake-induced structural pounding". Earthquake Eng. Struc. Dynamics, Vol. 34, pp. 595-611.
- [۱۸] آیین‌نامه طراحی ساختمان‌ها در برابر زلزله (۱۳۸۴). استاندارد ۲۸۰۰ (ویرایش سوم)، کمیته دائمی بازنگری آیین‌نامه طراحی ساختمان‌ها در برابر زلزله، مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن، تهران.
- [19] Computer & Structures. (2009) و "Sap 2000: Linear and Nonlinear Static and Dynamic Analysis and Design of Three-Dimensional Structures". Computers & Structures Inc., Berkeley, California.

## Effect of pounding in seismic demand of seismic isolated structures

G. Ghodrati Amiri<sup>1,\*</sup>, M. Bararnia<sup>2</sup>, M. Abedpour<sup>3</sup>, P. Namiranian<sup>4</sup>

1. Professor, School of Civil Engineering, Iran University of Science & Technology
2. PhD Student, Faculty of Water & Environmental Engineering, Power & Water University of Technology
3. M.Sc, Islamic Azad University (Tehran Jonob Branch)
4. PhD Candidate, School of Civil Engineering, Iran University of Science & Technology

\*Corresponding Author: ghodrati@iust.ac.ir

---

### ARTICLE INFO

---

Keywords:

Base Isolator,  
Impact,  
Seismic Gap,  
Seismic Demands,  
Nonlinear Dynamic  
Analysis.

---

### =ABSTRACT

---

In this paper, the results of study on seismic isolated buildings and effects of seismic gaps between such buildings and adjacent buildings during earthquake have been presented. The importance of this study can be explained as, the results can be use to evaluate the effects of seismic gap between structures which are subject to earthquake. Statistic information has been obtained by analyzing buildings with three, five and seven stories that were subjected to 20 earthquake records. Gaps among buildings changed based on characteristic of them with base isolation system; it can give us a better point. Each of structures was analyzed under the selected records and it was investigated effect of impact between them during earthquake on seismic demands. In addition for studying effects of pounding on seismic demand in structures with base isolated system, 540 nonlinear time history analysis was performed. At the end we suggested a simple and effective equation that can reduce effects of pounding on adjacent buildings

---