

## نقش فاصله مابین و کاربرد میراگر ویسکوالاستیک برای کاهش اثر ضربه‌ای زلزله در ساختمان های بتنی کوتاه مجاور

سید مهدی زهرائی\*، استاد، قطب علمی مهندسی و مدیریت زیرساختهای عمرانی، دانشکده عمران دانشگاه تهران، تهران، ایران

سید محمد خاتمی، دکتری مهندسی عمران، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه پورتو، پرتغال

[mzahrai@ut.ac.ir](mailto:mzahrai@ut.ac.ir)

تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۵/۰۳/۲۵ تاریخ پذیرش نهایی: ۱۳۹۵/۰۶/۰۲

### چکیده:

رشد چشمگیر ساختمان‌ها در اشکال و ارتفاع های مختلف در حوزه شهرنشینی و عدم توجه به وابستگی آن‌ها در مجاورت یکدیگر به هنگام بروز زلزله، مشکلات ناشی از اثرات نامطلوب بارهای لرزه‌ای را افزایش داده است. ساختمان‌های ساخته شده هر یک به تنهایی در برابر بارهای لرزه‌ای محاسبه و ساخته شده‌اند. اما عدم توجه به ضربات ساختمان‌های مجاور به یکدیگر در هنگام زلزله، کمتر مورد توجه و بررسی قرار گرفته است. این امر باعث می‌شود هر ساختمان به صورت واحد طراحی شده و در تعداد طبقات متنوع و ارتفاعات مختلف ساخته شوند. ضربات عنوان شده بر دو نوع سقف به سقف و سقف به ستون است که در این مقاله حالت اول بررسی شده است. تفاوت در سختی دو ساختمان باعث ایجاد نیروی نابرابری به سقف ساختمان‌ها می‌شود که موجبات تخریب ساختمان را به همراه دارد. برای مطالعه عددی از نرم‌افزارهای *SAP* و *ANSYS* استفاده شده است تا جابجایی جانبی و نیروی ضربه به صورت غیرخطی نشان داده شده و همچنین میزان ترک‌خوردگی در ضربه نشان داده شود. در این مطالعه و برای بررسی میزان نیروی ضربات ساختمان‌ها به یکدیگر و نحوه کاهش آن، از دو ساختمان بتن مسلح ۲ و ۳ طبقه استفاده شده است و نیروی ضربه بین آنها، مورد مطالعه قرار گرفته است. برای کاهش اثرات ضربه، نقش میزان فاصله مابین دو سازه مجاور و کاربرد میراگر ویسکوالاستیک در مهاربندی آنها بررسی شده است. نتایج این تحلیل‌ها نشان می‌دهد که قرارگیری میراگر و افزایش فاصله دو سازه می‌تواند با کاهش تغییر مکان جانبی رو به رو بوده و اثرات ضربه‌ای را کاهش دهد. به طور مثال، فاصله ۳ سانتی‌متری دو ساختمان مجاور، ۷ ضربه را به همراه داشته است که افزایش این فاصله به ۴/۵ سانتی متر، تعداد این ضربات را به ۲ ضربه کاهش می‌دهد. همچنین قرارگیری میراگر ویسکوالاستیک در طبقات ساختمان باعث کنترل جابجایی جانبی شده و ضربات ساختمان‌ها را به یک ضربه کاهش داده است.

**کلید واژگان:** ستون‌های دوجداره فولادی پر شده با بتن، روش عناصر محدود، بارگذاری چرخه‌ای، کماتش جداره فولاد

## مقدمه

می‌توان فاصله بین ساختمان‌ها را بر اساس مصالح و ارتفاع طوری محاسبه و اجرا کرد که اثرات ضربه آنها کاهش یابد. والاس و رینهام [۶] با انجام تحقیق مشابهی، رابطه‌ای را ارائه کردند که بر اساس آن فاصله بهینه بین دو ساختمان برای جلوگیری از اثرات مخرب برخورد دو سازه محاسبه شده است. کهپیانکووسکی [۷]، با ارائه روابطی، ارتباط مستقیمی بین جرم سازه و سرعت آن، همچنین فاصله دو ساختمان ایجاد کرد و نشان داد که چنانچه ساختمان‌ها تحت بارهای لرزه‌ای رفتاری الاستیک داشته باشند، سرعت نهایی ساختمان‌ها به صورت معکوس تغییر می‌کند. بدین معنا که تحت ضربه، سازه با سرعت اولیه بیشتر، سرعت نهایی کمتری را نسبت به ساختمان مجاور تجربه می‌کند. اما اگر هر دو سازه وارد مرحله پلاستیک شوند، سرعت نهایی یکسانی داشته و با هم جابجا می‌شوند. در مطالعه‌های دیگری، نادرپور و همکاران [۸-۹-۱۰] با ارائه روابطی به محاسبه میزان نیروی ضربه پرداخته و میرایی مورد نظر را تخمین زده‌اند. کول و همکارانش [۱۱]، نشان دادند که بیشترین حساسیت و توجه در ضربه‌های ناشی از بارهای لرزه‌ای به اتصال سقف و ضربه آن به ستون ساختمان مجاور می‌باشد. ایشان با مدل کردن دو ساختمان با ارتفاع‌های متفاوت نشان دادند که برش رخ داده از ضربه سقف به ستون، تا ۱۸ درصد بیشتر از برش بوجود آمده از برخورد دو سقف می‌باشد. در این مطالعه و برای بررسی اثر ضربه بر ساختمان‌های مجاور، از دو ساختمان ۲ و ۳ طبقه و یک رکورد زلزله نزدیک گسل استفاده شده است. در مرحله اول، تحلیل سازه‌ها با تغییر در فاصله بین دو سازه و در مرحله دوم با استفاده از یک میراگر در طبقات مدل‌ها (شکل ۱)، اثر این المان خارجی در کاهش اثرات ضربه مورد نقد و بررسی قرار گرفته است.



شکل ۱. میراگر محوری ویسکو الاستیک

میراگرهای مورد استفاده در تحلیل‌های عددی، یک مدل میراگر خطی با فنر است که به صورت متوالی مدل می‌شوند. تغییر شکل کلی میراگر به صورت مجموعه‌ای از تغییر شکل فنر و نسبت شکل به میرایی در میراگر می‌باشد. بدین صورت که،

$$\Delta = d_c + d_k$$

$$F = Kd_k = Cd_c \exp \quad (1)$$

که در این رابطه،  $k$  ثابت فنر،  $C$  ضریب میرایی است و توان  $(\exp)$  نیز در محدوده‌ای بین ۰/۲ تا ۲ می‌باشد که معمولاً در کارهای تحقیقاتی از ۱ استفاده می‌گردد. برای جلوگیری از ضربه دو مدل و محاسبه نیروی وارده از المان Gap استفاده می‌شود که المانی فنی

زلزله، از مصیبت‌بارترین بلایای طبیعی هر ساله در گوشه و کنار جهان، موجب خرابی‌های شدید و مرگ گروهی از انسان‌ها می‌شود. ترس از مواجه شدن با زلزله و اثرات مخرب آن باعث شد تا دست اندرکاران صنعت ساختمان، ساخت سازه‌های مناسب در برابر این تحرکات زمین را امری ضروری در طراحی و اجرا بدانند. از طرف دیگر، ایجاد بناهایی برای سکونت قشر بیشتری از مردم و اختصاص فضاهای خدماتی گسترده‌تر، سازه‌های بلند مرتبه را با استقبال قابل توجهی مواجه کرد. طراحی این ساختمان‌ها در مکان‌های مختلف، تفاوت چشمگیری با یکدیگر دارند. خرابی‌های ایجاد شده در زلزله‌های گذشته، به خوبی نشان می‌دهد که محل ساخت ساختمان، ارتفاع و شکل آن، سیستم سازه‌ای و مقاوم آن و فاصله نزدیک‌ترین گسل عبوری از آن، نوع خاک، رکورد زلزله‌های رخ داده و خصوصیات محتوایی آن، باعث رفتارهای کاملاً متفاوت در ساختمان‌ها می‌شود. اما توجه به وابستگی رفتاری دو ساختمان مجاور و ایجاد شرایطی برای جداسازی پاسخ‌های لرزه‌ای آن‌ها، کمتر مورد توجه متخصصین و طراحان صنعت ساختمان بوده است. اثرات ضربه‌ای (*Pounding*) دو سازه کنار هم که در هنگام بروز زلزله، رفتارهای متفاوتی از هم دارند باعث تخریب آن‌ها می‌شود. غافل از آن که این ساختمان‌ها هر یک به تنهایی قابلیت مقاومت در برابر زلزله را داشته‌اند، اما به سبب ایجاد نیروی ناگهانی ضربه، فراتر از انتظار محاسب، ساختمان دچار تخریب می‌شود. ناگفته پیداست که تغییر مکان جانبی، موثرترین دلیل برای این اتفاق می‌باشد که کاهش آن تاثیر قابل توجهی بر کنترل اثرات ضربه‌ای می‌باشد. محققین، تحقیقات زیادی در مورد بررسی اثرات ضربه انجام داده‌اند. اناگوستوپولوس [۱]، با بررسی اثرات ضربه ساختمان‌ها در کشور یونان، دریافت که می‌توان با سخت‌تر کردن سازه‌ها از اثرات ضربه دو ساختمان مجاور کاست. ایشان با پیشنهاد رابطه‌ای، ارتباط مستقیمی بین جرم سقف‌ها و میزان میرایی سازه ارائه کرده و میزان بهینه میرایی آن‌ها را نشان داده است. در این رابطه، جرم و سختی سازه، با یک ضریب میرایی تعدیل شده و مقدار عددی بهینه میرایی بدست می‌آید [۲]. کاواشیما و واتانابا [۳]، در یک مطالعه عددی به بررسی اثر ضربه در پل‌ها پرداخته و دریافتند که با پخش جرم موثر سازه در المان‌های کوچکتر با تعداد بیشتر، می‌توان سختی سازه را افزایش داد و از تغییر مکان‌های جانبی بزرگ کاست. آن‌ها جرم دو پل مجاور یکدیگر را به ۵ جرم کوچکتر تقسیم کرده و با اتصال یک فنر به هم وابسته نمودند. این مطالعه نشان داد که سختی المان جدید، در حدود ۵ برابر سختی سقف با دی‌گرام صلب می‌باشد. کول و همکاران [۴]، با استفاده از ایده کاواشیما، سرعت و مشخصات فیزیکی سازه را بررسی کرده و با ارائه رابطه‌ای، میزان نیروی ضربه را با استفاده از مشخصات هر سازه بدست آورده‌اند. در تحقیق دیگری، کاسائی [۵]، با ارائه یک رابطه ریاضی نشان داد که

ساختمان‌های بتن مسلح تحت زلزله‌های حوزه نزدیک، از میزان جابجایی جانبی سازه ۵۰ درصد کاست. برای تحلیل دینامیکی سازه‌ها از رابطه جرم-سختی-فتر استفاده می‌شود و از ارتباط مستقیم بین آن‌ها و مشتقاتی از جابجایی، پاسخ نهایی را بدست می‌آید.

اصل دالامبر که بر اساس آن معادلات تعادل سیستم‌های یک درجه آزادی بنا نهاده شده است نشان داد که می‌توان مسائل پیچیده دینامیک سازه را با کاهش درجات آزادی از روش تمرکز جرم (Lump mass) و یا حذف گره‌ها به راحتی تحلیل و بررسی نمود. بر این اساس،  $\mu'' + c\dot{u} + ku = F$  که بر اساس آن مشتق دوم جابجایی با جرم سازه، مشتق اول با میرایی و جابجایی سازه با سختی، تشکیل رابطه مستقیمی را می‌دهد ارائه شده است.

در این مطالعه و برای بررسی میزان نیروی وارده از سازه‌ها به یکدیگر، طبق شکل ۳، معادلات زیر برای هر یک از سیستم‌های A و B ارائه می‌گردد:

$$\begin{bmatrix} m1 & 0 \\ 0 & m2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{x}''1 \\ \ddot{x}''2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} c1 + c2 & -c2 \\ -c2 & c2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{x}'1 \\ \dot{x}'2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} k1 + k2 & -k2 \\ -k2 & k2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x1 \\ x2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F1 \\ F2 \end{bmatrix} \quad (2)$$

از تجمیع این سه ترم از معادله سازه A، نیروی بوجود آمده در این سازه بدست می‌آید. برای مدل B نیز روابط دینامیکی سازه به شرح ذیل می‌باشد:

$$\begin{bmatrix} m3 & 0 & 0 \\ 0 & m4 & 0 \\ 0 & 0 & m5 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{x}''1 \\ \ddot{x}''2 \\ \ddot{x}''3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} c3 + c4 + c5 & -c4 - c5 & -c5 \\ -c5 & c4 + c5 & -c5 \\ -c5 & -c5 & c5 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{x}'1 \\ \dot{x}'2 \\ \dot{x}'3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} k3 + k4 + k5 & -k4 - k5 & -k5 \\ -k5 & k4 + k5 & -k5 \\ -k5 & -k5 & k5 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x1 \\ x2 \\ x3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F3 \\ F4 \\ F5 \end{bmatrix} \quad (3)$$

اما به آن دلیل که سازه‌ها با فتر و کمک فتر مدلسازی شده‌اند، بخش قابل توجهی از نیروهای وارده در این دو سیستم مستهلک می‌گردد. این مقدار با ورود پارامترهای C و S به معادلات فوق، تعادل و نیروی کاهندگی را به سیستم اعمال می‌کنند. با منظور نمودن این دو در معادلات فوق، میزان نیروکاهش خواهد داشت. این مقدار:

$$\begin{bmatrix} S(x1a - x1b - d) + C(x'1a - x'1b) \\ S(x2a - x2b - d) + C(x'2a - x'2b) \end{bmatrix} \quad (4)$$

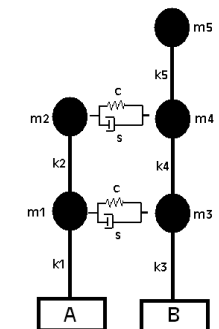
بوده و قابلیت تحمل فشار را دارد. این المان تاثیر مستقیمی در هنگام دور شدن سازه‌ها از خود نشان نمی‌دهد و رفتاری فشاری داشته و در کشش بصورت یک المان فیزیکی بدون تاثیر می‌باشد. شکل ۲، برخورد دو ساختمان مجاور یکدیگر را نشان می‌دهد که در اثر زلزله، دچار تخریب شده‌اند.



شکل ۲. تخریب دو ساختمان مجاور تحت ضربه در زلزله مکزیکوسیتی [۹]

### مطالعه عددی

برای تحلیل عددی رفتار ساختمان‌ها در کنار یکدیگر و اثرات ضربه، نیاز به ارزیابی رفتار دینامیکی سازه می‌باشد. این مدل‌ها در شکل ۳، و به صورت شماتیکی که برای تحلیل دینامیکی استفاده می‌شود ارائه شده است. سقف‌ها به صورت جرم متمرکز و سختی ستون‌ها به صورت میله واحد در نظر گرفته شده است. سازه‌ها دارای پایه‌ای صلب می‌باشد که از تحرک آن‌ها جلوگیری شده است. بین جرم‌هایی که با ضربه مستقیم به یکدیگر در ارتباط هستند (اول و دوم) از یک فتر و کمک فتر به عنوان میراگرویسکوالاستیک استفاده شده است.



شکل ۳. شکل شماتیک دینامیکی سازه

ایده استفاده از میراگر برای کنترل تغییر مکان جانبی سازه و همچنین جلوگیری از برخورد دو سازه با هم، از سال‌ها پیش مورد بحث کارشناسان بوده است. مرتضایی و زهرائی [۱۲] در یک کار تحقیقاتی نشان دادند که می‌توان با استفاده از میراگرویسکوالاستیک در

المان محاسبه می‌شود و با استفاده از رابطه (۶) میزان نیروی ضربه بدست می‌آید.

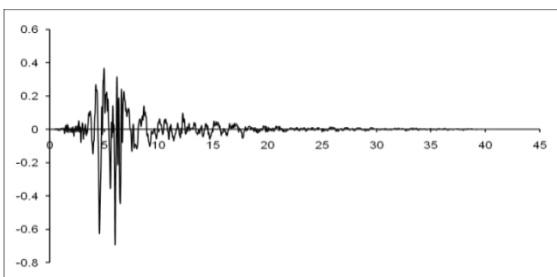
$$F_{imp} = k \cdot \delta(t) + c_{imp} \cdot \dot{\delta}(t) \quad (6)$$

عموما روند ضربه و معادله (۶) بر اساس یک نمودار چرخشی و بر مبنای جابجایی جانبی نشان داده می‌شود. در این نمودار میزان نیروی ضربه در هر زمان و یا هر جابجایی جانبی نشان داده می‌شود.

### مدلسازی عددی

مدل مورد تحلیل در مطالعه، دو ساختمان بتن مسلح ۲ و ۳ طبقه می‌باشد که کاربری مسکونی داشته و ارتفاع طبقات آن ۳ متر است. مدل‌ها در نرم‌افزار [SAP2000] مدل شده و تحت بارگذاری لرزه‌ای قرار می‌گیرند. ساختمان دو طبقه A و مدل سه طبقه B نامیده می‌شوند.

رکورد زلزله مورد استفاده در این تحلیل، زلزله کوبه بوده که در سال ۱۹۹۵ با بزرگای ۷/۲ ریشتر، شهر کوبه در ژاپن را لرزاند. رکورد این زلزله در شکل ۶ (شتاب برحسب g نسبت به زمان بر حسب ثانیه) و مشخصات آن در جدول ۱ آمده است. مشخصات زلزله مذکور در یک فایل دو ستونی شامل زمان و شتاب لرزه‌ای در نظر گرفته می‌شود.



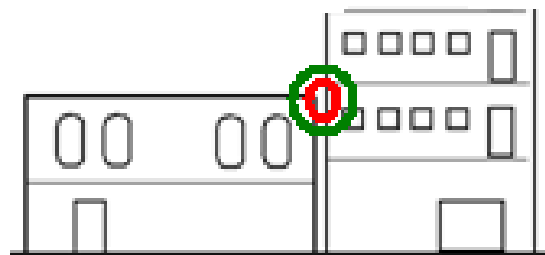
شکل ۶. رکورد زلزله کوبه ژاپن (شتاب برحسب g نسبت به زمان بر حسب ثانیه)

جدول ۱. مشخصات زلزله کوبه

زلزله	بزرگای (ریشتر)	فاصله (km)	PGA (cm/s <sup>2</sup> )
کوبه	۷/۲	۳۹/۳۸	۰/۷۰۶

دو سازه با فاصله ۶ سانتی‌متری از هم مدل می‌شوند. هر دو تحت بارگذاری لرزه‌ای، تحلیل می‌شوند. مدل‌ها در هنگام بارگذاری لرزه‌ای دچار تغییرمکان جانبی شده و به دفعات با هم برخورد می‌کنند. از آن جاییکه مدل‌ها دارای ارتفاع‌های مختلف می‌باشند، سقف طبقه دوم سازه دو طبقه (A) به سقف طبقه دوم سازه سه طبقه (B) برخورد می‌کند. این برخورد باعث ایجاد ضربه به ساختمان‌ها می‌شود، اما اعمال

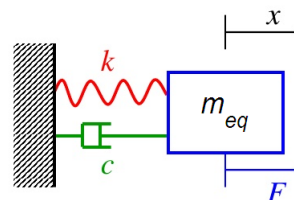
می‌باشد که در آن d فاصله دو سازه و X ها میزان جابجایی جانبی جرم‌ها می‌باشند. اگر فرض شود که تحت بارگذاری جانبی، تغییرمکان از مدل A به سمت مدل B باشد، ضریب ذکر شده به معادله ۲ اضافه و در معادله ۳ کم می‌شود. در نتیجه ترکیب این معادلات، معادله نهایی این سیستم مشخص می‌شود.



شکل ۴. اثر ضربه دو ساختمان مجاور

### محاسبه میرایی

برای محاسبه میرایی به جهت اندازه‌گیری میزان نیروی ضربه بین دو ساختمان در حین ضربه، محققین از یک مدل مکانیکی (شکل ۵) شامل یک فنر و یک میراگر استفاده می‌کنند.



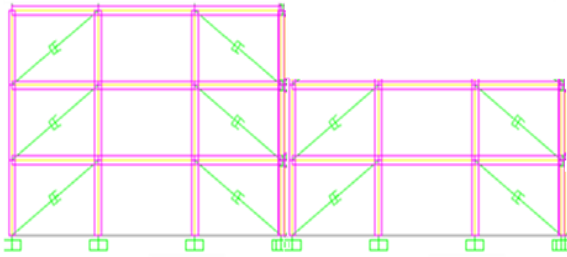
شکل ۵. المان مورد استفاده

در این المان، اختلاف جابجایی دو مدل در راستاهای مختلف به عنوان جابجایی جانبی لحاظ می‌گردد. بر اساس مطالعه‌های عددی خاتمی و همکاران [۱۳] میزان سختی فنر بر اساس جرم اجسام مورد برخورد بدست آمده و ضریب استرداد نیز بر اساس قضاوت مهندسی طراح تخمین زده می‌شود ( $0 < e < 1$ ).

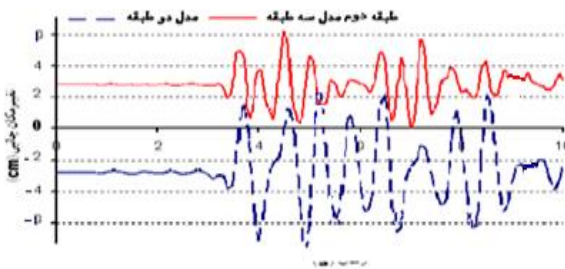
رابطه پیشنهاد شده بوسیله این محققین به صورت زیر می‌باشد.

$$c_{imp} = 1.6 \times 10^{-2} \cdot e^{0.2805} \cdot \frac{\dot{\delta}_{imp}^2}{\dot{\delta}(t) \cdot \delta(t)} (1 - e) \cdot k_s \cdot \sqrt{\delta(t)} \quad (5)$$

در این رابطه با استفاده از سرعت ضربه حین برخورد، معادلات جابجایی، سرعت و شتاب، سختی فنر و ضریب استرداد، میزان میرایی

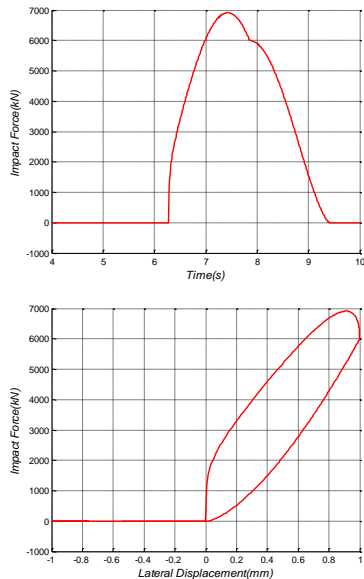


شکل ۹. مدل مورد مطالعه با میراگرویسکوالاستیک



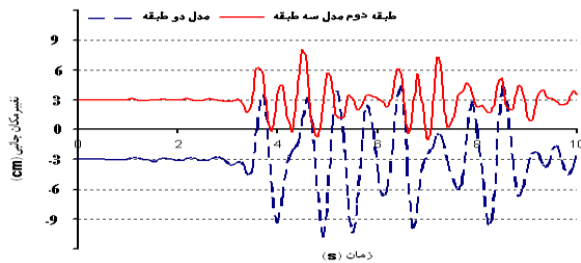
شکل ۱۰. نمودار تغییر مکان جانبی-زمان با میراگرویسکوالاستیک

حال با استفاده از رابطه (۶) میزان نیروی ضربه و زمان برخورد بین دو سازه محاسبه و در یک منحنی هیستریزس مطابق شکل ۱۱ نشان داده می‌شود.



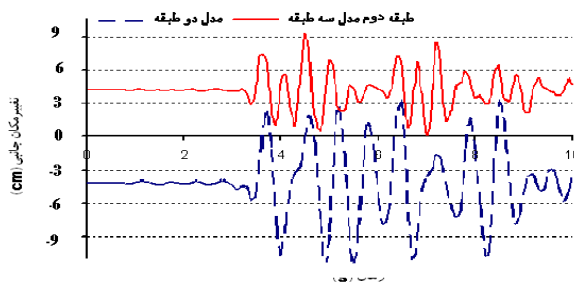
شکل ۱۱. نمودار نیروی ضربه-زمان و تغییر مکان در ضربه با فاصله ۳ سانتی متر

نیروی وارد از مدل A به سقف ساختمان B باعث ایجاد یک رفتار ارتعاشی تحت اثرات ثانویه در طبقه سوم ساختمان B می‌گردد. بدین منظور که اثر ضربه سازه A، باعث توقف ناگهانی سازه B می‌شود اما طبقه سوم این ساختمان همچنان تمایل به ادامه حرکت جانبی خود دارد. این حالت باعث بروز برش بسیار زیاد در پای ستون طبقه سوم می‌گردد که با ادامه این رفتار، مفصل پلاستیک در پای ستون‌های این طبقه رخ داده و احتمال تخریب افزایش می‌یابد. شکل ۷، نمودار تغییر مکان جانبی- زمان را در این تحلیل نشان می‌دهد که محل‌های تلاقی دو منحنی، در حقیقت زمان و مکان برخورد دو سازه را در طبقه دوم خود ارائه کرده است. هفت برخورد رخ داده در این شکل بخوبی نشان می‌دهد که اثر فاصله دو ساختمان تا چه اندازه در ایجاد و یا عدم ایجاد برخورد بین دو مدل و ضربات ناشی از آن موثر است.



شکل ۷. نمودار تغییر مکان جانبی-زمان در فاصله ۳ سانتی متری دو مدل

شکل ۸، تغییر مکان دو مدل را با فاصله ۹ سانتی متری از هم نشان می‌دهد. همانگونه که ارائه شده است. با افزایش ۱/۵ سانتی متر به فاصله دو مدل، برخورد دو سازه با کاهش قابل توجهی رو به رو شده است. این کاهش از ۷ ضربه به ۲ ضربه می‌باشد که اثرات مثبت فاصله دو ساختمان مجاور را نشان می‌دهد.



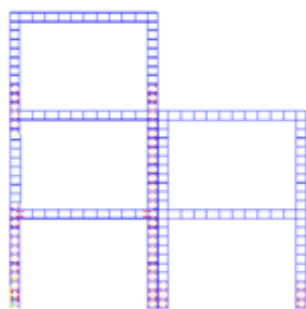
شکل ۸. نمودار تغییر مکان جانبی-زمان در فاصله ۴/۵ سانتی متری دو مدل

در مرحله دوم تحلیل، میراگرهایی در طبقات مدل‌ها و در قاب‌های ۱ و ۳ قرار می‌گیرند (شکل ۹). این میراگرها با ضریب سختی  $kN.s/m$  ۲۵۰ دارای میرایی ۲۶٪ می‌باشد. این میراگرها باعث می‌شوند که با ایجاد کشش در سازه، از جابجایی جانبی ساختمان‌ها کاسته شود و میرایی سیستم را افزایش دهند.

مستقیماً با زمان تحلیل در ارتباط است. در نتیجه مدل‌ها برای یک دهانه و با طول ۴ متر ذکر شده ساخته شده‌اند.

المان‌بندی این مدل‌ها با استفاده از ایده مربع ضخامت جان [۱۶] صورت گرفته است. این ایده نشان داده است که می‌توان المان‌بندی مقاطع بتنی را به صورت مربعی با ضخامت المان‌های متصل به آن (در قاب‌ها، تیر و در دیوارهای برشی، جان)، انجام داد و نتیجه واقعی تری را در تحلیل‌های المان محدود بدست آورد. در اینجا نیز المان‌ها به صورت مربعی ۳۰ سانتی‌متری ساخته شده و مدل گردیده‌اند. دو مدل در فاصله ۳ سانتی‌متری از یکدیگر قرار گرفته و تحت بارگذاری لرزه‌ای قرار می‌گیرند. ساختمان‌ها در حین تحلیل دچار تغییر مکان جانبی می‌شوند که این جابجایی در مدل باعث وارد شدن ضرباتی از سقف‌ها به یکدیگر می‌باشد. به دلیل سختی بالای سقف و همین‌طور نقش تقسیم‌کنندگی بار توسط سقف‌ها، هر دو مانند یک جسم صلب رفتار کرده و تا حدودی نیروی یکدیگر را خنثی می‌کنند. اما به سبب آزادی حرکتی ستون‌های ساختمان سه طبقه، این ستون‌ها با تغییر مکان ناگهانی مواجه شده و دچار آسیب می‌شوند. به بیان ساده تر، توقف ناگهانی سقف طبقه دوم، حالت یک تیر کنسول را به سازه طبقه بالاتر می‌دهد که این حالت با جابجایی ناگهانی روبه‌رو است. این جابجایی، در حقیقت در اثر افزایش دوران در پای ستون بوده که باعث ترک‌خوردگی و تشکیل مفصل پلاستیک در آن محل می‌شود (شکل ۱۴).

با ادامه روند بارگذاری و جابجایی‌های پیاپی، ضربات بیشتر شده و با توجه به ترک‌خوردگی بتن و ورود آن به ناحیه غیرخطی، روند کاهشی مقاومت سازه در برابر ضربه افزایش می‌یابد و هر ضربه باعث ایجاد ترک‌های بیشتر و تخریب تدریجی سازه می‌گردد. این حالت برای ساختمان با ارتفاع بیشتر مخربتر می‌باشد. زیرا با تخریب ستون، احتمال خرابی‌های پیش‌رونده نیز قوت می‌گیرد.

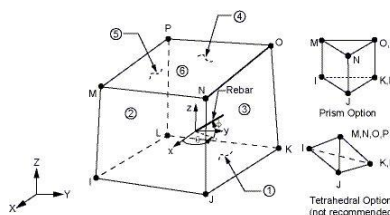


شکل ۱۴. روند ترک‌خوردگی در مدل مورد مطالعه و افزایش ناگهانی آن در ستون‌های ساختمان با ارتفاع بیشتر

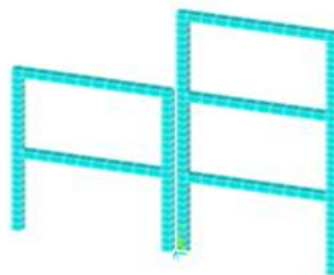
نمودار تغییر مکان جانبی دو مدل ارائه شده است. نقاط تلاقی که تا چند لحظه به صورت ممتد ادامه دارد، نقاط برخورد سقف دوم هر مدل به یکدیگر است. همانطور که در شکل ۱۵ نشان داده شده است،

همانگونه که در شکل ۱۰ دیده می‌شود اولین برخورد در ثانیه ۷/۳۵ ام رخ داده است و میزان این نیرو ۶۹۸۴ کیلو نیوتن است. با داشتن اطلاعات این ضربه میزان نیروی ضربه بر اساس منحنی هیستریزس آن نیز در شکل ۱۱ نشان داده شده است.

این تحلیل نشان داده است که وجود میراگر، به سبب جذب کشش و افزایش میرایی، جابجایی جانبی سازه‌ها را کاهش می‌دهد. فاصله ۳ سانتی‌متری دو ساختمان، با وجود کمک فتر، ضربات سازه‌ها را به یکدیگر تا ۲ ضربه کاهش داده است. بررسی دقیق تر میزان اثرات ضربه با نرم افزار المان محدود [ANSYS 15] انجام می‌گیرد. در این نرم‌افزار، Solid به عنوان یک المان ۳ بعدی ۸ گره‌ای (شکل ۱۲) است که ۳ درجه آزادی در هر گره قرار دارد و توانایی مدل کردن اجسام را به صورت مسلح داشته و همچنین قابلیت ترک‌خوردگی، خزش و تغییر شکل پلاستیک را دارد. در این المان می‌توان آرمانور را به صورت حجمی پخش و بتن مسلح را مدل کرد. در مدلسازی این المان، دو فرض اساسی در رفتار بتن مورد توجه قرار می‌گیرد. در محدوده خطی که تا مرحله ترک‌خوردگی بتن، ایزوتروپیک است و محدوده غیرخطی که بتن ممکن است حالت پلاستیک و خزش را نیز تجربه کند.



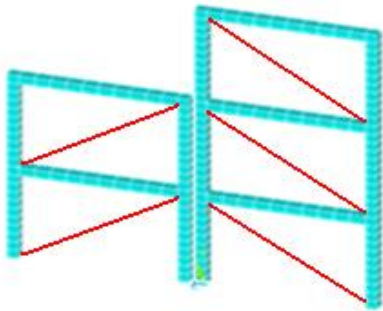
شکل ۱۲. المان Solid در نرم افزار المان محدود [ANSYS 15]



شکل ۱۳. مدل ساخته شده در نرم افزار ANSYS

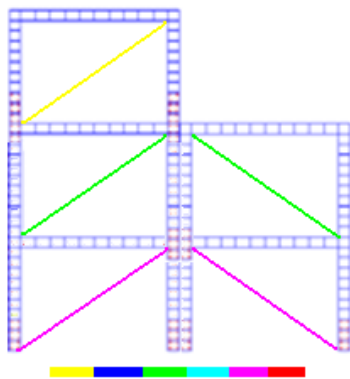
ساختمان مورد تحلیل، دو قاب بتن مسلح بتنی (شکل ۱۳) است که مشخصات آن کاملاً منطبق بر مشخصات ساختمان‌های مدل شده قبلی می‌باشد. به دلیل اینکه تعداد ماتریس‌های تشکیل شده در این نرم‌افزار برای تحلیل کاملاً وابسته به المان‌بندی و تعداد گره‌های موجود آمده آن می‌باشد، افزایش یا کاهش المان‌ها و گره‌های آن،





شکل ۱۶. مدل ساخته شده در نرم افزار ANSYS با استفاده از میراگر

تحلیل این مدل نشان می‌دهد که وجود میراگر می‌تواند به صورت قابل توجهی از تغییرمکان جانبی مدلها بکاهد. در این مدل نیز دو ضربه مشاهده شده است، اما از آنجایی که تغییرمکان‌های جانبی کمتر از مدل قبلی می‌باشد، به علت کاهش پریود سازه‌ها، نیروی ضربه نیز کمتر از مدل دیگر بوده است.

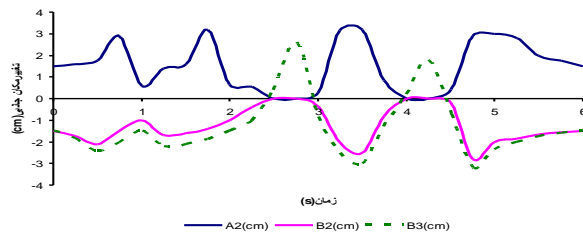


شکل ۱۷. روند ترک خوردگی در مدل مورد مطالعه با میراگر و میزان کشش متحمل شده توسط میراگرها

شکل ۱۷، بخوبی میزان تاثیر میراگر را در کشش نشان می‌دهد. میراگر مورد استفاده در طبقه سوم، به علت حرکت ناگهانی این طبقه و میل به جابجایی بیشتر، دچار بیشترین میزان کشش شده است. همچنین برخورد دو ساختمان با نیروی کمتر، باعث کاهش ترک خوردگی در مدل‌ها نیز شده است.

همانگونه که در شکل ۱۸ دیده می‌شود، بیشترین جابجایی جانبی در این مدل نسبت به مدل بدون میراگر تا ۵ میلی متر کاهش جابجایی جانبی داشته است. قرارگیری یک المان کششی در مدل مورد مطالعه، ضمن کاهش تغییرمکان جانبی، زمان برخورد و قدرت آنرا نیز کاهش داده است.

فاصله ۳ سانتی‌متری مدل‌ها باعث ضربات زیادی به یکدیگر می‌باشند. سازه در آن نقاط تمایل به جابجایی بیشتری دارد، اما ساختمان مجاور ضمن جلوگیری از ایجاد این رفتار، خود نیز با این مشکل مواجه بوده و توانایی بروز حداکثر جابجایی خود را ندارد.



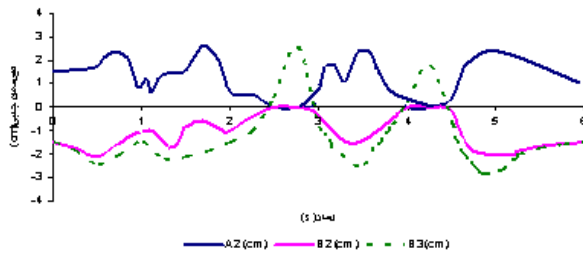
شکل ۱۵. نمودار تغییرمکان-زمان مدل مورد مطالعه و زمان برخورد دو ساختمان

مطابق شکل ۱۵ دو مدل در زمان‌های ۲/۵ تا ۲/۸ ثانیه و ۳/۹ تا ۴/۴ ثانیه در تالاقی با یکدیگر هستند. در حقیقت ساختمان‌ها در این بازه زمانی مانع تغییرمکان دیگری می‌شود. در پایان این بازه نیز جابجایی جانبی به صورت ناگهانی افزایش می‌یابد. به بیان عددی و پس از برخورد اول، تغییرمکان مدل B در مدت زمان ۰/۴ ثانیه ۲/۳ سانتی متر و مدل A در این بازه زمانی ۳/۱ سانتی‌متر می‌باشد. همانطور که در شکل ۱۵ نیز نشان داده شده است، جابجایی جانبی طبقه سوم مدل B، در لحظه برخورد با افزایش قابل توجه ۲/۷ سانتی‌متری مواجه می‌شود. این تغییرمکان چشمگیر، به سبب توقف ناگهانی سقف و افزایش قابل توجه در دوران ستون طبقه سوم می‌باشد.

تحلیل‌های المان محدود مدل، نشان داده است که سقف‌های کنار هم و ستون‌های آن طبقات در معرض بیشتر آسیب‌دیدگی هستند که تقویت آن‌ها نیز می‌تواند تا حد قابل توجهی از اثرات تخریبی آن بکاهد. در این مدل، بیشترین آسیب و خطر متوجه ساختمان با ارتفاع بیشتر می‌باشد که در ترک‌خوردگی ستون‌ها، ایجاد مفصل پلاستیک ستون طبقه آزاد و تغییرمکان ناگهانی بروز می‌کند.

جهت بررسی اثر میراگر در این قسمت، از المان Link استفاده شده است (شکل ۱۶). این المان اگر در کتابخانه نرم‌افزار به صورت bilinear10 مدل شود، المانی با خصوصیات کششی تعریف شده که فقط در کشش رفتار کرده و تغییرمکان‌های جانبی را با جذب کشش کنترل کرده و کاهش می‌دهد.

نهایی جسم ۱ به ۶/۷ کاهش یافته و جسم ۲ سرعت نهایی ۱۱/۷ متر بر ثانیه را تجربه می‌کند. این نشان می‌دهد که در حالت الاستیک، جسم با سرعت و جرم کمتر، سرعت نهایی بیشتری داشته و نیروی بالاتری نیز اعمال می‌کند. در حالت دوم، هر دو سازه سرعت نهایی ۸/۳ متر بر ثانیه داشته و می‌توان ادعا کرد که با سرعت یکسان، نیروهای وارده از دو سازه، نزدیکی بیشتری به هم داشته و اثرات تخریبی کمتری دارند.



شکل ۱۸. نمودار تغییر مکان-زمان مدل مورد مطالعه با میراگر و زمان برخورد دو ساختمان

### نتیجه گیری

در این مقاله، اثرات برخورد دو ساختمان کنار هم و نحوه کاهش این اثر مخرب مورد بحث و بررسی قرار گرفته است. ارائه معادلات دینامیک سازه نشان می‌دهد که جرم ساختمان، سختی و میرایی آن در بوجود آمدن نیروی سازه تاثیر مستقیم دارد. اما چگونگی کاهش این نیرو در معادلات یاد شده با استفاده از فنر و یا کمک فنر، جهت میرا نمودن و استهلاک انرژی وارده پیشنهاد شده است. ضربه‌های ساختمان مجاور هم، به دو صورت ضربه سقف به سقف و ضربه ستون می‌باشد. به جهت بررسی چگونگی کاهش نیروی ضربه‌ای، از دو سازه ۲ و ۳ طبقه بتنی استفاده شده است. تحلیل‌ها نشان می‌دهد که افزایش جزئی فاصله دو ساختمان می‌تواند تا ۸۰ درصد، تعداد ضربات دو سازه را کاهش دهد. در این تحقیق، افزایش ۱/۵ سانتی متری فاصله دو مدل، تعداد برخوردها را از ۷ ضربه، به ۲ ضربه کاهش داده است. همچنین قرارگیری میراگر ویسکوالاستیک در مهاربندی دو سازه، تعداد برخوردها را در فاصله ۳ سانتیمتری از هم به ۳ ضربه کاهش داده است که از اهمیت بالای فاصله و درز انقطاع دو ساختمان مجاور و کمک فنرها در تعداد برخوردها حاکمی می‌باشد.

همچنین، تحلیل غیرخطی مدل‌های ضربه سقف به سقف نشان می‌دهد که ساختمان‌های مجاور دارای سقف‌های در یک تراز، باعث ایجاد دوران شدید در ستون‌های طبقه سوم شده و تغییر مکان ناگهانی زیادی را به همراه دارد. این چرخش زیاد و نیروی وارده از سقف ساختمان کناری باعث ایجاد مفصل پلاستیک در پای ستون شده و تخریب آن احتمال بروز خرابی پیش رونده را در ساختمان با ارتفاع بیشتر افزایش می‌دهد. برای جلوگیری از این اتفاق، اولاً توصیه به ساخت ساختمان‌های هم ارتفاع می‌باشد که سقف‌هایی در یک راستا داشته باشند. همچنین افزایش فاصله دو سازه و کاهش وزن ساختمان‌ها نیز توصیه می‌شود. همچنین می‌توان با مقاوم‌سازی ستون‌های کناری در سازه‌های ساخته شده، قدرت مقابله این ستون‌ها را در برابر بارهای ضربه‌ای افزایش داد.

دلیل این تغییر مکان قابل توجه آن است که هر مدل تحت بار لرزه‌ای وارده تمایل به برگشت دارد و نیروی وارده از ساختمان مجاور نیز به این رفتار سرعت می‌بخشد. این نیروی وارد از سازه و نیروی لرزه‌ای جذب شده از خود ساختمان، سرعت تغییر مکان را افزایش داده و شدن تغییر چشمگیری را به همراه دارد. به بیان ساده تر، سیکل طبیعی سازه با برخورد تغییر کرده و ایستایی لحظه‌ای ساختمان تا زمان برگشت به سیکل طبیعی باعث افزایش نیرو شده و سرعت تغییر مکان را بیشتر می‌کند. در نتیجه ساختمان جابجایی جانبی ناگهانی با سرعت زیادی را تجربه می‌نماید. سرعت یکی از پارامترهای موثر در بررسی دینامیکی این ساختمان‌ها می‌باشد. کاهش سرعت با کاهش تغییر مکان جانبی روبه رو است که این امر، نیروی وارده بر سازه را نیز کاهش می‌دهد. به بیان ریاضیاتی، ساختمانی که دارای سرعت نهایی بیشتری باشد، نیروی بیشتری نیز اعمال می‌کند. اهمیت سرعت نشان می‌دهد که می‌توان با کنترل سرعت ساختمان، از اثرات مخرب آن کاست. کونسته [۱۷]، با ارائه رابطه زیر مطلب فوق را تأیید می‌کند.

$$v'_1 = v_1 - (1+e)(v_1 - v_2) \frac{m_2}{m_2 + m_1}$$

$$v'_2 = v_2 - (1+e)(v_2 - v_1) \frac{m_1}{m_2 + m_1} \quad (7)$$

در این رابطه،  $e$  یک ضریب در بازه ۰ و ۱ است که می‌تواند رفتارهای سازه را به حالت الاستیک یا پلاستیک تغییر دهد. به این نحو که اگر  $e=1$  باشد، رفتار سازه الاستیک بوده و هر کدام از ساختمان‌ها با سرعت خود و به صورت جداگانه رفتار می‌کنند. این عامل باعث عدم وابستگی دو سازه شده و برخوردهایی را بوجود می‌آورد. اما وقتی  $e=0$  انتخاب می‌شود، ساختمان‌ها با سرعت نهایی یکسانی روبه رو شده و در حالت پلاستیک، به صورت وابسته به هم حرکت می‌کنند. به طور مثال، اگر  $m_1=10$  تن و سرعت آن ۱۰ متر بر ثانیه باشد و  $m_2=5$  تن با سرعت اولیه ۵ متر بر ثانیه، در حالت اول، سرعت



## مراجع

- [10] H. Naderpour, R. C. Barros, S. M. Khatami, and R. Jankowski (2015) "Numerical Study on Pounding between Two Adjacent Buildings under Earthquake Excitation", Article ID 157273, pp. 12-24, Shock and Vibration.
- [11] Cole.G.L., Dhakal, R.P., Carr, A.J. and Bull, D.K., (2009) "The significance of lumped or distribute mass assumption on the analysis of pounding structure". *Proc. 13<sup>th</sup> Int. Asia Pacific Vibration Conference. Paper 66. Canterbury. New Zealand*
- [12] Mortezaei, A.R and Zahrai, S.M. (2009), "Seismic Response of Reinforced Concrete Building with Viscoelastic Damper under Near Field Earthquake" *Asian Journal of Civil Engineering. Vol 10, No 3.*
- [13] Naderpour, H., Barros, R.C., Khatami, S.M., (2016) "Suggestion of an equation of motion to calculate damping ratio during earthquake based on cyclic procedure", *Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, Vol. 54, No 2, pp. 184-206.
- [14] CSI. Computers and Structures, INC. SAP2000. Verion 8.
- [15] Swanson Analysis Systems Inc, ANSYS (Revision 5.4) (1992). Users Manual Theory Vol. IV
- مجله عمران مدرس، تابستان ۱۳۹۰ خاتمی، س.م و خیرالدین.ع  
[۱۵] "تاثیر اندازه المان بر رفتار غیرخطی دیوارهای برشی بالدار"
- [17] Conosente, J.P. (1992). "Dynamic Analysis of Impacting Structural System" *Proceeding of the 10<sup>th</sup> World Conference on Earthquake Engineering. pp. 3899-3903*
- [1] Anagnostopouls, S.A. (1998) "Pounding of Building in Series During Earthquakes". *Earthquake & Structural Dynamic. 16(3).443-456*
- [2] Anagnostopouls, S.A., (2004) "Equivalent Viscous Damping for Modeling Inelastic Impacts in Earthquake Pounding Problems". *Earthquake & Structural Dynamic. 33(8).897-902*
- [3] Kavashima C.G And Watanaba, K (2005). "Earthquake Induced Interaction Between Adjacent Reinforced Concrete Structural With Non Equal Heights" *Earthquake & Structural Dynamics. 34(1).1-20.*
- [4] cole.G.L., Dhakal, R.P., Carr, A.J. and Bull, D.K., (2009) "The Effect of Diaphragm Wave Propagation on the Analysis of Pounding Structures". *Proc. 2<sup>nd</sup> Int. Conference on computational method in structural dynamic an earthquake engineering (COMPADYN), Rhodes. Greece.*
- [5] Valles, R.E and Reinhorn, A.M. (1997). "Evaluation, Prevention and Mitigation of Pounding Effect in Building Structures" Report No NCEER-97-0001. Buffalo, N.Y..
- [6] Kasai, K. and Jagiasi, A.R. (1996). "Inelastic Vibration Phase Theory for Seismic Pounding During Mitigation" *Journal of Structural Engineering..122:10.*
- [7] Jankowski, R. (2005) "Nonlinear Viscoelastic Modeling of Earthquake Induced Structural Pounding" *Earthquake Engineering & Structural Dynamic. 34(6).595-611*
- [8] Naderpour, H. Barros, R. and Khatami, S.M. (2012), "Importance of Separation Distance on Building Pounding under Near-Fault Ground Motion, using the Iranian Earthquake Code" 9th International Congress on Civil Engineering. Isfahan. Iran
- [9] Barros RC, Naderpour H, Khatami SM, Mortezaei A (2013) "Influence of Seismic Pounding on RC Buildings with and without Base Isolation System Subject to Near-Fault Ground Motions," *Journal of Rehabilitation in Civil Engineering 1-1 39-52.*

## Effect of Gap Length and Using Viscoelastic Damper on Reducing Seismic Pounding in Adjacent Low-Rise Concrete Buildings

Seyed Mehdi Zahrai\*, Professor, Center of Excellence for Engineering and Management of Civil Infrastructures, School of Civil Engineering, the University of Tehran, [mzahrai@ut.ac.ir](mailto:mzahrai@ut.ac.ir)

Seyed Mohamad Khatami, Ph.D, Faculty of Engineering, University of Porto, Porto, Portugal

### Abstract:

Significant growth of buildings in different shapes and heights in urban areas and lack of attention to their dependence being adjacent to each other during earthquakes has increased devastating effects of seismic loads. Existing buildings have been designed and constructed separately against earthquakes. However, to pounding of adjacent buildings has been less paid attention. Since different buildings are designed independently thus their floor levels are not at the same height and probable sudden poundings during earthquakes can damage and collapse the weaker building. There are two kinds of such poundings: floor to floor and floor to column that 1<sup>st</sup> case is investigated in this research.

In this paper, in order to determine and reduce the pounding forces between adjacent buildings, two 2 and 3-story RC buildings are considered in which floor to floor pounding is studied. To prevent or reduce pounding damage, the effect of gap distance between two adjacent buildings and using viscoelastic damper in their bracing on reducing seismic impact and related pounding are investigated. SAP2000 and ANSYS are used for numerical study. Analyses results show that using viscoelastic dampers and increasing distance between two buildings would reduce their lateral displacements and related pounding. For example, 3cm distance between two adjacent buildings would create 7 impacts while increasing the distance to 4.5cm would reduce the impacts to 2. Also, placement of viscoelastic dampers between building floors would control their lateral displacements and reduce the impacts to just one.

**Keywords:** RC building, seismic pounding, gap distance between adjacent buildings, viscoelastic damper.