

## بررسی اثر ضربه در میزان استهلاک انرژی زلزله بر پل‌های با عرشه بتنی دارای درز انقطاع

حسین نادرپور\*، دانشیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان  
سید محمد خاتمی، دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان  
روی کارنیرو باروس، دانشیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه پورتو (FEUP)، پورتو، پرتغال

E-mail: naderpour@semnan.ac.ir

دریافت: ۹۳/۱۱/۲۴ - پذیرش: ۹۴/۰۸/۲۵

### چکیده

پل‌ها عموماً به سبب عبور و مرور وسایل نقلیه، دارای بارگذاری متحرک بوده و خطوط تأثیر در حالت‌های مختلف در طراحی حالت بهینه استاتیک نقش تعیین کننده‌ای دارند. اما برای طراحی مذکور، به بارگذاری لرزه‌ای نقشی داده نشده است. پل‌ها به سبب دمای هوا و مباحث فیزیکی، انبساط و انقباض و همینطور بارهای متحرک روی خود از درزهای انقطاعی بهره می‌برند. همچنین، معمولاً اولین دهانه پل‌های بتنی روی سکویی با بالشتک قرار می‌گیرد که فاصله‌ای بین عرشه و سکو ایجاد نماید. اثر ضربه پل‌ها در حین زلزله و تأثیرات مخرب آن، محققین را بر آن داشت تا در این زمینه به تحقیق و بررسی بپردازند. از آنجایی که دهانه پل‌ها به صورت منفرد طراحی و اجرا می‌گردد، در هنگام بارهای لرزه‌ای، هر کدام از دهانه‌ها و عرشه پل‌ها رفتار متفاوتی از خود بروز داده و تغییر مکان‌های جانبی آن‌ها بر اساس جنس سازه و همچنین مود ارتعاشی هر یک از آن‌ها به وجود می‌آید. این تفاوت رفتاری سبب می‌شود که پل‌ها با یکدیگر برخورد کرده و آسیب‌هایی به عرشه و بدنه آن‌ها وارد آید. محققین بسیاری در مورد نیروی وارده در اثر ضربه پل‌ها و انرژی مستهلک شده این رخداد، مطالعه کرده‌اند. برای محاسبه این نیرو و میزان انرژی آن، مطالعات عددی نیاز به داشتن یک المان مجازی دارد که شامل فنر و یک المان فاصله است و به صورت متوالی با یکدیگر به محل اتصال دو جسم مورد مطالعه متصل می‌شود. روابط ریاضی متعددی برای محاسبه دقیق و واقعی‌تر نیروی وارده و انرژی آن ارائه شده است. در این پژوهش، با استفاده از یک رابطه جدید در محاسبه ضریب میرایی، میزان تأثیرات ضریب استرداد بررسی شده و مقدار بهینه‌ای بر پایه این ضریب ارائه شده است.

واژه‌های کلیدی: ضربه پل‌های مجاور، سرعت ضربه، انرژی مستهلک شده، ضریب میرایی.

### ۱. مقدمه

اهمیت بسیاری برخوردارند. پایداری و ایستادگی پل‌ها در زمان‌های مختلف، بخصوص در زمان خطر و پیامدهای اجتماعی و طبیعی، مهم و شایان توجه بسیاری می‌باشد. اما اثرات مخرب بارهای لرزه‌ای،

پل‌ها یکی از عناصر حیاتی در زندگی روزمره بوده و عبور و مرور وسایل نقلیه روی آن‌ها جهت عبور از روی رودخانه‌ها و یا به جهت کاهش ترافیک شهری از

در زلزله Northridge که در سال ۱۹۹۴ رخ داده، گزارش‌هایی از تخریب‌های موضعی برخی پل‌ها ارائه شده است. شکل ۱ تخریب موضعی یک پل و تخریب کلی پل دیگری را نشان می‌دهد که تحت ضربه هر دهانه به دهانه دیگر دچار تخریب شده‌اند. زلزله Kobe (در سال ۱۹۸۵) نیز از مهمترین زلزله‌هایی بود که معروف‌ترین تخریب پل را در خود به همراه داشته است. پایداری پل Kobe که در راستای خود با یک ستون در هر دهانه طراحی و ساخته شده بود، به واسطه مؤلفه قائم نیروی زلزله و به سبب کم بودن تعداد درجات نامعینی آن به خطر افتاد و دچار تخریب کلی شد.

بخصوص زلزله، از عوامل خطرآفرین بر پل‌ها بوده و تخریب آن‌ها به واسطه بارهای جانبی و لرزه‌ای سبب مشکلات فراوانی در زمینه سرویس‌دهی و خدمت-رسانی می‌گردد. معمولاً، پایین بودن درجه نامعینی، همانند آنچه در زلزله Kobe رخ داد و یا ضربات دهانه پل‌ها به یکدیگر، از عوامل مهم و مؤثر در تخریب پل‌ها می‌باشند. ضربه، به عنوان یکی از عوامل مهم در تخریب پل‌ها، به واسطه رفتار ناهمگون بارهای وارده و یا تفاوت در ساختار پل‌ها عنوان شده است. وقتی در حین زلزله، میزان جابجایی جانبی هر دهانه از پل، از میزان درز انقطاع موجود افزایش یابد، آنگاه ضربه دو دهانه به یکدیگر سبب آزاد شدن انرژی شده و تخریب-هایی رخ می‌دهد. این آسیب‌ها می‌توانند موضعی بوده و یا به صورت کلی رخ دهند.



شکل ۱. تخریب پل در زلزله نورتریج (۱۹۹۴) در اثر برخورد

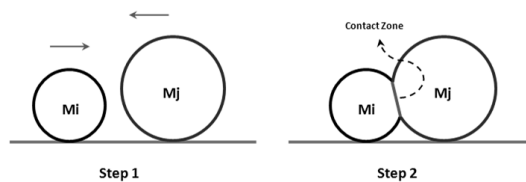
تقریبی را ارائه نمود. از آنجایی که غالب تحقیقات در مورد ضربه به مدل‌های یک درجه آزادی (SDOF) مربوط می‌شود، قابلیت بسط آن‌ها به مطالعات پل نیز وجود دارد. این به آن دلیل است که پل‌ها را می‌توان به صورت جرم متمرکز و سختی میله‌ای مدل نمود و مورد ارزیابی قرار داد. در این راستا، پاپادراکیس و موزاکیس (۱۹۹۱) با ساخت دو مدل بتنی و استفاده از میز لرزان، به بررسی پدیده ضربه و میزان آن در نیرو و انرژی پرداخته‌اند. یانکووسکی (۲۰۱۰)، کومودروموس و پولیکارپو (۲۰۱۰)، محمود و یانکووسکی (۲۰۱۱) و کول و داکال (۲۰۰۹) نیز با ارائه مدل‌های ریاضی یک یا چند درجه آزادی به بحث و بررسی در مورد پدیده

زلزله سال ۱۹۹۹ Chi Chi نیز باعث خرابی برخی پل‌ها به واسطه لغزش پایه‌ها و ضربه دو عرشه به یکدیگر شده بود. موارد متعدد دیگری نیز از تخریب پل‌ها به واسطه برخورد دو دهانه و نیروی ضربه حاصل از آن گزارش شده است که در حقیقت این نوع برخورد به تخریب دو ساختمان هم‌ارتفاع که سقف‌های آن‌ها تحت بارهای لرزه‌ای با یکدیگر برخورد می‌کنند، تشبیه می‌شود. آناگنوس‌توپولوس (۱۹۸۶) از اولین محققینی بود که در مورد بحث برخورد اجسام، مطالعه و ارائه رابطه کرد. یانکووسکی (۲۰۰۵) با انجام آزمایشی با مصالح بتنی و فولادی، به پیش‌بینی سرعت ضربه قبل و بعد از برخورد پرداخت و برای هر ماده‌ای رابطه‌ای

مطرح است دهانه‌های یک پل می‌باشد که به صورت متوالی و با یک درز انقطاع در کنار یکدیگر قرار می‌گیرند. فنر به جهت محاسبه نیرو و جابجایی جسم و میراگر برای نشان دادن میزان انرژی مستهلک شده می‌باشد. المان فاصله نیز که به صورت سری به این دو المان متصل است به جهت فعال کردن آن‌ها بعد از کاهش فاصله به سمت صفر می‌باشد. در این مطالعه، با معرفی المان و روابط ریاضی ارائه شده، یک رابطه جدید در محاسبه میزان میرایی پیشنهاد و معرفی شده و مقدار نیروی ضربه و انرژی آن محاسبه می‌گردد.

## ۲. ضربه

در مطالعات عددی، عموماً اثر ضربه با استفاده از دو جسم به جرم  $m_i$  و  $m_j$  و سرعت ضربه  $v_{imp}$  تعریف می‌شود که به سمت یکدیگر در حرکتند و پس از برخورد، به اندازه  $\delta$  در یکدیگر فرو رفته و از هم جدا می‌شوند (شکل ۲).



شکل ۲. برخورد شماتیک دو جسم با یکدیگر

همچنین، سرعت نهایی که شامل سرعت متعادل دو جسم مورد برخورد می‌باشد با رابطه زیر نشان داده می‌شود:

$$m_i \dot{\delta}_i + m_j \dot{\delta}_j = (m_i + m_j) V \quad (2)$$

### ۲-۱. مدل ضربه خطی

اولین مدل مورد استفاده در محاسبه ضربه، از دو جسم که با یک فنر به یکدیگر متصل می‌شوند، تشکیل شده است (شکل ۳). این المان، شرایط را برای یک ضربه الاستیک خطی بین دو جسم فراهم کرده و نیروی ضربه را محاسبه می‌کند.

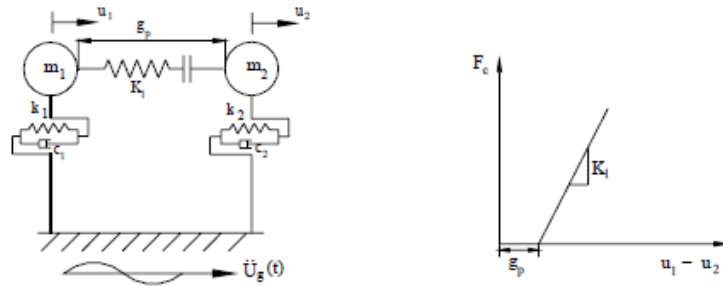
ضربه پرداخته‌اند. باروس و همکاران (۲۰۱۳) با معادل کردن دو جسم یک درجه آزادی به بررسی و مقایسه روابط ارائه شده در میزان نیروی برخورد پرداخته‌اند. نادرپور و همکاران (۲۰۱۴) با ارائه یک رابطه جدید، میزان ضریب میرایی یک میراگر متصل به فنر را در معادلات ساختمان‌های یک درجه آزادی ارائه کرده‌اند. ایشان در تحقیق دیگری، به مقایسه نتایج کلیه روابط ارائه شده در موضوع ضریب میرایی پرداخته و میزان انرژی جذب شده هر یک را در شرایط مشابه بارگذاری لرزه‌ای مقایسه نموده‌اند (نادرپور و همکاران، ۲۰۱۳). به همکاران (۲۰۰۸ و ۲۰۰۹) و لنکرانی (۲۰۰۶) با ارائه مدل‌های ریاضی، نشان داده‌اند که سرعت ضربه تأثیر بیشتری بر هر ضربه به نسبت جرم در معادلات ضربه دارند.

همانطور که ذکر شد، محققین برای مدل کردن برخورد و محاسبه نیروی ضربه از یک المان غیرواقعی ریاضی استفاده می‌کنند که شامل یک فنر، میراگر و فاصله بین دو جسم مورد بررسی می‌باشد. اما مسئله‌ای که در اینجا

این پدیده شامل دو سرعت متفاوت می‌باشد: سرعت قبل و بعد از برخورد. به این منظور، ضریب استرداد<sup>۱</sup> (CR) تعریف می‌شود که نسبتی بین سرعت قبل و بعد از ضربه می‌باشد و رفتار الاستیک یا پلاستیک ضربه را مشخص می‌کند:

$$0 < CR = \frac{v_{before}}{v_{after}} < 1 \quad (1)$$

1- Coefficient of Restitution, CR



شکل ۳. مدل ضربه خطی

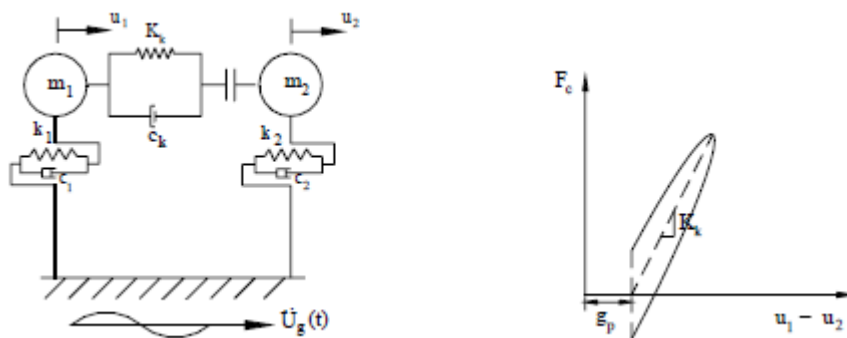
### ۲-۲. مدل ضربه ویسکوالاستیک خطی

از آنجایی که مدل ضربه خطی فقط قابلیت نشان دادن نیروی ضربه را در زمان‌های مختلف و تحت یک رابطه خطی دارد، محققین برای محاسبه انرژی جذب شده در هر ضربه، از یک میراگر به موازات فنر استفاده کرده‌اند (شکل ۴). این، مدل کلونین- ویت نامیده می‌شود و نیروی ضربه دو جسم به صورت زیر محاسبه می‌گردد:

$$F_l = k_l \cdot \delta(t) + c_{imp} \dot{\delta}(t) \quad (4)$$

$$F_l = k_l \cdot \delta(t) \quad (3)$$

که  $k_l$  سختی فنر مورد استفاده و  $\delta(t)$  میزان فشردگی فنر در زمان  $t$  است. رابطه (۳) یک رابطه خطی است که شامل سختی فنر و جابجایی جانبی می‌باشد. با داشتن این معادله، جابجایی جانبی پل تحت زمان و بر اثر زلزله به دست آمده و برخورد مدل می‌شود تا نیروی ضربه وارده به دست آید.



شکل ۴. مدل ضربه ویسکوالاستیک خطی

$$c_{imp} = 2 \cdot \zeta \sqrt{k_l \frac{m_i m_j}{m_i + m_j}} \quad (5)$$

در این رابطه، ضریب میرایی  $\zeta$ ، از رابطه (۶) محاسبه می‌شود:

$$\zeta = - \frac{\ln CR}{\sqrt{\pi^2 + (\ln CR)^2}} \quad (6)$$

در فرمول (۴)،  $c_{imp}$  مقدار میرایی میراگر و  $\dot{\delta}(t)$  رابطه سرعت بین دو جسم می‌باشد. بر پایه پیشنهاد آناگنوس توپولوس (۱۹۸۶)، میزان میرایی ویسکوز با استفاده از سختی فنر مورد استفاده و جرم اجسام مورد بررسی، به شرح زیر ارائه شده است:

(۸)

$$c_{imp} = 2.\zeta \sqrt{k_i \sqrt{\delta(t)} \frac{m_i m_j}{m_i + m_j}}$$

که در این معادله:

$$\zeta = \frac{9\sqrt{5}}{2} \frac{1 - CR^2}{CR(CR(9\pi - 16) + 16)} \quad (۹)$$

محمود و یانکوسکی (۲۰۱۱) با استفاده از رابطه (۸) و با تغییر در سرعت ضربه، رابطه جدیدی را برای ضریب میرایی پیشنهاد داده‌اند که این رابطه نیز بر اساس ضریب استرداد تعریف می‌شود:

$$\zeta = \frac{\sqrt{5}(1 - CR^2)}{2.\pi.CR} \quad (۱۰)$$

همانگونه که در معادلات (۶)، (۹) و (۱۰) دیده می‌شود، تعیین میزان عددی ضریب میرایی بر اساس انتخاب ضریب استرداد (CR) می‌باشد که هر یک از این سه معادله و میزان ضریب میرایی آن‌ها در شکل ۵ رسم شده است.

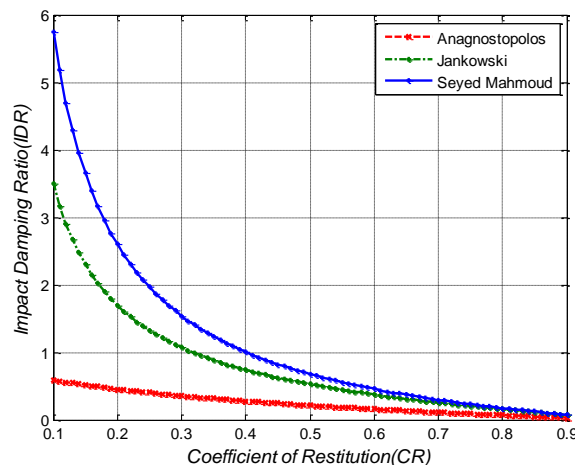
با استفاده از رابطه (۵)، علاوه بر نیروی ضربه، میزان انرژی جذب شده برخورد که سطح زیر منحنی نمودار  $F_I - \delta(t)$  می‌باشد نیز محاسبه می‌گردد. اما از آنجایی که در نمودار اشاره شده، به علت فعال بودن میراگر پس از ضربه، مقدار منفی نیز دیده می‌شود، محققین روابط جدیدی را بر اساس نیروی ضربه و میزان میرایی ارائه کرده‌اند که به بررسی آن‌ها پرداخته می‌شود.

### ۲-۳. مدل ضربه ویسکوالاستیک غیرخطی

یانکوسکی (۲۰۰۵) برای بهبود رفتار این المان و همچنین از بین بردن قسمت منفی انرژی جذب شده، فرض کرد که قسمت اعظم انرژی جذب شده در قسمت اول برخورد و زمانی که سرعت مثبت است رخ می‌دهد. وی از جذب انرژی در سرعت منفی صرفنظر کرده و با ارائه رابطه جدیدی، میراگر را پس از ضربه غیرفعال در نظر گرفته است:

$$F_I = k_h.\delta(t)^{1.5} + c_{imp} \delta(t) \quad (۷)$$

با استفاده از رابطه (۷)، معادله  $c_{imp}$  به شرح زیر تغییر می‌کند:



شکل ۵. میزان ضریب میرایی در مدل‌های مختلف

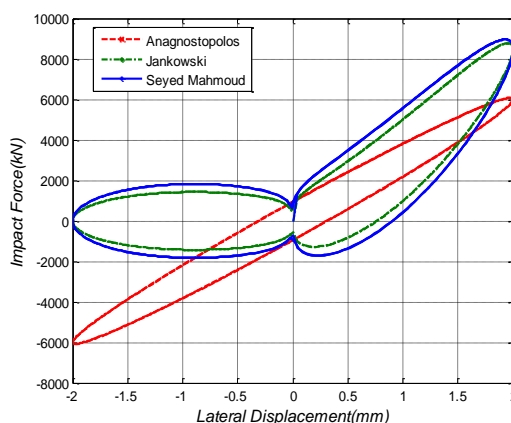
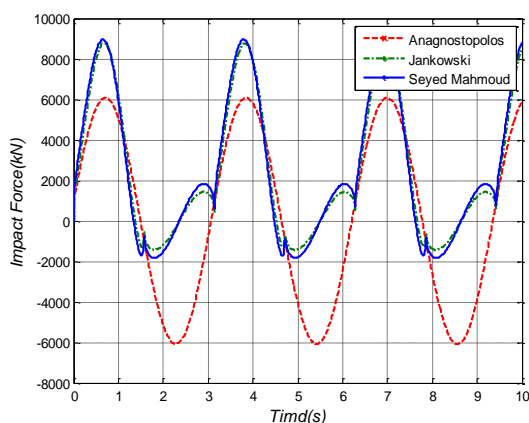
مستهلک شده، با استفاده از منحنی هیستریسیس محاسبه می‌شود (شکل ۶).

همانگونه که در شکل ۶ دیده می‌شود، میزان نیروی ضربه بر اساس زمان در روابط محمود و یانکوسکی

همانگونه که در شکل ۵ دیده می‌شود، فرم کلی هر سه مدل یکسان و میزان عددی ضریب میرایی در فاصله صفر تا ۱ ضریب استرداد متفاوت است. بر این اساس و بر پایه روابط (۴) و (۷) میزان نیروی ضربه و انرژی

می‌باشد به‌دست آورد. هر سه مدل، در منحنی‌های هیسترسیس خود، انرژی و ضربه‌های منفی را نشان می‌دهند که این موضوع نمی‌تواند از نظر ریاضی و فیزیکی صحت داشته باشد.

(۲۰۱۱) بیشتر از آناگنوس‌توپولوس (۱۹۸۶) بوده و شکل متفاوتی در نوع و مقدار ضربه از خود نشان داده است. در شکل مربوط به نیروی ضربه-جابجایی نیز از منحنی‌های هیسترسیس رسم شده، می‌توان نیروی جذب انرژی در حین ضربه را که مساحت داخلی آن‌ها



شکل ۶. نمودار نیرو- زمان و نیرو- تغییر مکان در مدل‌های مختلف

با تعادل رابطه (۱۱) و انرژی جنبشی حاصل از ضربه خواهیم داشت:

$$\int f_D d\delta = \int_0^{2\pi/w} (c_k \dot{\delta}) \dot{\delta} dt = 0.5m\dot{\delta}_{final}^2 \quad (14)$$

که در این رابطه  $\dot{\delta}_{final}$  سرعت نهایی ضربه می‌باشد. بر این اساس و با استفاده از روابط (۱۳) و (۱۴)، میزان جابجایی بیشینه عرشه پل در حین زلزله برابر خواهد بود با:

$$\delta_{max} = \sqrt{\frac{m}{4\pi\zeta k}} \dot{\delta}_{final} \quad (15)$$

بر این اساس، میزان انرژی پتانسیل در برابر انرژی جنبشی حین ضربه عبارت خواهد بود از:

$$2\pi\zeta k\delta^2 + 0.5m\dot{\delta}^2 = 0.5m\dot{\delta}_{final}^2 \quad (16)$$

با ایجاد تعادل در رابطه (۱۶) خواهیم داشت:

$$0.5m\dot{\delta}^2 = 0.5m\dot{\delta}_{final}^2 - 2\pi\zeta k\delta^2 \quad (17)$$

با جایگذاری معادله (۱۵) در معادله (۱۷)، سرعت عرشه پل در حین حرکت عبارت خواهد بود از:

بدین سبب و به جهت محاسبه دقیق ضربه و میزان نیروی ضربه در حین برخورد بین دو عرشه پل، و همچنین میزان انرژی جذب شده در هر ضربه، رابطه جدیدی بر اساس ضربه استرداد و تعادل انرژی جذب شده با انرژی فیزیکی، بیان شده توسط گلداسمیت (۱۹۶۰) ارائه شده و در یک سیکل محاسباتی، دقت آن بررسی می‌گردد. بر این اساس، میزان انرژی بر اساس رابطه میرایی و با استفاده از رابطه (۱۰) چنین است:

$$\Delta E = \int f_D d\delta = \int_0^{2\pi/w} (c_k \dot{\delta}) \dot{\delta} dt \quad (11)$$

با تغییر معادله سرعت در مشتق زمان، تغییر مکان جهت محاسبه انتگرال انرژی ارائه می‌شود:

$$\Delta E = \int_0^{\delta_{max}} c_k \dot{\delta} d\delta \quad (12)$$

از طرف دیگر، و بر اساس میزان انرژی حاصل از بارگذاری هارمونیک، خواهیم داشت:

$$\Delta E = 2\pi\zeta \frac{w}{w_n} k\delta^2 \quad (13)$$

در این معادله، دو سرعت در حالت‌های رفت و برگشت محاسبه می‌گردد. به بیان بهتر، سرعت قبل و بعد از ضربه با استفاده از رابطه (۱۹) محاسبه می‌گردد:

$$\dot{\delta} = \sqrt{\dot{\delta}_{final}^2 - \frac{4k\xi\pi\delta^2}{m}} \quad (18)$$

$$\dot{\delta} = -\sqrt{\dot{\delta}_{final}^2 - \frac{4k\xi\pi\delta^2}{m}} \quad \text{for } \dot{\delta} < 0$$

$$\dot{\delta} = \sqrt{\dot{\delta}_{final}^2 - \frac{4k\xi\pi\delta^2}{m}} + \frac{(\dot{\delta}_0 - |\dot{\delta}_{final}|)(\delta_{max} - \delta)}{\delta_{max}} \quad \text{for } \dot{\delta} > 0 \quad (19)$$

$$\Delta E = 2\zeta\sqrt{k.m} \int \dot{\delta} d\delta \quad (20)$$

در این حالت و با استفاده از رابطه سرعت در زمان رفت و در حالی که سرعت مثبت می‌باشد، انرژی برابر خواهد بود با:

با قرار دادن رابطه (۱۹) در رابطه (۲۰) خواهیم داشت:

$$\Delta E = 2\zeta\sqrt{k.m} \left( \int \sqrt{\dot{\delta}_{final}^2 - \frac{4\zeta\pi k\delta^2}{m}} d\delta + \frac{(\dot{\delta}_0 - |\dot{\delta}_{final}|)}{\delta_{max}} \int_0^{\delta_{max}} (\delta_{max} - \delta) d\delta \right) \quad (21)$$

با استفاده از رابطه (۲۱) داریم:

$$\Delta E = 2\zeta\sqrt{k.m} \left( \int_0^{\delta_{max}} \sqrt{\frac{4\zeta\pi k\delta_{max}^2}{m} - \frac{4\zeta\pi k\delta^2}{m}} d\delta \right) + \frac{\dot{\delta}_0 - |\dot{\delta}_{final}|}{2} \cdot \delta_{max} \quad (22)$$

$$\Delta E = 2\zeta\sqrt{k.m} \left[ \left( \sqrt{\frac{4\zeta\pi k}{m}} \int_0^{\delta_{max}} \sqrt{\delta_{max}^2 - \delta^2} d\delta \right) + \frac{\dot{\delta}_0 - |\dot{\delta}_{final}|}{2} \cdot \delta_{max} \right] \quad (23)$$

$$\Delta E = 4k\sqrt{\pi}\zeta^{1.5} \int_0^{\delta_{max}} \sqrt{\delta_{max}^2 - \delta^2} d\delta + 2\zeta\sqrt{k.m} \frac{\dot{\delta}_0 - |\dot{\delta}_{final}|}{2} \cdot \delta_{max} \quad (24)$$

پس از انتگرال‌گیری از معادله تغییر مکان، معادله انرژی برابر خواهد بود با:

$$\Delta E = 4k\sqrt{\pi}\zeta^{1.5} (0.25\pi\delta_{max}^2) + 2\zeta\sqrt{k.m} \frac{\dot{\delta}_0 - |\dot{\delta}_{final}|}{2} \cdot \delta_{max} \quad (25)$$

با محاسبه انرژی ذخیره شده، انرژی حاصل از قانون گلداسمیت (۱۹۶۰) با این انرژی مقایسه می‌شود:

$$\frac{1}{2} \frac{m_1 m_2}{m_1 + m_2} (1 - CR^2) (\dot{\delta}_{imp})^2 = (4k\sqrt{\pi}\zeta^{1.5} (0.25\pi\delta_{max}^2)) + (2\zeta\sqrt{k.m} \frac{\dot{\delta}_0 - |\dot{\delta}_{final}|}{2} \cdot \sqrt{\frac{m}{4\pi\zeta k}} \cdot \dot{\delta}_{final}) \quad (26)$$

معادله (۲۶) به صورت زیر ساده می‌شود:

$$\frac{1}{2} \frac{m_1 m_2}{m_1 + m_2} (1 - CR^2) (\dot{\delta}_{imp})^2 = (4k\sqrt{\pi}\zeta^{1.5} (0.25\pi \frac{m}{4\pi\zeta k} \cdot \dot{\delta}_{final}^2)) + (\zeta\sqrt{k.m} (\dot{\delta}_0 - |\dot{\delta}_{final}|) \sqrt{\frac{m}{4\pi\zeta k}} \cdot \dot{\delta}_{final}) \quad (27)$$

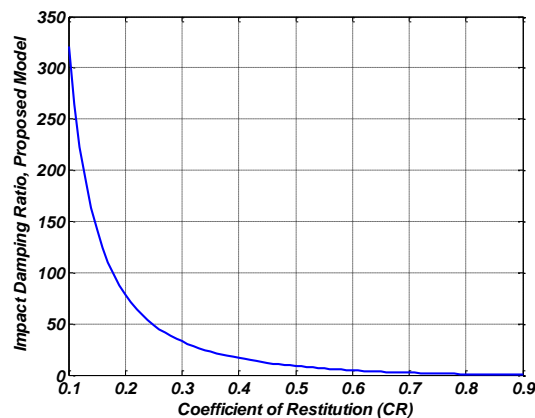
نهایتاً، تعادل این دو رابطه در معادله (۲۸) محاسبه می‌شود.

$$\frac{1}{2}(1 - CR^2)(\dot{\delta}_{imp})^2 = 0.25\sqrt{\pi}\zeta^{0.5}\dot{\delta}_{final}^2 + \zeta^{0.5}\frac{\sqrt{\pi}}{\pi}(\dot{\delta}_0 - |\dot{\delta}_{final}|)\dot{\delta}_{final} \quad (28)$$

در انتها، ضریب میرایی بر اساس ضریب استرداد و به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$\zeta = \left( \frac{(1 - CR^2)}{CR(\sqrt{\pi}(0.5CR + \frac{1}{\pi}) - CR)} \right)^2 \quad (29)$$

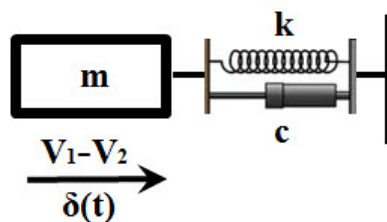
جذب انرژی و با استفاده از رابطه (۲۹) در شکل ۷ رسم می‌شود.



شکل ۷. نمودار میزان ضریب میرایی با استفاده از رابطه (۲۹)

جرم عرشه پل ۱۰۰ تن فرض شده و به جهت مدل کردن ضربه، یک المان ضربه شامل یک فنر و میراگر بین عرشه پل و دیواره سکو در نظر گرفته می‌شود (شکل ۸).

میزان ضریب میرایی از ۳۲۰ تا صفر در مقدار ۰/۱ تا ۰/۹ ضریب استرداد محاسبه شده است. به منظور معادل سازی یک ضربه، عرشه یک پل با یک پایه به صورت یک سیستم یک درجه آزادی تعریف می‌گردد که به فاصله ۴ میلی‌متر از دیواره سکوی پل قرار گرفته است.



شکل ۸ المان مورد استفاده در مدل دینامیک ضربه

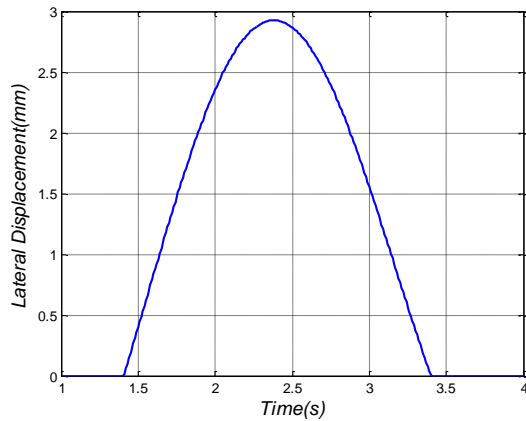
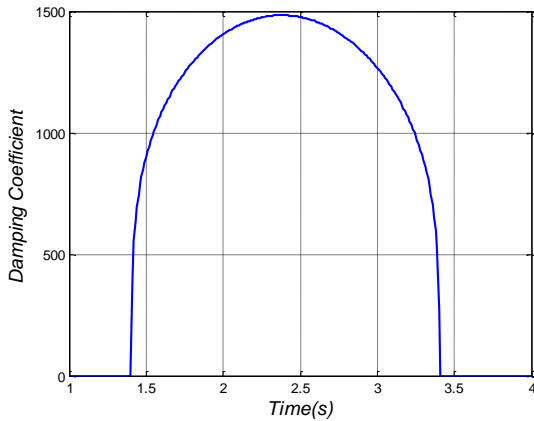
اولین برخورد عرشه به دیواره سکو در زمان ۱/۴۵ و با سرعت ۲/۱۰۳ متر بر ثانیه رخ می‌دهد. زمان برخورد تا

ضریب استرداد ۰/۴ برای این مدل و میزان سختی ۳۴۰۰ کیلو نیوتن بر میلی‌متر برای فنر در نظر گرفته می‌شود. عرشه پل تحت بارگذاری لرزه‌ای قرار می‌گیرد.



فنر تا ۲/۸۵ میلی‌متر فشرده می‌گردد.

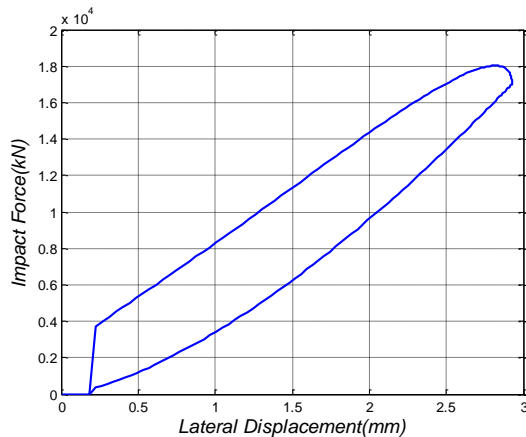
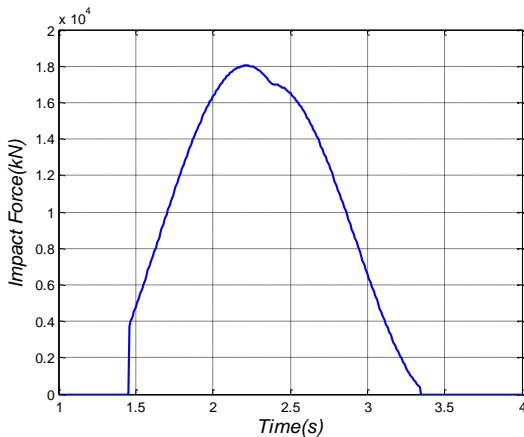
جدایی عرشه از دیواره سکو ۲ ثانیه به طول می‌انجامد و



شکل ۹. میزان تغییر مکان فنر و میرایی میراگر المان

انجام گرفته، میزان نیروی ضربه محاسبه و بر اساس زمان و تغییر مکان جانبی رسم می‌گردد (شکل ۱۰).

با استفاده از ضریب استرداد مذکور، میزان میرایی با استفاده از رابطه (۲۹) در شکل ۹ رسم و مورد استفاده قرار می‌گیرد. بر طبق اطلاعات داده شده و محاسبه

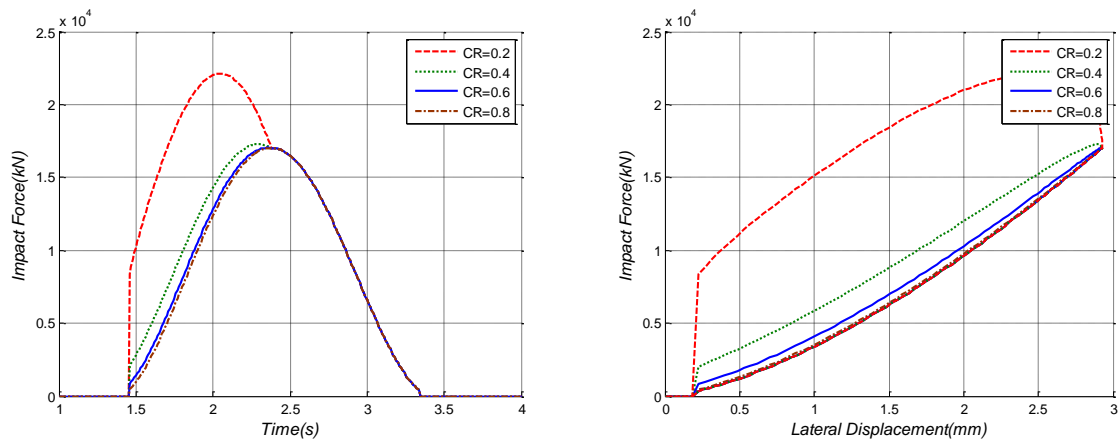


شکل ۱۰. نمودار ضربه بر اساس زمان و تغییر مکان

ضریب میرایی، نشان می‌دهد که با افزایش ضریب استرداد، میزان نیروی ضربه و انرژی جذب شده کاهش می‌یابد. البته میزان این کاهش ضریب از صفر تا ۰/۴ قابل توجه بوده و از این مقدار تا ضریب استرداد ۰/۹ با شیب کندی پیش رفته است.

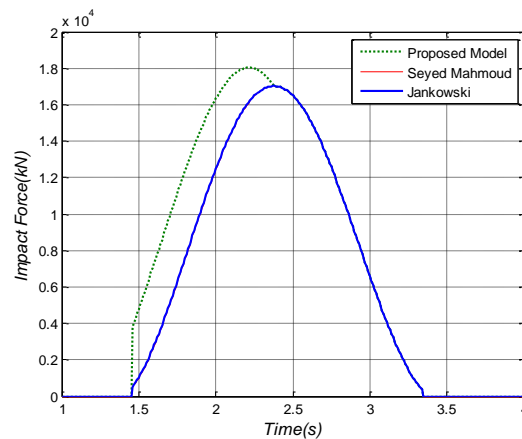
بیشینه نیروی ضربه در زمان و تغییر مکان در شکل ۱۰ نشان داده شده است. این مقدار ۱۸۰۲۴ کیلونیوتن بوده که در ثانیه ۲/۲۸ رخ داده است. میزان انرژی جذب شده که مساحت داخلی منحنی هیسترسیس رسم شده می‌باشد، نیز ۱۱۴۸۹ کیلونیوتن میلی‌متر می‌باشد.

بررسی مدل ضربه با استفاده از ضرایب مختلف استرداد نتایج گوناگونی را می‌دهد. شکل ۱۱، با توجه به رابطه



شکل ۱۱. نمودار ضربه بر اساس ضریب استردادهای متفاوت

با توجه به تحلیل انجام شده، سه رابطه محمود، یانکووسکی و مدل ارائه شده در این مقاله مقایسه شده و نیروی ضربه آن‌ها در شکل ۱۲ رسم گشته است.



شکل ۱۲. مقایسه نمودار نیرو- زمان در مدل‌های محمود، یانکووسکی و مدل جدید

### زلزله Kobe

شهر Kobe ژاپن، در ۱۷ ژانویه ۱۹۹۵ و در ساعت ۲۰ شب با بزرگی ۶/۸ ریشتر به شدت مورد لرزش واقع شد و آسیب‌های فراوان جانی و مالی دید. تعداد ۶۵۰۰ کشته در این زلزله و ۵ میلیون دلار خسارت مالی حاصل این زلزله بوده است. عمق کانون این زلزله ۱۶ کیلومتر ثبت شده و بیشینه شتاب آن ۰/۷۱ می‌باشد.

### زلزله Parkfield

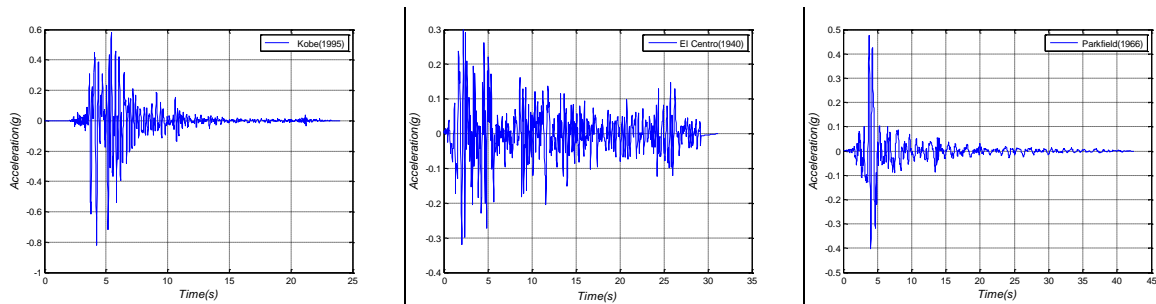
در سال ۱۹۶۶، زلزله Parkfield به بزرگی ۶/۱۹ ریشتر و با بیشینه شتاب لرزه‌ای ۰/۴۷۶ رخ داده است. این زلزله حدود ۴۰ ثانیه زمان برده است و با یک لرزش

برای تحلیل ضربه پل تحت بارگذاری لرزه‌ای، سه رکورد زلزله El Centro، Kobe و Parkfield انتخاب می‌شوند. مشخصات این سه زمین لرزه به طور اختصار توضیح داده شده است.

### زلزله El Centro

این زلزله، در ۱۸ می ۱۹۴۰ و با بزرگی ۶/۹ در مقیاس امواج درونی زمین (ریشتر) رخ داده است. رکورد این زلزله در ایستگاه "امپریال ولی" ثبت و عمق آن ۱۶ کیلومتر بوده است. زمان زمین لرزه El Centro، ۳۲ ثانیه بوده و بالغ بر ۶ میلیون دلار خسارت بر جای گذاشته است.

ناگهانی شدید در ثانیه چهارم رویه رو بوده است. این رکورد زلزله‌های فوق در شکل ۱۳ نشان داده شده زلزله در عمق ۱۸ کیلومتری سطح زمین رخ داده است. است.

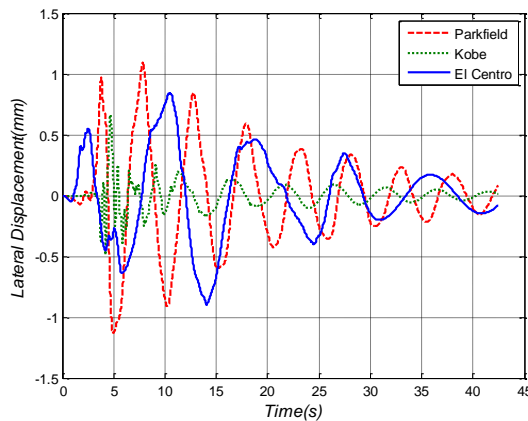


شکل ۱۳. رکورد زلزله های مورد استفاده در این پژوهش

و  $0.76$  میلی‌متر تحت زلزله‌های El Centro, Parkfield و Kobe رخ داده است. در حقیقت، هر سه رکورد سبب برخورد عرشه پل با سکوی نگهدارنده پل شده است.

یک سیستم یک درجه آزادی با فاصله  $0.2$  میلی‌متر به عنوان یک عرشه پل، تحت سه رکورد زلزله ذکر شده قرار گرفته و نمودار تغییر مکان جانبی آن‌ها رسم می‌شود (شکل ۱۴). یک فنر و یک میراگر مطابق شکل ۸ جهت ضربه مدل شده است.

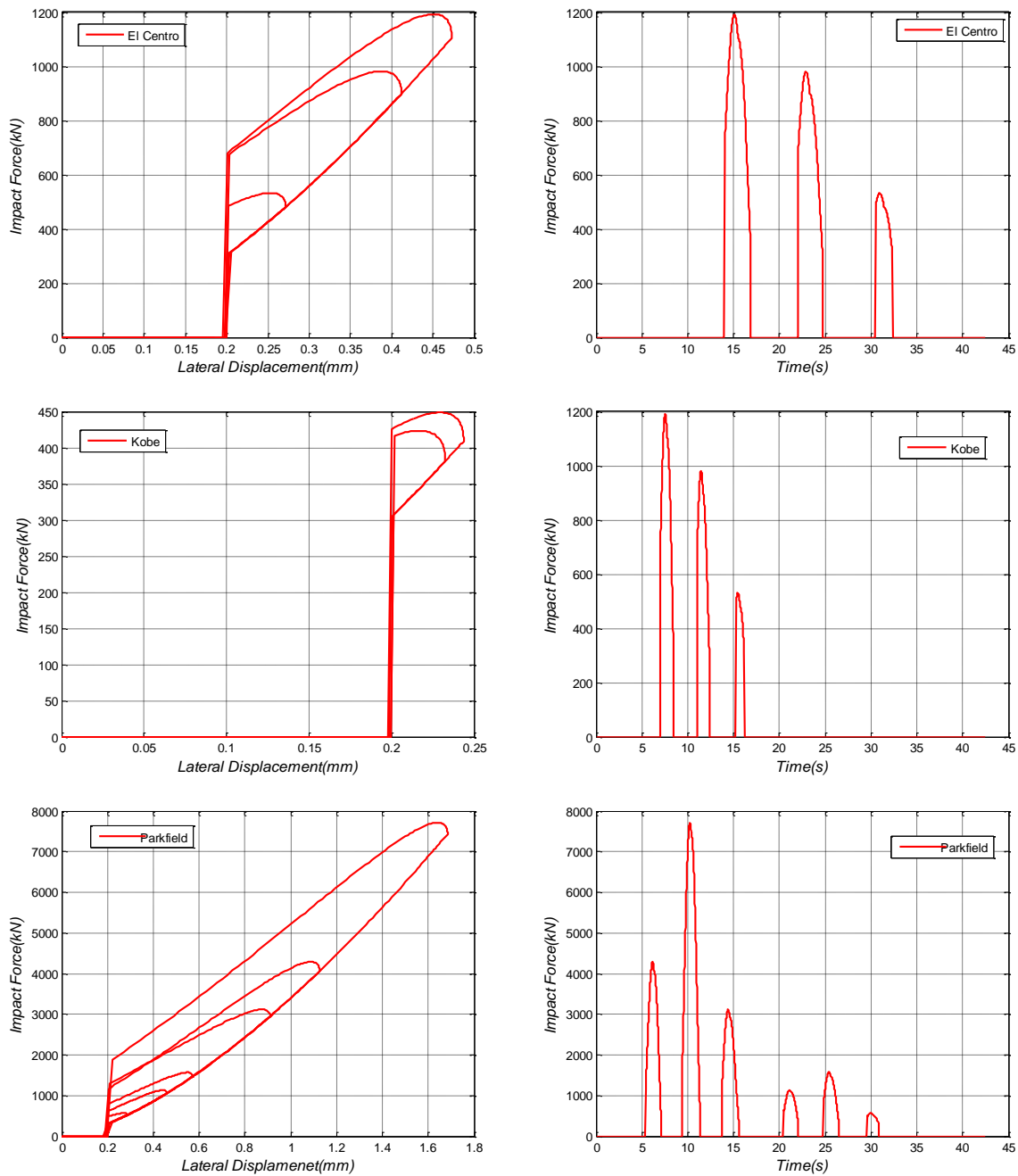
بیشینه جابجایی  $1/1$ ،  $0.87$



شکل ۱۴. جابجایی جانبی مدل یک درجه آزادی تحت سه رکورد زلزله

بر طبق رابطه (۷)، با افزایش توان معادله تغییر مکان و تأثیر مستقیم سختی فنر در آن، انتظار می‌رود بیشینه ضربه در این زمان به سکوی پل وارد شده و به تبع آن، بیشینه انرژی نیز در هنگام این ضربه مستهلک گردد. نمودارهای رسم شده از نیرو- زمان و نیرو- جابجایی در شکل ۱۵، مطالب ذکر شده را تأیید می‌کنند.

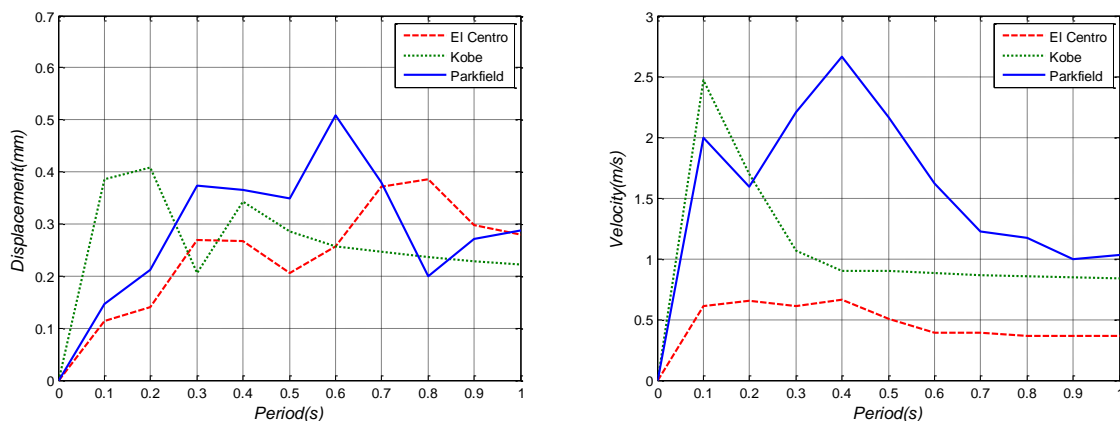
همانگونه که در شکل ۱۴ دیده می‌شود، رکوردهای زلزله Kobe و Parkfield بین زمان‌های ۵ تا ۱۰ ثانیه و زلزله El Centro بعد از ثانیه دهم دچار بیشترین جابجایی جانبی شده‌اند و انتظار بیشترین میزان ضربه و استهلاک انرژی در این زمان‌ها بیشتر است. این بدان دلیل است که عرشه پل با طی بیشترین مسافت ممکن دارای بیشینه انرژی پتانسیل جهت آزاد سازی می‌باشد و



شکل ۱۵. مقایسه نمودار نیرو- زمان و نیرو- جابجایی در سه رکورد زلزله

بررسی و تحلیل هر سه رکورد زلزله در عرشه پل مذکور، با استفاده از مدل دینامیک یک درجه آزادی و تحت دوره‌های تناوب صفر تا ۱ در بازه‌های زمانی ۰/۱ ثانیه انجام شده است. بیشینه سرعت و تغییر مکان جانبی هر کدام به تفکیک در زمان‌های ذکر شده در شکل ۱۶ رسم شده است.

در شکل ۱۵، زلزله Parkfield با شش ضربه در حدود ۲۵ ثانیه، بیشترین تعداد برخورد را از خود بروز داده است. بیشینه میزان نیروی ضربه ۷۸۴۵ کیلونیوتن و در دومین ضربه که در دهمین ثانیه رخ داده، نشان داده شده است. در دو زلزله دیگر نیز هر یک سه برخورد با ۱۲۰ کیلونیوتن ثبت شده است. منحنی‌های هیسترسیس هر برخورد نیز تحت بارهای لرزه‌ای مذکور رسم شده است.



شکل ۱۶. مقایسه نمودار سرعت و جابجایی در زمان‌های تناوب مختلف تحت رکوردهای مختلف

تغییر مکان‌های ناهمگون آن‌ها وارد می‌شود. میزان نیروی وارده از هر ضربه و انرژی مستهلک شده آن مورد نظر محققین می‌باشد. برای محاسبه این مقدار، یک المان مجازی شامل فنر و میراگر که به صورت موازی با یکدیگر قرار گرفته‌اند در نظر گرفته می‌شود. روابط متعددی برای محاسبه نیرو و میزان استهلاک انرژی نیز ارائه شده است. در این پژوهش، با استفاده از روابط حرکت و بر اساس ضریب استرداد، که رابطه مستقیم با سرعت قبل و بعد از برخورد دارد، رابطه جدیدی ارائه شده است و میزان انرژی و نیروی یک مدل دینامیک پل نیز با استفاده از سه رکورد زلزله محاسبه و مقایسه شده است.

در هر سه رکورد زلزله، بیشینه سرعت در ابتدا روندی صعودی را از خود نشان داده و سپس به حالت نزولی رسیده است. بیشترین سرعت به میزان  $0.71$ ،  $0.26$  و  $0.4$  در زمان تناوب  $0.1$ ،  $0.4$  و  $0.1$  در رکوردهای لرزه‌ای El Centro، Parkfield و Kobe رخ داده است. همچنین، بررسی روند جابجایی تحت زمان‌های تناوب متفاوت نشان داده که رکورد Parkfield، Kobe و El Centro با  $0.5$ ،  $0.42$  و  $0.41$  میلی‌متر بیشترین جابجایی را از خود بروز داده‌اند.

### ۳. نتیجه‌گیری

بررسی محاسبات ضربه در هر زلزله نشان داده که صدمات زیادی به ساختمان‌ها و پل‌ها به سبب

### ۴. مراجع

- Anagnostopoulis, S. A. 1986. "Pounding of building in series during earthquakes". *Earthq. Eng. Struct. Dynam.* 16(3): 443-456.
- Barros, R. C., Khatami, S. M., Naderpour, H. and Mortezaei, A. 2013. "Influence of seismic pounding on RC building with and without base isolation system subjected to near-fault ground motion". *Int. J. Rehab. Civil Eng.* 1(1): 39-52.
- Cole, G. L. and Dhakal, R. P. 2009. "The Effect of Diaphragm Wave Propagation on the Analysis of Pounding Structures". *Proc. 2<sup>nd</sup> Int. Conf. Comp. Method Struct. Dynam. Earthq. Eng. (COMPADYN)*, Paper CD 200, Rhodes, Greece.
- Goldsmith, W. 1960. "Impact: The Theory and Physical Behavior of Colliding Solids". 1<sup>st</sup> Edition, Edward Arnold, London, U.K.
- Jankowski, R. 2005. "Non-linear viscoelastic modeling of earthquake-induced structural pounding", *Earthq. Eng. Struct. Dynam.* 34: 595-611.
- Jankowski, R. 2010. "Experimental study on earthquake-induced pounding between structural elements made of different building materials". *Earthq. Eng. Struct. Dynam.* 39(3): 343-354.

- Komodromos, P. and Polycarpou, P. 2010. "On the Numerical Simulation of Impact for the Investigation of Earthquake-Induced Pounding of Building". Tenth Int. Conf. Comp. Struct. Technol., Civil-Comp Press, Stirlingshire, Scotland.
- Lankarani, S. 2006. "A Hertz contact model with non-linear damping for pounding simulation". Earthq. Eng. Struct. Dynam. 35: 811-828.
- Mahmoud, S. and Jankowski, R. 2011. "Modified linear viscoelastic model of earthquake-induced structural pounding". Iranian J. Sci. Technol. 35(C1): 51-62
- Naderpour, H., Barros, R. C. and Khatami, S. M. 2013. "State-of-the-Art: Building Pounding, Link Elements and the Evaluation of Impact Forces and Energy Dissipation". In: Topping, B. H. V. and Iványi, P. (Eds.), Proc. 14<sup>th</sup> Int. Conf. Civil, Struct. Environ. Eng. Comp., Civil-Comp Press, Stirlingshire, UK, doi: 10.4203/ccp.102.84
- Naderpour, H. Khatami, S. M. and Barros, R. C. 2014. "A new model for calculating the impact force and the energy dissipation based on CR-factor and impact velocity". Int. J. Sci. Technol., Sci. Iran. 22(1): 45-62.
- Papadrakakis, M. and Mouzakis, H. 1991. "A Lagrange multiplier solution method for pounding of building during earthquakes". J. Earthq. Eng. Struct. Dynam. 20: 981-998.
- Ye, K., Li, L. and Zhu, H. P. 2008. "A note on the Hertz contact model with nonlinear damping for pounding simulation". Earthq. Eng. and Struct. Dynam. 38(9): 1135-1142.
- Ye, K., Li, L. and Zhu, H. P. 2009. "A modified Kelvin impact model for pounding simulation of base-isolated building with adjacent structures". Earthq. Eng. Eng. Vib. 8: 433-446.