



## مروری بر روش‌های مدلسازی برخورد ساختمان‌های مجاور با یکدیگر و راهکارهای کاهش پاسخ ناشی از ضربه در آنها

محمد پای، حمید توپچی‌نژاد\*

گروه مهندسی عمران، دانشگاه رازی کرمانشاه، کرمانشاه، ایران

### تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۹ آذر ۱۳۹۶  
بازنگری: ۱۳ شهریور ۱۳۹۶  
پذیرش: ۱۸ شهریور ۱۳۹۶  
ارائه آنلاین: ۲۸ شهریور ۱۳۹۶

### کلمات کلیدی:

پدیده برخورد  
ارتعاش غیرهم فاز  
نیروی ضربه  
کاهش پاسخ لرزه‌ای  
درز انقطاع

**چکیده:** به هنگام زلزله در ساختمان‌هایی که فاقد درز انقطاع مناسب با ساختمان مجاور خود می‌باشند پدیده ضربه زدن ساختمان‌ها به یکدیگر می‌تواند سبب خسارات سازه‌ای قابل توجهی در آنها گردد. بعد از وقوع زلزله‌های مهمی همچون مکزیکوسیتی (۱۹۸۵) و لوماپریتا (۱۹۸۹) و مشاهده‌ی خسارات بوجود آمده در ساختمان‌ها در اثر برخورد آنها با یکدیگر، این پدیده مورد توجه محققین قرار گرفت. در مقاله حاضر با مرور روش‌های تحلیلی مختلفی که برای مدلسازی پدیده ضربه وجود دارند، از بین مدل‌های الاستیک خطی، ویسکوالاستیک خطی، ویسکوالاستیک غیرخطی اصلاح شده، الاستیک غیرخطی هرتز، هرتز - دمپ غیرخطی و ویسکوالاستیک غیرخطی، مدل ویسکوالاستیک غیرخطی به عنوان مدلی مناسب برای این منظور شناسایی شده است. در ادامه مقاله راهکارهای مختلف برای کاهش آثار ضربه در ساختمان‌های برخورد کننده با یکدیگر، مورد بررسی قرار گرفته است. بر اساس تحلیل‌های انجام شده در این تحقیق، در مواردی که درز انقطاع لازم بین ساختمان‌ها اجرا نشده باشد یکی از مناسب‌ترین روش‌ها جهت کاهش آثار ضربه در ساختمان‌های مجاور، تقویت ساختمان‌ها می‌باشد. این امر می‌تواند با استفاده از افزایش سختی موثر جانبی ساختمان‌ها و یا استفاده از ابزارهای مستهلک کننده انرژی به منظور افزایش میرایی موثر سازه و استهلاک بیشتر پاسخ دینامیکی ناشی از ضربه محقق گردد.

### ۱- مقدمه

شکست مصالح در اثر ضربه، اصطکاک و دیگر موارد همراه می‌باشد. روند انتقال انرژی در زمان برخورد بسیار پیچیده بوده و این امر تحلیل مسئله را مشکل می‌سازد. با وجود پیچیدگی‌های پدیده‌ی برخورد و ضربه زدن ساختمان‌ها در هنگام زلزله، مطالعات زیادی بر روی مدل‌های مختلف شبیه سازی ضربه صورت گرفته است که در مقاله حاضر مرور شده‌اند. همچنین، در ادامه، راهکارهای موجود در کاهش آثار ناشی از ضربه در سازه‌ها مورد بررسی قرار گرفته و در بین راهکارهای مختلف تاثیر افزایش سختی و یا میرایی موثر سازه در چگونگی بازتاب دینامیکی ناشی از ضربه بصورت عددی مطالعه شده است.

تجربه زلزله‌های گذشته نشان می‌دهد که برخورد ساختمان‌های مجاور با یکدیگر، یکی از عوامل مهم ایجاد خسارت در آنها است. پس از زلزله سال ۱۹۸۵ مکزیکوسیتی مشاهده شد که عامل ۴۰٪ خسارت‌های به وقوع پیوسته، سطوح مختلفی از برخورد ساختمان‌های مجاور با یکدیگر بوده است. در ۱۵٪ موارد مذکور، عامل اصلی فروریزش برخورد ساختمان‌ها با یکدیگر بوده است [۱]. همچنین، در زلزله سال ۱۹۸۹ لوماپریتا در مجموعه بیش از ۵۰۰ ساختمانی که در فاصله ۹۰ کیلومتری از مرکز زلزله قرار گرفته بودند ۲۰۰ مورد برخورد مشاهده گردید که این امر در برخی از آنها عامل اصلی فروریزش ساختمان شناسایی شد [۲].

### ۲- مدلسازی ضربه

در ادبیات تحقیق دو روش کلی جهت مدلسازی ضربه ناشی از برخورد ساختمان‌های مجاور موجود است. روش اول نظریه کلاسیک ضربه است که بر پایه قانون بقای مومنتوم و انرژی بوده و در آن به تنش‌ها و تغییرشکل‌های المان‌های سازه‌ای در ساختمان‌هایی که با هم برخورد می‌کنند توجه نمی‌شود [۱۰] در روش دوم که روشی نیرویی است به طور مستقیم نیروی برخورد محاسبه شده و به سازه اعمال می‌شود [۱۰]. در ادامه جزئیات روش‌های فوق ارائه می‌گردند.

در بسیاری از موارد عامل اصلی برخورد، تفاوت پیوند ارتعاش طبیعی ساختمان‌های مجاور می‌باشد. تفاوت بین جرم و سختی ساختمان‌های مجاور باعث ارتعاش غیرهم‌فاز آنها در طی زلزله شده و این امر سبب افزایش احتمال آسیب سازه‌ای در اثر برخورد آنها به یکدیگر می‌شود [۹-۳]. برخورد ساختمان‌های مجاور به هنگام زلزله پدیده‌ی پیچیده‌ای است که اغلب با تغییر شکل پلاستیک، ترک‌های موضعی و خردشدگی در نقطه تماس،

\*نویسنده عهده‌دار مکاتبات: h.toopchinezhad@razi.ac.ir

۲-۱- نظریه کلاسیک ضربه

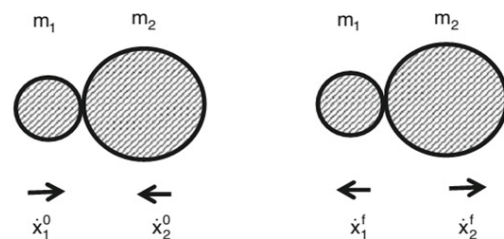
شکل ۱ نشان دهنده دو جسم به جرم های  $m_1$  و  $m_2$  است که با سرعت های اولیه متفاوتی به یکدیگر برخورد می نمایند. در نظریه کلاسیک ضربه تمرکز بر روی تعیین سرعت المان های برخورد بعد از وقوع ضربه بوده بدون آنکه پاسخ سازه ای آنها در حین ضربه مورد توجه قرار داده شود. آنالیز بر اساس مقدار سرعت جرم ها در لحظه برخورد و نیز ضریب ارتجاعی که نشانگر استهلاک انرژی حین برخورد است می باشد. استهلاک انرژی در اثر تغییر شکل پلاستیک، ترک موضعی و اصطکاک بین اجرام بوجود می آید. سرعت نهایی دو جسم پس از برخورد از فرمول زیر بدست می آید [۱۰].

$$\dot{x}_1^f = \dot{x}_1^0 - (1+e) \frac{m_2 \dot{x}_1^0 - m_1 \dot{x}_2^0}{m_1 + m_2} \quad (1)$$

$$\dot{x}_2^f = \dot{x}_2^0 - (1+e) \frac{m_1 \dot{x}_1^0 - m_2 \dot{x}_2^0}{m_1 + m_2} \quad (2)$$

$$e = \frac{\dot{x}_2^f - \dot{x}_1^f}{\dot{x}_1^0 - \dot{x}_2^0} \quad (3)$$

در روابط فوق  $m_i$  جرم جسم  $i$  ام،  $\dot{x}_i^f$  و  $\dot{x}_i^0$  به ترتیب سرعت های نهایی و اولیه جسم  $i$  ام و  $e$  ضریب ارتجاعی است.



شکل ۱: سرعت های اولیه و نهایی اجسام در حال برخورد با یکدیگر

Fig. 1. The initial and final velocities of the colliding bodies

استفاده از نظریه کلاسیک برخورد برای پیش بینی اثرات کلی ضربه پیشنهاد می شود. این روش در موارد محدودی که جرم ساختمان متمرکز در نظر گرفته شود و سیستم دارای یک درجه آزادی باشد، مورد استفاده قرار می گیرد. این محدودیت ناشی از آن است که در نظریه کلاسیک ضربه تنش ها و تغییر شکل ها در حین ضربه مورد توجه قرار نمی گیرند. از این روش در تحلیل آثار ضربه در سازه های چند درجه آزادی، و یا هنگامی که ضربه در ردیفی از ساختمان های کنار هم اتفاق افتد، استفاده نمی شود.

۲-۲- مدلسازی مستقیم نیروی برخورد

مطالعات آزمایشگاهی نشان می دهند که منحنی تاریخچه زمانی نیروی ضربه به فاکتورهای زیادی مانند: جرم سازه های برخورد کننده، هندسه سطح تماس، مشخصات مصالح، سرعت نسبی اجسام در لحظه برخورد و حتی تاریخچه زمانی ضربه های گذشته بستگی دارد [۱۳-۱۰].

شکل ۲-الف تاریخچه زمانی نیروی ضربه رد و بدل شده بین دو جسم برخورد کننده با یکدیگر را نشان داده و شکل ۲-ب رابطه ی نیرو و تغییر شکل مربوطه را نشان می دهد. همانگونه که در شکل ۲-الف مشاهده می گردد، منحنی تاریخچه زمانی نیروی ضربه شامل دو فاز است. فاز نزدیک شدن<sup>۱</sup> (AP) که از لحظه تماس شروع شده و تا حداکثر تغییر شکل حاصله در جسم بطول می انجامد و فاز جدا شدن<sup>۲</sup> (RP) که از لحظه حداکثر تغییر شکل تا زمان جدایی دو جسم ادامه پیدا می کند. مطالعات آزمایشگاهی نشان می دهند که در شروع فاز AP المان های برخورد در ناحیه الاستیک هستند ولی پس از آن تغییر شکل های پلاستیک، ترک های موضعی و یا خردشدگی در آنها اتفاق می افتد. انرژی کرنشی ذخیره شده در المان های برخورد کننده در فاز RP آزاد می شود. تحقیقات نشان می دهند که مقدار قابل توجهی از استهلاک انرژی در فاز AP صورت می گیرد. همچنین رابطه نیروی برخورد و تغییر شکل معمولاً غیر خطی است. همانگونه که در شکل ۳ نشان داده شده است، نیروی برخورد بین ساختمان ها معمولاً با المان های ضربه الاستیک یا ویسکوالاستیک شبیه سازی می شود که قبل از برخورد به دلیل وجود فاصله (gap) نشان داده شده در شکل غیر فعال بوده و پس از برخورد وقتی تماس بین دو جسم صورت می گیرد، فعال می شوند [۱۴]. در ادامه مدل های ضربه که در روش مدلسازی مستقیم نیروی برخورد به کار می رود تبیین می گردند.

۲-۲-۱- مدل الاستیک خطی

در این مدل المان ضربه شامل یک فنر الاستیک خطی بوده و نیروی برخورد در اثر ضربه،  $F(t)$ ، بصورت زیر تعریف می گردد.

$$F(t) = k\delta(t) \quad (4)$$

در رابطه فوق،  $k$  سختی فنر (المان ضربه) و  $\delta(t)$  تغییر شکل فنر می باشد. مهم ترین نقطه ضعف این مدل عدم توجه به استهلاک انرژی در طول زمان برخورد می باشد [۷-۶].

1 Approach period  
2 Restitution period

مشکل به این دلیل بوجود می‌آید که مولفه ویسکوز در تمام مدت زمان فاز RP فعال است. علاوه بر آن فعال بودن مولفه ویسکوز با ضرایب میرایی یکسان، در فازهای AP و RP باعث می‌شود که استهلاك انرژی یکنواختی در تمام مدت زمان برخورد داشته باشیم که این موضوع با واقعیت مطابقت ندارد. همانگونه که قبلا بیان شد مقدار قابل توجهی از استهلاك انرژی در فاز AP رخ می‌دهد.

### ۲-۲-۳- مدل ویسکوالاستیک خطی اصلاح شده

به منظور حذف نیروی کششی چسبیده که درست قبل از جدایی المان‌های برخورد در مدل ویسکوالاستیک خطی ظاهر می‌شود، برخی اصلاحات در آن صورت گرفته تا مولفه میرایی فقط در فاز AP فعال باشد [۱۶].

$$\begin{cases} F(t) = \bar{\beta}\delta^{3/2}(t) + \bar{C}(t)\dot{\delta}(t); \dot{\delta}(t) > 0 \\ F(t) = \bar{\beta}\delta^{3/2}(t); \dot{\delta}(t) \leq 0 \end{cases} \quad (8)$$

$$C = 2\xi \sqrt{k \frac{m_1 m_2}{m_1 + m_2}} \quad (9)$$

$$\xi = \frac{1 - e^2}{e(e(\pi - 2) + 2)} \quad (10)$$

### ۲-۲-۴- مدل الاستیک غیرخطی هرتز

به منظور واقعی‌تر کردن رابطه نیرو-تغییرشکل در بسیاری از مطالعات از فنر الاستیک غیرخطی بر اساس قانون تماس هرتز [۱۷] استفاده می‌شود.

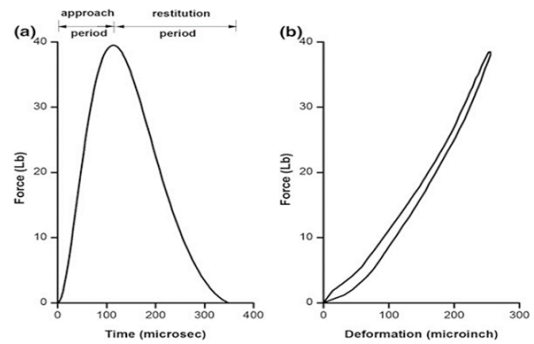
$$F(t) = \beta \delta^{3/2}(t) \quad (11)$$

در رابطه فوق،  $\beta$  پارامتر سختی ضربه است و از آزمایش بدست می‌آید. گلد اسمیت<sup>۱</sup> فرمول ساده‌ای برای محاسبه پارامتر سختی برای اجسام با شکل‌های هندسی خاص ارائه داده است. بعنوان نمونه برای برخورد بین دو جسم کروی داریم [۱۸]:

$$\beta = \frac{4}{3\pi(h_1 + h_2)} \sqrt{\frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}} \quad (12)$$

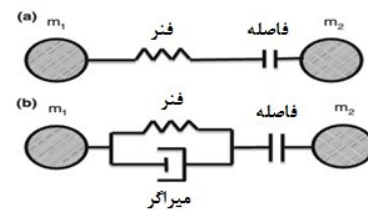
$$h_i = \frac{1 - \nu^2}{\pi E_i} \quad (13)$$

در روابط فوق،  $R_i$  شعاع اجسام در حال برخورد،  $\nu$  نسبت پواسون و  $E_i$  مدول یانگ مصالح می‌باشد. محدودیت این مدل نیز الاستیک فرض کردن فرآیند برخورد و توجه نکردن به استهلاك انرژی دو جسم در حین برخورد است.



شکل ۲: تاریخچه زمانی نیروی ضربه و نمودار نیرو-تغییرشکل (مطالعه آزمایشگاهی) [۱۴]

Fig. 2. Time history of pounding force, and force-deformation curve (experimental study)



شکل ۳: مدلسازی نیروی ضربه (a) مدل فنر (b) مدل فنر و میراگر  
Fig. 3. Modeling of pounding force; a) spring model; b) spring-dashpot model

### ۲-۲-۲- مدل ویسکوالاستیک خطی

در این مدل علاوه بر فنری به سختی  $k$ ، استهلاك انرژی نیز در المان ضربه در نظر گرفته می‌شود. بنابراین، مدل شامل یک فنر خطی و یک میراگر خطی (با ضریب میرایی  $C$ ) که با فنر بطور موازی قرار گرفته می‌باشد. نیروی ضربه،  $F(t)$ ، در هر لحظه زمانی از رابطه ۵ با در نظر گرفتن روابط ۶ و ۷ محاسبه می‌گردد [۱۵].

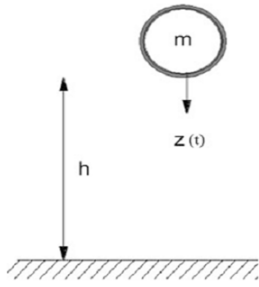
$$F(t) = k\delta(t) + C\dot{\delta}(t) \quad (5)$$

$$C = 2\xi \sqrt{k \frac{m_1 m_2}{m_1 + m_2}} \quad (6)$$

$$\xi = \frac{-\ln e}{\sqrt{\pi^2 + (\ln e)^2}} \quad (7)$$

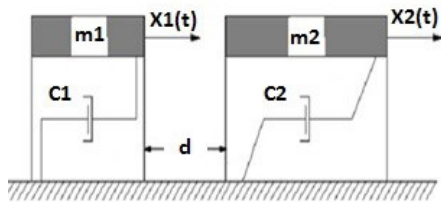
در رابطه ۵،  $\delta(t)$  و  $\dot{\delta}(t)$  به ترتیب مین جابجایی و سرعت دو انتهای نسبی المان برخورد می‌باشد،  $C$  میرایی المان‌های برخورد، " $\xi$ " نسبت میرایی آن و  $e$  ضریب ارتجاعی المان می‌باشد.

محدویت المان میراگر-فنر خطی این است که یک نیروی ضربه منفی قبل از جدایی دو جسم مشاهده می‌شود که فاقد توجیه فیزیکی است. این



شکل ۴: برخورد گوی با صفحه صلب همجنس با آن

Fig. 4. Pounding of a ball with a rigid surface of the same material



شکل ۵: برخورد دو سیستم یک درجه آزادی

Fig. 5. Collision of two SDOF-systems

### ۲-۳-۲- صحت‌سنجی عددی

در تحلیل آثار ضربه در اجرام یا سازه‌ها، پس از نوشتن معادله دینامیکی حاکم بر مسئله، نکته مهم تخمین مناسب نیروی ضربه،  $F(t)$ ، می باشد. مطالعات نشان می‌دهند که نیروی مذکور عمدتاً تابع جنس و سرعت نسبی اجرام برخورد کننده است [۱۴]. تاثیر سایر پارامترها همانند جرم، سختی و میرایی سازه‌های برخورد کننده را می‌توان در معادلات دینامیکی حاکم بر مسئله ضربه لحاظ نمود. به منظور صحت‌سنجی مدل‌های مختلف، نیروی ضربه‌ی مدل‌های ذکر شده با نتایج آزمایش برخورد یک گوی با صفحه‌ی صلب و حجیم همجنس با آن مقایسه شده‌اند [۱۴]. مقادیر عددی پارامترهای هر مدل برای برخورد گوی با صفحه صلب برای دو جنس بتن و فولاد در جدول ۱ آورده شده است. معادله‌ی دینامیکی این برخورد را می‌توان بصورت رابطه‌ی ۱۸ نوشت:

$$m\ddot{z}(t) + F(t) = mg \quad (18)$$

در معادله‌ی فوق  $m$  جرم گوی،  $\ddot{z}(t)$  شتاب قائم و  $F(t)$  نیروی ضربه است. به منظور حل معادله‌ی فوق از روش رانژ-کوتای مرتبه چهارم در نرم‌افزار متلب استفاده شده است.

جرم گوی‌های فولادی و بتنی بکار رفته در مطالعات آزمایشگاهی به ترتیب ۲/۰۱۳ و ۱/۷۶۳ کیلوگرم و سرعت برخورد آن‌ها با صفحه‌ی صلب همجنسشان به ترتیب ۰/۹۲ و ۰/۱۳ متر بر ثانیه می‌باشد. در آزمایشات

### ۲-۲-۵- مدل هرتز-دمپ غیر خطی

به منظور توسعه مدل الاستیک غیرخطی هرتز برای استفاده در مهندسی زلزله و نیز در نظر گرفتن استهلاک انرژی، مولفه غیر خطی میرایی به آن اضافه شده است. نیروی ضربه در این مدل به طریق زیر محاسبه می‌گردد [۱۹].

$$F(t) = \beta \delta^{3/2}(t) \left[ 1 + \frac{3(1+e^2)}{4(\dot{x}_1^0 - \dot{x}_2^0)} \dot{\delta}(t) \right] \quad (14)$$

در رابطه ۱۴  $\dot{x}_1^0$  سرعت اولیه دو جسم قبل از برخورد می‌باشد. مشکل مدل فوق این است که در تمام مدت برخورد میرایی در آن به صورت یکنواخت در نظر گرفته می‌شود در حالی که قبلاً بیان شد بیشتر استهلاک انرژی در فاز AP رخ می‌دهد.

### ۲-۲-۶- مدل ویسکوالاستیک غیر خطی

محدودیت مدل الاستیک غیرخطی هرتز در مدل ویسکوالاستیک غیرخطی که بر اساس روابط ۱۵ الی ۱۷ بیان می‌شود برطرف شده است. در این مدل به جای اینکه میرایی را در تمام زمان برخورد داشته باشیم فقط در فاز AP داریم [۲۰].

$$\begin{cases} F(t) = \bar{\beta} \delta^{3/2}(t) + \bar{C}(t) \dot{\delta}(t); \dot{\delta}(t) > 0 \\ F(t) = \bar{\beta} \delta^{3/2}(t); \dot{\delta}(t) \leq 0 \end{cases} \quad (15)$$

$$\bar{C}(t) = 2\bar{\xi} \sqrt{\bar{\beta} \sqrt{\delta(t)} \frac{m_1 m_2}{m_1 + m_2}} \quad (16)$$

$$\bar{\xi} = \frac{9\sqrt{5}}{2} \frac{1-e^2}{e(e(9\pi-16)+16)} \quad (17)$$

که در روابط فوق  $\bar{\beta}$  پارامتر سختی ضربه،  $\bar{C}$  میرایی و  $\bar{\xi}$  نسبت میرایی در این مدل هستند.

### ۲-۳-۳- بحث در مورد مدل‌سازی

#### ۲-۳-۱- مطالعات آزمایشگاهی

نتایج مطالعات آزمایشگاهی محققان نشان می‌دهد که اگر برخورد به صورت یک طرفه مدل شود (مثلاً بصورت برخورد یک گوی به صفحه‌ای صلب همجنس با آن مطابق آنچه در شکل بطور شماتیک نشان داده شده است)، مدل‌های ویسکوالاستیک خطی و ویسکوالاستیک غیرخطی تطابق بهتری با واقعیت دارند. و چنانچه مدل آزمایشگاهی بصورت برخورد دو سیستم یک درجه آزادی باشد (شکل ۵)، مدل‌های ویسکوالاستیک خطی، هرتز دمپ و ویسکوالاستیک غیرخطی تطابق بهتری با واقعیت خواهند داشت [۱۴]. بنابراین، می‌توان گفت مدل ویسکوالاستیک غیرخطی دارای کاربرد وسیع‌تری می‌باشد.

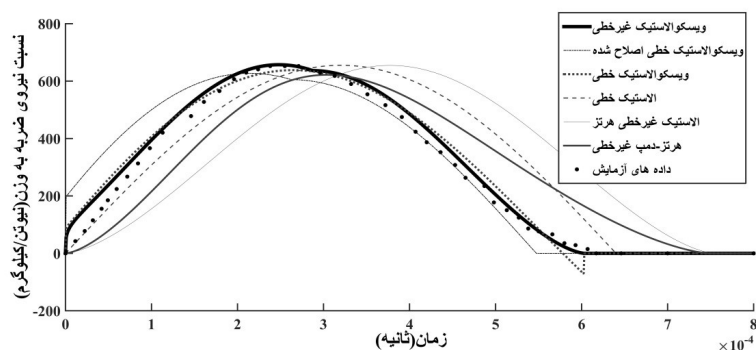
نیز نتایج مدل‌های تحلیلی مختلف در تعیین نیروی ضربه در شکل‌های ۶ و ۷ قابل مشاهده می‌باشند.

مذکور نیروی برخورد  $F(t)$  و سرعت‌های گوی (قبل و پس از برخورد با صفحه) اندازه‌گیری شده‌اند. جزییات بیشتر درخصوص آزمایش‌های مذکور در مرجع [۱۴] موجود است. نمودارهای مربوط به مشاهدات آزمایشگاهی و

جدول ۱: مشخصات آزمایش برخورد گوی با صفحه [۱۴]

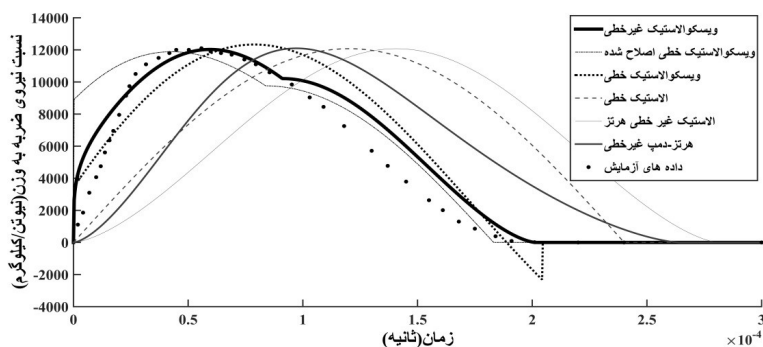
Table 1. Specifications of the ball-plate collision experiment

جنس گوی و صفحه		نوع مدل
بتن	فولاد	
$K = 4/33 \times 10^7$ (N/m)	$K = 3/45 \times 10^8$ (N/m)	الاستیک خطی
$K = 4/91 \times 10^7$ (N/m) $\xi = 0/09$	$K = 4/82 \times 10^8$ (N/m) $\xi = 0/17$	ویسکوالاستیک خطی
$K = 5/47 \times 10^7$ (N/m) $\xi = 0/19$	$K = 5/03 \times 10^8$ (N/m) $\xi = 0/43$	ویسکو الاستیک خطی اصلاحی
$\beta = 5/92 \times 10^7$ (N/m <sup>3/2</sup> )	$\beta = 2/94 \times 10^{11}$ (N/m <sup>3/2</sup> )	الاستیک غیرخطی هرتز
$\bar{\beta} = 6/39 \times 10^7$ (N/m <sup>3/2</sup> ) $e = 0/76$	$\beta = 3/76 \times 10^{11}$ (N/m <sup>3/2</sup> ) $e = 0/58$	غیرخطی هرتز - دمپ
$\bar{\beta} = 1/02 \times 10^7$ (N/m <sup>3/2</sup> ) $\bar{\xi} = 0/22$	$\bar{\beta} = 6/06 \times 10^{11}$ (N/m <sup>3/2</sup> ) $\bar{\xi} = 0/49$	ویسکو الاستیک غیرخطی



شکل ۶: تاریخچه زمانی نیروی ضربه گوی بتنی با یک صفحه صلب بتنی، مقایسه نتایج مدل‌های مختلف و نتایج آزمایشگاهی

Fig. 6. Time history of the pounding force between the concrete ball and a rigid concrete surface, a comparison between various models and the experimental observations



شکل ۷: تاریخچه زمانی نیروی ضربه گوی فولادی با یک صفحه صلب فولادی، مقایسه نتایج مدل های مختلف و نتایج آزمایشگاهی

Fig. 7. Time history of the pounding force between the steel ball and a rigid steel surface, a comparison between various models and the experimental observations

سازه مجاور (ساختمان همسایه) نامعلوم باشد، یکی از اولین الزامات تعیین مشخصات مذکور خواهد بود.

#### جدول ۲: درصد خطای اختلاف پاسخ نیروی بیشینه ضربه مدل های مختلف با آزمایش

Table. 2. Error (%) in the evaluation of the peak contact force by various models as compared with the experimental observations

جنس		نوع مدل
فولاد	بتن	
۶۰/۷	۳۰/۸۱	الاستیک خطی
۲۲/۷۲	۱۱/۳۴	ویسکوالاستیک خطی
۳۶/۲۳	۲۳/۳۱	ویسکوالاستیک خطی اصلاحی
۸۳/۳۳	۵۴/۵۳	الاستیک غیرخطی هرتز
۵۴/۸۲	۳۰/۱۴	هرتز - دمپ غیرخطی
۱۸/۸۳	۸/۴۲	ویسکوالاستیک غیرخطی

#### ۴-۱- ایجاد فاصله کافی بین ساختمان های مجاور به منظور جلوگیری از برخورد

رایج ترین و ساده ترین راه حل برای جلوگیری از برخورد ساختمان ها ایجاد فاصله مناسب بین آنها می باشد. تحقیقات متعددی بر روی تخمین فاصله لرزه ای مورد نیاز از طریق تحلیل پاسخ دینامیکی ساختمان های مجاور انجام گرفته است [۱۴]. در تحلیل های مذکور ساختمان ها بصورت SDOF و MDOF مدل شده و همچنین پاسخ خطی و غیر خطی الاستیک آنها بررسی شده است. اگر  $x^L(t)$  و  $x^R(t)$  به ترتیب تاریخچه زمانی تغییر مکان

درصد خطای نیروی بیشینه ضربه بدست آمده در مدل های مختلف در قیاس با نتایج آزمایش در جدول ۲ آورده شده است. از مقایسه نتایج بدست آمده از مدل های تحلیلی مختلف مشخص می شود که مدل ویسکوالاستیک غیرخطی پاسخ مناسب تری نسبت به سایر مدل ها برای هر دو جنس بتن و فولاد دارد.

#### ۳- سایر مطالعات انجام شده

برخورد ساختمان های مجاور در هنگام زلزله از جنبه های مختلف توسط محققین مورد بررسی و مطالعه قرار گرفته است. عناوین تعدادی از مطالعات انجام شده که جنبه های مختلف مسئله ضربه را بررسی کرده اند عبارتند از: بررسی برخورد گروهی سازه ها به هنگام زلزله [۲۱]؛ مطالعه برخورد ساختمان های بتنی با ترازهای مختلف [۲۲]؛ تحلیل برخورد بین طبقه ای در ساختمان های بتنی چند طبقه [۲۳]؛ بررسی اثر توزیع جرم در چگونگی برخورد سازه ها [۲۴]؛ برخورد در ساختمان های دارای جداساز لرزه ای [۲۵] مدل سازی سه بعدی برخورد سازه ها [۲۶ و ۲۷] پیشش های ناشی از ضربات با خروج از مرکزیت در سازه ها [۲۸]؛ تاثیر متفاوت بودن مشخصه های دینامیکی در برخورد سازه های هم ارتفاع [۲۹]؛ مطالعه سه بعدی آثار ضربه های وارده بر میانه ارتفاع ستون ها و یا گوشه های ساختمان [۳۰]؛ بررسی اثر میان قاب های ساختمان بر بازتاب ضربه [۳۱]؛ بررسی آثار ضربه با در نظر گرفتن اندرکنش خاک-سازه [۳۲ و ۳۳].

#### ۴- راهکارهای کاهش پاسخ سازه

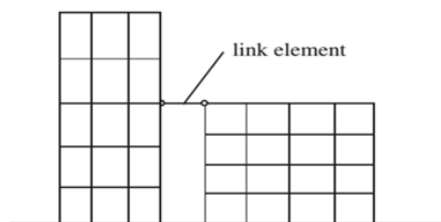
پس از آشنایی با روش های تحلیلی مختلف مدلسازی ضربه در ساختمان های مجاور، در ادامه به راهکارهای عملی کاهش آثار ضربه در سازه ها می پردازیم. در بسیاری از راهکارهای کاهش ضربه لازم است طراح مشخصات دینامیکی سازه های برخورد کننده را در اختیار داشته باشد تا منطقی قادر به انجام تحلیل ضربه در دو ساختمان گردد. در مواردی که مشخصات

وسترمو<sup>۴</sup> اتصال ساختمان‌ها با یک تیر اضافی را پیشنهاد داد که تمام نیرو را بین دو ساختمان منتقل می‌کند [۳۴]. این اتصال در صورت وجود ویژگی‌های لازم در آن می‌تواند سبب استهلاک انرژی نیز گردد. کاسایی<sup>۵</sup> و همکاران از دمپره‌های ویسکوالاستیک برای اتصال ساختمان‌ها استفاده کردند و برخی مطالعات مشابه روی اتصال ساختمان‌ها با ابزارهای مستهلک کننده انرژی انجام شده است [۳۵] مقدار بهینه برای توزیع دمپره‌های ویسکوز برای وصل کردن ساختمان‌های مجاور با ارتفاع مختلف توسط لوس<sup>۶</sup> و همکاران بدست آمده است [۳۶]. مشخصات دینامیکی و پاسخ لرزه‌ای ساختمان‌های مجاور متصل شده با دمپره‌های مایع نیز توسط جانگ و شی<sup>۷</sup> بررسی شده است [۳۷]. تاثیر نوع المانی که با آن ساختمان‌های مجاور را به هم وصل می‌کنند با توجه به مشخصات KB و CB که به ترتیب سختی و میرایی المان اتصال هستند، بر روی معادله دینامیکی حرکت ساختمان بصورت زیر است:

$$m\ddot{x}(t) + C\dot{x}(t) + (K + K_B)\ddot{x}(t) = -m\ddot{x}_g(t) \quad (22)$$

$$m\ddot{x}(t) + (C + C_B)\dot{x}(t) + Kx(t) = -m\ddot{x}_g(t) \quad (23)$$

$$m\ddot{x}(t) + (C + C_B)\dot{x}(t) + (K + K_B)x(t) = -m\ddot{x}_g(t) \quad (24)$$



شکل ۹: وصل کردن ساختمان‌های مجاور به یکدیگر

Fig. 9. Connecting the two adjacent structures to one another

#### ۴-۳- سپرها

آناگناستوپولوس<sup>۸</sup> و کارمانیس<sup>۹</sup> به این ایده پرداختند که فاصله بین ساختمان‌ها را با مواد جاذب انرژی پر کنند یا با به کار گذاشتن دیوار برشی ساختمان را در مقابل ضربه محافظت کنند [۳۸]. اثر بخشی سپرهای لاستیکی بعنوان یک روش دیگر برای کاهش اثر برخورد ساختمان‌های مجاور توسط پلی کارپو<sup>۱۰</sup> بررسی شده است (شکل ۱۰) [۳۹].

4 Westermo

5 Kasai

6 Luce

7 Zhang and Xu

8 Anagnostopoulos

9 Karamaneas

10 Polycarpou

ساختمان‌های راست و چپ باشند (شکل ۸) آنگاه حداقل فاصله مورد نیاز بین ساختمان‌ها،  $d_{min}$ ، را می‌توان از روش جمع قدرمطلق‌ها<sup>۱</sup> (ABS) یا از روش جذر مجموع مربعات<sup>۲</sup> (SRSS) به ترتیب از روابط ۱۹ و ۲۰ محاسبه کرد.

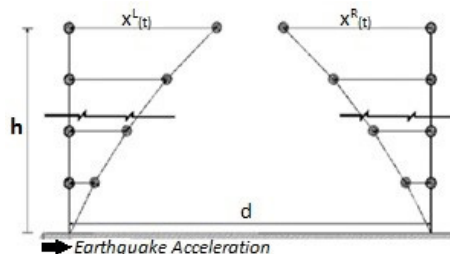
$$d_{min} = x_{max}^R + x_{max}^L \quad (19)$$

$$d_{min} = \sqrt{(x_{max}^R)^2 + (x_{max}^L)^2} \quad (20)$$

در صورتی که به فاز ارتعاش و میرایی دو ساختمان مجاور توجه شود می‌توان از روش SSD<sup>۳</sup> طبق رابطه زیر جهت محاسبه حداقل فاصله مورد نیاز استفاده کرد [۶].

$$d_{min} = \sqrt{(x_{max}^R)^2 + (x_{max}^L)^2 - 2\rho x_{max}^R x_{max}^L} \quad (21)$$

در رابطه فوق  $\rho$  ضریب همبستگی است که تابع پریرود طبیعی و نسبت میرایی دو سازه می‌باشد. جواب‌هایی که از روش ABS بدست می‌آیند محافظه کارانه‌تر از دو روش دیگر هستند چرا که بیشینه جابجایی‌های جانبی دو ساختمان در یک لحظه زمانی رخ نمی‌دهند. جواب‌های روش‌های SRSS و SPD معقول‌تر بوده و اختلاف آنها ناچیز است چرا که  $\rho$  عدد بسیار کوچکی است.



شکل ۸: تغییر مکان دو ساختمان مجاور یکدیگر به دلیل ارتعاش حاصل از زلزله

Fig. 8. Lateral deformation of two adjacent structures during an earthquake

#### ۴-۲- وصل کردن ساختمان‌ها

روشی دیگر برای جلوگیری از برخورد ساختمان‌ها با یکدیگر، متصل کردن آنها به هم می‌باشد. همانگونه که در شکل ۷ نشان داده شده است،

1 Absolute sum

2 Square root of sum of squares

3 Spectral difference method

صورت گیرد، انتظار می‌رود نیروی ضربه نسبت به قبل از نصب تجهیزات مذکور کاهش قابل توجهی یابد. موارد فوق الذکر متعاقباً در مقاله حاضر بصورت کمی مورد مطالعه قرار خواهند گرفت.

#### ۵- بحث در مورد روش‌های کاهش پاسخ سازه

همانطور که بیان شد ساده‌ترین روش برای کاهش آثار ضربه در اثر برخورد ساختمان‌های مجاور ایجاد فاصله (درز انقطاع) است. این روش هم اکنون مورد توجه آیین‌نامه‌ها است. اما باید توجه نمود که ساختمان‌های بسیاری وجود دارند که قبل از اضافه شدن این الزام در آیین‌نامه‌ها ساخته شده‌اند. بنابراین، فاصله مناسب بین آنها رعایت نشده است. ضمن اینکه حقیقت امر آن است که حتی در ساختمان‌های جدید نیز متقاعد نمودن کارفرما در رعایت این الزام آیین‌نامه‌ای کار ساده‌ای نیست. چراکه بدلیل کمبود زمین و گرانی آن در مناطق شهری، کارفرمایان تمایل چندانی به رعایت درز انقطاع ندارند. در برخی موارد نحوه ساخت ساختمان به گونه‌ای است که عملاً درز انقطاع پیش بینی شده بین ستون‌های دو ساختمان مجاور فاقد کارایی لازم می‌باشد. به عنوان مثال، در برخی از ساختمان‌های بتنی به منظور سهولت اجرا با توجه به فضای محدود کار وجه خارجی تیرهای کناری ساختمان قالب بندی نمی‌گردد. بنابراین، پس از بتن‌ریزی عملاً تیرهای مذکور در تماس با ساختمان مجاور قرار گرفته و درز انقطاع در تراز تیرهای مذکور حذف می‌گردد. با توجه به دلایل و محدودیت‌هایی که ذکر شد لزوم استفاده از راهکارهای عملی دیگر (با توجه به فقدان درز انقطاع موثر) در ساختمان‌های موجود ضرورت می‌یابد.

همانگونه که در بخش‌های قبلی مقاله ذکر شد، یکی از راهکارهای مطرح، ایجاد اتصال بین ساختمان‌های مجاور یکدیگر می‌باشد. اجرای این راهکار در ساختمان‌های موجود ممکن است با موانع اجرایی عمده‌ای مواجه گردد. اولین چالش جلب رضایت مالکین ساختمان‌ها به انجام این کار می‌باشد. علاوه بر این، اجرای یک اتصال مناسب در فاصله ناچیز درز انقطاع موجود بین ساختمان‌ها معمولاً غیر اجرایی است. در صورتیکه بتوان اتصال مناسبی بین دو ساختمان مجاور ایجاد نمود، این اتصال سبب انتقال نیروهای اندرکنش بین دو سازه شده و در نتیجه ممکن است اعضای سازه‌ای هر دو ساختمان نیازمند مقاوم‌سازی گردند. در مواردیکه ردیفی از ساختمان‌های مجاور بدون رعایت درز انقطاع موجود باشند، مجموعه آنها را می‌باید به یکدیگر متصل نمود که این امر عموماً غیر عملی خواهد بود.

راهکار دیگر ایجاد سپرهای مختلف بین ساختمان‌ها (مانند مصالح جاذب انرژی و جذب کننده شوک) می‌باشد. در این روش نیز با فرض رعایت نشدن درز انقطاع در ساختمان‌های موجود عملاً نمی‌توان این مصالح را بین دو ساختمان بدرستی تعبیه نمود.

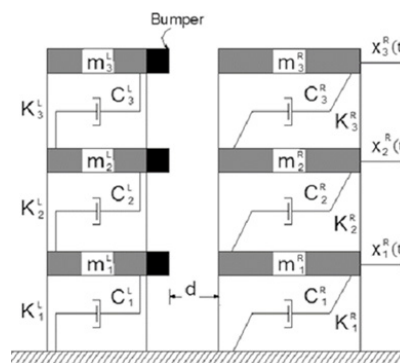
با توجه به توضیحات فوق در صورت فقدان درز انقطاع مناسب یکی از عملی‌ترین روش‌ها، مقاوم‌سازی ساختمان می‌باشد که می‌تواند با افزایش سختی جانبی و یا افزایش میرایی موثر با استفاده از ابزارهای مستهلک کننده

لاستیک ماده مناسبی برای استفاده به عنوان سپر ضربه‌گیر بوده و می‌تواند مانند یک جاذب شوک عمل کند. شبیه‌سازی رفتار نیرو-جابجایی لاستیک آسان نیست، چراکه تحت بارهای فشاری استاتیکی، رفتاری غیر خطی دارد. بر پایه مشاهدات آزمایشگاهی نمودار تنش- کرنش لاستیک تحت فشار را می‌توان به صورت یک تابع نمایی در نظر گرفت. بنابراین، استفاده از مدل‌های خطی برای شبیه‌سازی رفتار نیرو-جابجایی لاستیک مناسب نیست. پلی کارپو از المان غیرخطی فنر-میراگر برای شبیه‌سازی عددی یک سپر لاستیکی که برای کاهش اثر برخورد بکار رفته استفاده کرده است [۳۹].

#### ۴-۴- مقاوم سازی ساختمان‌ها

##### ۴-۴-۱- افزایش سختی ساختمان

افزایش سختی و به تبع آن کاهش تغییر مکان‌های جانبی ساختمان می‌تواند سبب کاهش مقادیر پاسخ شتاب و نهایتاً کاهش آثار مخرب برخورد شود. افزایش سختی و در نتیجه آن افزایش فرکانس طبیعی ساختمان می‌تواند منجر به فاصله گرفتن از فرکانس‌های غالب زلزله و پدیده تشدید گردد. این روش به طور عمومی بعنوان یک راه‌حل موثر در مقاوم‌سازی لرزه‌ای می‌تواند مورد توجه قرار گیرد. اضافه کردن دیوار برشی یا مهاربند به سیستم مقاوم لرزه‌ای می‌تواند به عنوان راهکاری جهت افزایش سختی سازه و بهبود رفتار آن باشد.



شکل ۱۰: استفاده از سپرهای لاستیکی ضربه گیر [۳۹]

Fig. 10. The use of rubber bumpers

#### ۴-۴-۲- ابزارهای مستهلک کننده انرژی

روش دیگر برای جلوگیری از کاهش خسارات ناشی از برخورد ساختمان‌های مجاور، افزایش میرایی موثر یک و یا هر دوی آنها از طریق تعبیه ابزار مستهلک کننده انرژی می‌باشد. کارگزاری این ابزار می‌تواند سبب کاهش تغییر مکان‌های ساختمان و بهبود رفتار کلی ساختمان تحت تحریک زلزله -شود. چنانچه با وجود کار گذاشتن این ابزار برخوردی بین دو سازه



$$\frac{k_{li}}{k_{lf}} = \left( \frac{T_{lf}}{T_{li}} \right)^2 \quad (27)$$

در رابطه ۲۷،  $k_{lf}$  و  $k_{li}$  به ترتیب سختی اولیه و نهایی سازه اول و همچنین  $T_{lf}$  و  $T_{li}$  به ترتیب پریود اولیه و نهایی سازه اول هستند. تاثیر سختی سازه بر نیروی ضربه وارده بر آن که با استفاده از مدل ویسکوالاستیک غیر خطی برنامه نویسی شده در نرم افزار متلب محاسبه شده است را می توان در جدول ۴ مشاهده نمود. با توجه به جدول ۴ افزایش سختی جانبی سازه تاثیر قابل ملاحظه ای بر کاهش نیروهای ضربه وارد بر آن دارد. همچنین تاثیر افزایش سختی در سازه اول بر روی تغییر مکان این سازه به ازای افزایش سختی به میزان ۲۰ و ۵۰ درصد در شکل ۱۱ نشان داده شده است.

#### جدول ۴: تاثیر افزایش سختی بر نیروی ضربه

Table. 4. The influence of the increased stiffness on the pounding force

میزان کاهش نیروی ضربه	نیروی ضربه (نیوتن)	$T_{lf}$	$k_{lf}/k_{li}$
-	۳۱۰۷۵۸۶	۱/۴	۱
۰/۱۴	۲۶۵۴۹۷۴	۱/۳۳۴	۱/۱
۰/۳۰	۲۱۸۶۷۵۱	۱/۲۷۸	۱/۲
۰/۴۸	۱۶۱۰۶۰۸	۱/۲۲۸	۱/۳
۰/۶۳	۱۱۶۲۴۷۰	۱/۱۸۳	۱/۴
۰/۷۳	۸۳۴۶۸۶	۱/۱۴۳	۱/۵

#### ۶-۲- افزایش میرایی سازه ها

روشی دیگر برای کاهش پاسخ سازه افزایش میرایی موثر آن می باشد. برای این منظور می توان از انواع میراگرهای الحاقی بهره جست. در این مقاله میراگرهای ویسکوز مایع مورد استفاده قرار گرفته اند. سازه های مورد نظر با مشخصات مندرج در جدول ۳ مطابقت دارند. برای مقاوم سازی در این مورد میرایی موثر سازه اول از ۵ تا ۲۵ درصد تغییر نموده و تحلیل اثر ضربه به کمک مدل ویسکوالاستیک غیرخطی انجام پذیرفته است که نتایج آن در جدول ۵ قابل ملاحظه می باشد. همچنین، تاثیر افزایش میرایی موثر به میزان ۱۰ و ۲۵ درصد بر تغییر مکان سازه اول در شکل ۱۲ نمایش داده شده است.

انرژی انجام شود. در ادامه روشهای اخیر مورد بررسی بیشتری قرار می گیرند.

#### ۶- مطالعه عددی روش های مقاوم سازی به منظور کاهش اثر ضربه

در این بخش نیروهای ضربه ایجاد شده بین دو سازه یک درجه آزادی که بدون درز انقطاع در مجاورت یکدیگر قرار گرفته و مشخصات آنها در جدول ۳ درج شده است بصورت عددی محاسبه می گردد. فرض بر آنست که تراز جرم هر دو سازه یکسان می باشد. سازه های مورد بررسی که فاقد درز انقطاع می باشند تحت اثر نگاشت زلزله سال ۱۹۷۹ Imperial valley-06 با بزرگی  $M = 6/5$  (ثبت شده توسط ایستگاه Cerro Prieto به فاصله ۱۵/۲ کیلومتر از مرکز زلزله) قرار گرفته اند. لازم به ذکر است که در تحلیل های تاریخچه زمانی انجام شده در این بخش بیشینه شتاب زلزله ورودی به سازه ها به  $0/2g$  نرمالایز شده است. با توجه به آنکه هدف این بخش امکان سنجی افزایش سختی جانبی و (یا) میرایی موثر در یکی از سازه های برخورد کننده بر بازتاب کلی سازه مذکور تحت اثر ضربه می باشد، مطالعات تنها برای یک نگاشت زلزله و یک بیشینه شتاب، یعنی  $0/2g$  که می تواند معرف سطح زلزله بهره برداری با دفعات وقوع نسبتاً زیادتری در طول عمر مفید سازه باشد انجام گرفته است. بدیهی است چنانچه هدف از انجام تحلیل های تاریخچه زمانی طراحی سازه تحت اثر ضربه باشد، می باید مجموعه ای از زلزله های مختلف را طبق ضوابط آیین نامه های طراحی لرزه ای (همانند مرجع [۴۰]) در تحلیل ها بکار گرفت.

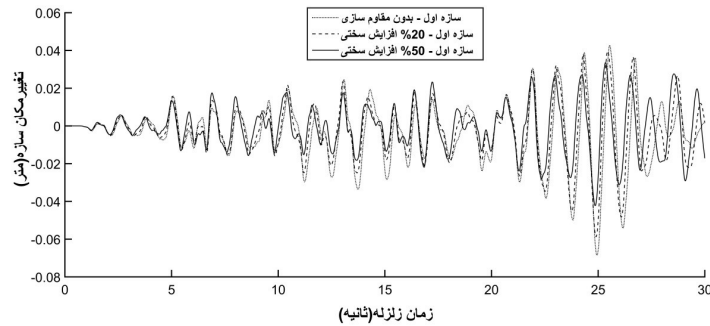
#### جدول ۳: مشخصات دینامیکی دو سازه

Table. 3. Dynamic characteristics of the two structures

پریود طبیعی سازه (ثانیه)	جرم (کیلوگرم)	درصد میرایی	سازه
۱/۴	۱۰۶	۵	سازه اول
۱	۱۰۶	۵	سازه دوم

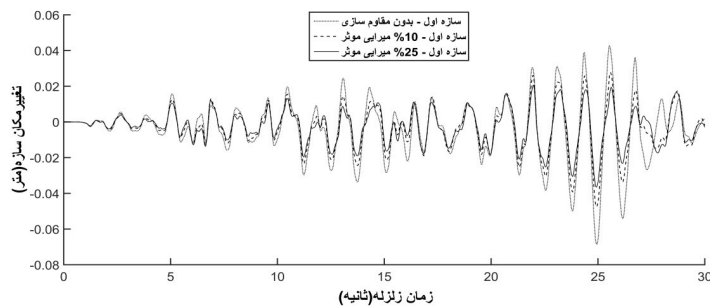
#### ۶-۱- افزایش سختی سازه ها

همانطور که پیشتر بیان شد یکی از روش های کاربردی جهت بهبود رفتار سازه و کاهش اثر ضربه، افزایش سختی آن است. این امر عملاً می تواند با اضافه کردن دیوار برشی یا مهاربند به یک سازه ساختمانی محقق گردد. فرض می شود که هدف ما مقاوم سازی سازه اول با افزایش سختی است. تاثیر افزایش سختی بر پریود سازه را میتوان به کمک رابطه زیر تحقیق نمود.



شکل ۱۱: تاثیر افزایش سختی سازه مقاوم سازی شده بر تغییر مکان آن

Fig. 11. The influence of the increased stiffness on the lateral deformation of the strengthened structure



شکل ۱۲: تاثیر افزایش میرایی سازه مقاوم سازی شده بر تغییر مکان آن

Fig. 12. The influence of the increased damping on the lateral deformation of the strengthened structure

### ۳-۶- افزایش میرایی و سختی سازه

در صورتی که در سازه‌ای از میراگر الحاقی ویسکوالاستیک، فلزی و یا اصطکاکی استفاده شود، علاوه بر میرایی سختی سازه نیز افزایش می‌یابد. در میراگرهای الحاقی ویسکوالاستیک اتلاف انرژی از طریق تغییر شکل‌های برشی وارده بر ماده کوپلیمر میراگر صورت می‌گیرد. سختی جانبی و میرایی موثر میراگرهای مذکور تابعی از ابعاد فیزیکی و مدول‌های برشی ذخیره و افت ماده کوپلیمر میراگر و نیز دامنه و تاریخچه تغییر شکل‌های وارده بر میراگر می‌باشند. در میراگرهای فلزی تسلیمی و نیز میراگرهای اصطکاکی، سختی اولیه سازه مجهز به میراگر تا قبل از عمل نمودن میراگرها - یعنی قبل از به تسلیم رسیدن مصالح میراگر (در میراگرهای فلزی) و یا وقوع لغزش در صفحات لغزش میراگر (در میراگرهای اصطکاکی) - افزایش قابل توجهی می‌یابد. پس از عمل کردن میراگر - با وقوع تسلیم در مصالح میراگر و یا ایجاد لغزش در سطوح پیش بینی شده - هم زمان با اتلاف انرژی سختی موثر میراگر دچار افت قابل توجهی می‌گردد. در محاسبه میرایی سازه مجهز به میراگر الحاقی می‌توان از رابطه‌ی ۲۸ استفاده نمود [۴۰].

### جدول ۵: تاثیر افزایش میرایی بر نیروی ضربه

Table 5. The influence of the increased damping on the pounding force

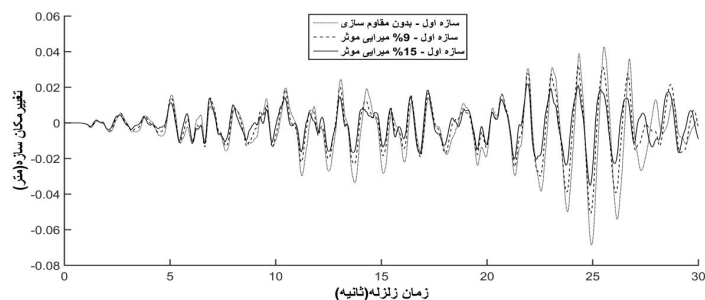
میزان کاهش نیروی ضربه	نیروی ضربه (نیوتن)	درصد میرایی سازه اول
-	۳۱۰۷۵۸۶	۵
۰/۱۸	۲۵۴۲۴۸۹	۱۰
۰/۳۴	۲۰۵۲۶۷۳	۱۵
۰/۴۶	۱۶۹۳۴۳۷	۲۰
۱/۵۵	۱۴۴۲۰۱۶	۲۵

در این رابطه  $k_s$  و  $k_d$  به ترتیب سختی میراگر و سازه می‌باشند. با توجه به رابطه ۲۹ اگر قصد مقاوم‌سازی سازه اول را با افزودن میراگر الحاقی داشته باشیم، با این فرض که میرایی ذاتی سازه ۵ درصد و نسبت میرایی بحرانی میراگر الحاقی ۲۰ درصد باشد، حالات مختلف نشان داده شده در جدول ۶ با توجه به نسبت‌های مختلف  $k_d/(k_s+k_d)$  قابل تعریف و بررسی می‌باشند. همانگونه که در جدول ۶ ملاحظه می‌گردد، کاربرد میراگرهای الحاقی در کاهش نیروی ضربه وارد بر سازه تاثیر قابل ملاحظه ای خواهند داشت. شکل ۱۳ تاریخچه زمانی جابجایی‌های حاصل در سازه اولیه و سازه‌های مجهز به میراگرهای الحاقی با نسبت‌های میرایی متفاوت را نشان می‌دهد. با توجه به این شکل، تاثیر میراگرهای الحاقی بر کنترل جابجایی‌های بیشینه سیستم کاملاً مشهود می‌باشد.

$$\beta_{eff} = \beta + \frac{\sum_j W_j}{4\pi W_k} \quad (28)$$

در رابطه فوق  $\beta$  میرایی ذاتی موجود در سازه (معمولاً ۵ درصد در نظر گرفته می‌شود)،  $W_j$  مبین کار انجام شده توسط هر یک از میراگرهای الحاقی در یک سیکل کامل ارتعاش می‌باشد.  $W_k$  نیز مبین انرژی کرنشی قاب (با احتساب سختی قاب و سختی میراگرها) می‌باشد. در یک سیستم یک درجه آزادی می‌توان از رابطه ساده شده زیر با توجه به تعریف نسبت میرایی ویسکوز معادل در میراگر الحاقی،  $\beta_d$ ، مقدار تقریبی میرایی موثر سازه مجهز به میراگر را تخمین زد.

$$\beta_{eff} \approx \beta + \frac{k_d}{k_s + k_d} \beta_d \quad (29)$$



شکل ۱۳: تاثیر افزایش سختی و میرایی سازه مقاوم سازی شده بوسیله میراگر ویسکوالاستیک بر تغییر مکان آن

Fig. 13. The influence of the increased stiffness and damping on the lateral deformation in a structure strengthened with viscoelastic added dampers

جدول ۶: تاثیر افزایش میرایی و سختی بر نیروی ضربه

Table 6. The influence of the increased stiffness and damping on the pounding force

میزان کاهش نیروی ضربه	نیروی ضربه (نیوتن)	$T_{1f}$	$k_{1f}/k_{1i}$	$\beta_{eff}$	$k_d/(k_s+k_d)$
-	۳۱۰۷۵۸۶	۱/۴	۱	٪۵	-
۰/۲۲	۲۳۹۵۲۰۷	۱/۳۳۴	۱/۱	٪۷	٪۱۰
۰/۳۰	۱۷۳۶۸۸۸	۱/۲۷۸	۱/۲	٪۹	٪۲۰
۰/۴۱	۱۲۳۳۴۸۶	۱/۲۲۸	۱/۳	٪۱۱	٪۳۰
۰/۵۸	۹۳۰۰۸۸	۱/۱۸۳	۱/۴	٪۱۳	٪۴۰
۰/۷۷	۷۲۲۹۴۵	۱/۱۴۳	۱/۵	٪۱۵	٪۵۰

- [9] B. Sołtysik, R.J.I.J.o.E.S. Jankowski, Engineering, Non-linear strain rate analysis of earthquake-induced pounding between steel buildings, 6 (2013) 429-433.
- [10] W. Goldsmith, Impact: The theory and physical behavior of colliding solids, Arnold, 1960.
- [11] M. Goland, P. Wickersham, M.J.J.o.A.M. Dengler, Propagation of elastic impact in beams in bending, 22 (1955) 1-7.
- [12] R.J.E.E. Jankowski, S. Dynamics, Experimental study on earthquake-induced pounding between structural elements made of different building materials, 39(3) (2010) 343-354.
- [13] J.G. van Mier, A.F. Puijssers, H.W. Reinhardt, T.J.J.o.S.E. Monnier, Load-time response of colliding concrete bodies, 117(2) (1991) 354-374.
- [14] R. Jankowski, S. Mahmoud, Earthquake-induced structural pounding, Springer, 2015.
- [15] P.C. Polycarpou, P.J.E.E. Komodromos, S. Dynamics, On poundings of a seismically isolated building with adjacent structures during strong earthquakes, 39(8) (2010) 933-940.
- [16] S. Mahmoud, R.J.I.J.o.S. Jankowski, T.T.o.C. Engineering, Modified linear viscoelastic model of earthquake-induced structural pounding, 35(C1) (2011) 51.
- [17] H.J.J.r.a.M. Hertz, Ueber die Berührung fester elastischer Körper, 92 (1882) 156-171.
- [18] [K. Chau, X.J.E.e. Wei, s. dynamics, Pounding of structures modelled as non-linear impacts of two oscillators, 30(5) (2001) 633-651.
- [19] S. Muthukumar, R.J.E.e. DesRoches, s. dynamics, A Hertz contact model with non-linear damping for pounding simulation, 35(7) (2006) 811-828.
- [20] R.J.E.e. Jankowski, s. dynamics, Non-linear viscoelastic modelling of earthquake-induced structural pounding, 34(6) (2005) 595-611.
- [21] S.A.J.E.e. Anagnostopoulos, s. dynamics, Pounding of buildings in series during earthquakes, 16(3) (1988) 443-456.
- [22] C.G. Karayannis, M.J.J.E.e. Favvata, s. dynamics, Earthquake-induced interaction between adjacent reinforced concrete structures with non-equal heights, 34(1) (2005) 1-20.
- [23] C.G. Karayannis, M.J.J.S.E. Favvata, Mechanics, Inter-story pounding between multistory reinforced concrete structures, 20(5) (2005) 505-526.
- [24] G. Cole, R. Dhakal, A. Carr, D.J.E.E. Bull, S. Dynamics, An investigation of the effects of mass distribution on pounding structures, 40(6) (2011) 641-659.

## ۷- نتیجه‌گیری

در این مقاله انواع روش‌های مدلسازی اثر ضربه در ساختمان‌های مجاور یکدیگر مورد بررسی قرار گرفته‌اند. در میان مدل‌های بررسی شده، مدل ویسکوالاستیک غیرخطی از دامنه کاربرد وسیع‌تری برخوردار می‌باشد. در ادامه مقاله راهکارهای عملی کاهش پاسخ ساختمان‌ها در اثر برخورد با یکدیگر مورد بررسی قرار گرفتند. یکی از راهکارهای موثر جهت مهار آثار ضربه در سازه‌ای که فاقد درز انقطاع با ساختمان مجاور خویش می‌باشد، تقویت سختی و (یا) میرایی موثر سازه است. با استفاده از ابزارهای مستهلک‌کننده‌ی انرژی (میراگرهای الحاقی) می‌توان نسبت به افزایش میرایی موثر ساختمان و استهلاک بیشتر بازتاب ساختمان در پی ضربه وارده بر آن اقدام نمود. در بخش پایانی مقاله اثر افزایش سختی و میرایی سازه بر مقدار نیروی ضربه وارده بر سازه و نیز مقادیر بیشینه جابجایی‌های جانبی وارد بر آن در حالات مختلف به کمک تحلیل تاریخچه زمانی مورد بررسی قرار گرفتند. نتایج این بررسی‌ها نشان داد که افزایش سختی جانبی و (یا) میرایی موثر سازه می‌تواند سبب کاهش قابل توجه آثار ضربه در ساختمان‌های مجاور یکدیگر که فاقد درز انقطاع می‌باشند گردد.

## مراجع

- [1] E. Rosenblueth, R.J.C.i. Meli, The 1985 Mexico earthquake, 8(5) (1986) 23-34.
- [2] K. Kasai, B.F.J.E.s. Maison, Building pounding damage during the 1989 Loma Prieta earthquake, 19(3) (1997) 195-207.
- [3] S.A. Anagnostopoulos, K.V.J.E.e. Spiliopoulos, s. dynamics, An investigation of earthquake induced pounding between adjacent buildings, 21(4) (1992) 289-302.
- [4] R.J.E.s. Jankowski, Earthquake-induced pounding between equal height buildings with substantially different dynamic properties, 30(10) (2008) 2818-2829.
- [5] C.G. Karayannis, M.J.J.E.e. Favvata, s. dynamics, Earthquake-induced interaction between adjacent reinforced concrete structures with non-equal heights, 34(1) (2005) 1-20.
- [6] C.G. Karayannis, M.J.J.S.E. Favvata, Mechanics, Inter-story pounding between multistory reinforced concrete structures, 20(5) (2005) 505-526.
- [7] B.F. Maison, K.J.E.e. Kasai, s. dynamics, Dynamics of pounding when two buildings collide, 21(9) (1992) 771-786.
- [8] P.C. Polycarpou, L. Papaloizou, P.J.E.E. Komodromos, S. Dynamics, An efficient methodology for simulating earthquake-induced 3D pounding of buildings, 43(7) (2014) 985-1003.

- [33] M. Ghandil, F. Behnamfar, M.J.S.D. Vafaeian, E. Engineering, Dynamic responses of structure–soil–structure systems with an extension of the equivalent linear soil modeling, 80 (2016) 149-162.
- [34] B.D.J.E.e. Westermo, s. dynamics, The dynamics of interstructural connection to prevent pounding, 18(5) (1989) 687-699.
- [35] K. Kasai, J.A. Munshi, B.F. Maison, Viscoelastic dampers for seismic pounding mitigation, in: Structural Engineering in Natural Hazards Mitigation, ASCE, 1993, pp. 730-735.
- [36] J.E. Luco, F.C.J.E.E. De Barros, S. Dynamics, Optimal damping between two adjacent elastic structures, 27(7) (1998) 649-659.
- [37] W. Zhang, Y.J.J.o.S. Xu, Vibration, Vibration analysis of two buildings linked by Maxwell model-defined fluid dampers, 233(5) (2000) 775-796.
- [38] S. Anagnostopoulos, C.J.E.e. Karamaneas, s. dynamics, Use of collision shear walls to minimize seismic separation and to protect adjacent buildings from collapse due to earthquake-induced pounding, 37(12) (2008) 1371-1388.
- [39] P.C. Polycarpou, P. Komodromos, A.C.J.E.E. Polycarpou, S. Dynamics, A nonlinear impact model for simulating the use of rubber shock absorbers for mitigating the effects of structural pounding during earthquakes, 42(1) (2013) 81-100.
- [40] A.S.o.C. Engineers, Seismic Evaluation and Retrofit of Existing Buildings (ASCE/SEI 41-13), American Society of Civil Engineers, 2014.
- [25] P.C. Polycarpou, P.J.E.S. Komodromos, Earthquake-induced poundings of a seismically isolated building with adjacent structures, 32(7) (2010) 1937-1951.
- [26] P.C. Polycarpou, L. Papaloizou, P.J.E.E. Komodromos, S. Dynamics, An efficient methodology for simulating earthquake-induced 3D pounding of buildings, 43(7) (2014) 985-1003.
- [27] P.C. Polycarpou, L. Papaloizou, P. Komodromos, D.C.J.E. Charmpis, Structures, Effect of the seismic excitation angle on the dynamic response of adjacent buildings during pounding, 8(5) (2015) 1127-1146.
- [28] L. Wang, K. Chau, X.J.A.i.S.E. Wei, Numerical simulations of nonlinear seismic torsional pounding between two single-story structures, 12(1) (2009) 87-101.
- [29] R.J.E.s. Jankowski, Earthquake-induced pounding between equal height buildings with substantially different dynamic properties, 30(10) (2008) 2818-2829.
- [30] M. Papadrakakis, C. Apostolopoulou, A. Zacharopoulos, S.J.J.o.E.M. Bitzarakis, Three-dimensional simulation of structural pounding during earthquakes, 122(5) (1996) 423-431.
- [31] H. Elwardany, A. Seleemah, R.J.E.S. Jankowski, Seismic pounding behavior of multi-story buildings in series considering the effect of infill panels, 144 (2017) 139-150.
- [32] B. Madani, F. Behnamfar, H.T.J.S.D. Riahi, E. Engineering, Dynamic response of structures subjected to pounding and structure–soil–structure interaction, 78 (2015) 46-60.

Please cite this article using:

M. Papi, H. Toopchi-Nezhad, A Literature Review on Modeling and Mitigating the Pounding Effects in Buildings, *Amirkabir J. Civil Eng.*, 50(6) (2019) 1113-1126.  
DOI: 10.22060/ceej.2017.12733.5260

برای ارجاع به این مقاله از عبارت زیر استفاده کنید:



