

محاسبه فاصله ایمن درز انقطاع در سازه‌های با مشخصات متفاوت با استفاده از هوش مصنوعی

یعقوب ابراهیمی، دانشجوی دکترای سازه، گروه مهندسی عمران، واحد سمنان، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد سمنان، دانشگاه آزاد اسلامی، سمنان، ایران
علیرضا مرتضایی*، دانشیار، مرکز تحقیقات ژئوتکنیک لرزه‌ای و بتن توانمند، گروه مهندسی عمران، واحد سمنان، دانشگاه آزاد اسلامی، سمنان، ایران
علی همتی، استادیار، مرکز تحقیقات ژئوتکنیک لرزه‌ای و بتن توانمند، گروه مهندسی عمران، واحد سمنان، دانشگاه آزاد اسلامی، سمنان، ایران
محمود نیکخواه شه‌میرزادی، استادیار، مرکز تحقیقات ژئوتکنیک لرزه‌ای و بتن توانمند، گروه مهندسی عمران، واحد سمنان، دانشگاه آزاد اسلامی، سمنان، ایران

Email: a.mortezaei@semnaniau.ac.ir

دریافت: ۱۳۹۹/۰۵/۱۹ - پذیرش: ۱۳۹۹/۰۸/۱۳

چکیده

پل‌ها از اهمیت به‌سزایی در طراحی محورهای عبور و مرور شهری برخوردار می‌باشند. از آنجایی که دهانه پل‌ها به‌صورت منفرد و عموماً یک تیر گیردار طراحی و اجرا می‌گردند، 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 به‌وجود می‌آید. به این منظور، هر پل به‌صورت یک سازه یک درجه آزادی مدل شده و جرم پل و سختی آن به‌صورت یک سیستم دینامیک در نظر گرفته می‌شود. با استفاده از زمان تناوب و ارتفاع دو پل کنار هم و زلزله مورد تقاضا، فاصله ایمن برای جلوگیری از برخورد دو دهانه پل با استفاده از شبکه عصبی پیشنهاد می‌گردد. برای اینکار، کلیه پارامترهای مؤثر زلزله و پل (بیشینه شتاب، سرعت و جابجایی، زمان تناوب و ارتفاع پل) در نظر گرفته شده و تحت یک روند درختی و با استفاده از شبکه عصبی پیشنهاد می‌گردد. در صورتی که فاصله عرشه پل‌ها رعایت نگردد، ضربه بین دو عرشه رخ داده و باعث ایجاد تخریب می‌گردد. به‌طور مثال و با استفاده از روابط پیشنهادی در این مقاله، اگر عرشه پلی با زمان تناوب 0.1 ثانیه در کنار عرشه‌ای با زمان تناوب 0.15 ، 0.25 و یا 0.35 ثانیه و تحت زلزله با بیشینه شتاب 500 سانتی‌متر بر مجذور ثانیه قرار گیرد، نیاز به فاصله ایمنی در حدود $4/1$ ، $4/6$ و 5 سانتی‌متر دارد تا از برخورد و تخریب عرشه پل‌ها جلوگیری شود. واژه‌های کلیدی: ضربه پل‌های مجاور، فاصله ایمن، زمان تناوب، زلزله

۱. مقدمه

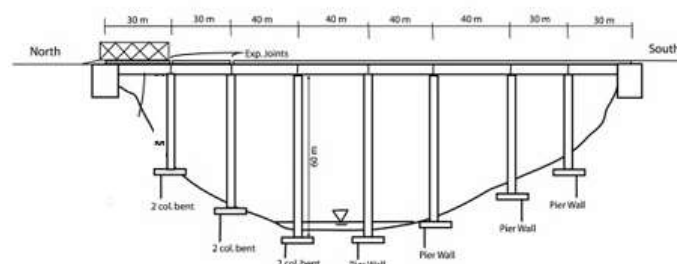
دهانه از پل، از میزان درز انقطاع موجود افزایش یابد، آنگاه ضربه دو دهانه به یکدیگر سبب آزاد شدن میزان انرژی شده و تخریب‌هایی رخ می‌دهد. این آسیب‌ها می‌تواند موضعی بوده و یا به صورت کلی رخ دهد (قاسمی و همکاران، ۱۹۹۶).

شکل ۱، تخریب موضعی یک پل به دلیل اثرات جابجایی جانبی و برخورد رخ داده و دیگری به دلیل نامعینی سازه، تخریب کلی پل را در پی داشته است. بر اساس موضوع ضربه، محقیق متعددی با ارائه مدل‌های ریاضیاتی، به موضوع ضربه پرداخته‌اند. اما بهترین راهکار را در ایجاد فاصله ایمن بین دو قسمت از پل دانسته‌اند. برای این منظور، محققین هر دهانه از پل را یک سیستم دینامیک یک درجه آزادی با جرم متمرکز و سختی مشخص در نظر گرفته که عموماً به علت شباهت ساختاری دارای زمان تناوب یکسان می‌باشند. اما در برخی پل‌ها، به علت ساختار نامنظم و یا ایجاد قوس، فاصله دهانه‌ها و ارتفاع پایه‌ها متفاوت بوده و طبیعتاً جرم و سختی دهانه‌ها متفاوت شده و پیرو آن زمان تناوب هر دهانه با دهانه مجاور فرق خواهد داشت (شکل ۲) (20civil.ir).

پل، به عنوان عنصر اتصال مابین دو منطقه که در کدهای ارتفاعی یکسان و موقعیت مکانی متفاوت قرار دارند، احداث شده که یکی از عناصر حیاتی در سیستم شهری بوده و عبور و مرور و وسائل نقلیه روی آن جهت عبور از روی رودخانه‌ها و یا به جهت کاهش ترافیک شهری از اهمیت بسیاری برخوردار است. پایداری و ایستادگی پل در زمان‌های مختلف، بخصوص در زمان خطر و پیامدهای اجتماعی و طبیعی، مهم و شایان توجه بسیاری می‌باشد. حفظ و پایداری پل‌ها، به جهت خدمت‌رسانی و جلوگیری از روند حرکتی معمول، بسیار حائز اهمیت می‌باشد. بنابراین، اثرات تخریبی بارهای لرزه‌ای، همچون زلزله، می‌تواند مشکلات فراوانی در زمینه سرویس‌دهی و خدمت‌رسانی ایجاد نماید. حرکت خودروها، بار باد و یا اثرات لرزه‌ای زلزله باعث ایجاد ضربه شده که به عنوان یکی از عوامل مهم در تخریب پل‌ها به واسطه رفتار ناهمگون بارهای وارده و یا تفاوت در ساختار پل‌ها در نظر گرفته شده و یا سیستم سازه‌ای با ناپایداری مواجه می‌شود. وقتی در حین زلزله، میزان جابجایی جانبی هر



شکل ۱. تخریب پل در زلزله‌های کوبه (۱۹۸۵) و نورتریج (۱۹۹۴) (قاسمی و همکاران، ۱۹۹۶)



شکل ۲. شماتیک طرح پل با مشخصات سازه‌ای متفاوت (20civil.ir)

منظور، محققین بسیاری به موضوع ضربه پرداخته و روابط گوناگونی را ارائه کرده‌اند. برای موضوع ضربه، آنانگوستوپولوس (۱۹۸۶)، یانکووسکی (۲۰۰۵)، کومودروموس و پولیکارپو (۲۰۱۰)، یه و ژو (۲۰۱۸)، خاتمی و همکاران (۲۰۱۹)، لقمانی و همکاران (۲۰۲۰) و مرتضایی (۱۳۹۴) با ارائه روابطی، میزان میرایی را در حین ضربه محاسبه کرده و پیشنهاد روابطی را به این جهت داده‌اند تا میزان واقعی نیروی ضربه در هر برخورد محاسبه گردد.

در این پژوهش، با تمرکز بر پل‌های با سازه‌های متفاوت از لحاظ اندازه دهانه و ارتفاع پایه‌ها، با استفاده از هوش مصنوعی، رابطه‌ای به سبب یافتن فاصله ایمن بین دو پل با شرایط نامنظم ارائه شده و مورد تأیید نیز قرار می‌گیرد.

۲. فاصله ایمن

امروزه، ساخت پل برای استفاده وسایل نقلیه جهت سهولت عبور و مرور در شهرها و جاده‌های بین شهری به امری مهم و حیاتی تبدیل شده است. پل‌ها از مجموعه‌ای از قطعات جداگانه که به صورت به هم پیوسته در کنار یکدیگر قرار گرفته که هر یک به صورت جداگانه، سازه‌ای مجزا بوده و پاسخ‌های لرزه‌ای جداگانه‌ای در برابر بارهای لرزه‌ای از خود نشان می‌دهند. این رفتار باعث برخورد دو سازه جداگانه شده و ممکن است عرشه پل دچار تخریب گردد.

به منظور جلوگیری از ضربه دو پل مجاور یکدیگر، عموماً فاصله‌ای ایمن بین آنها لحاظ می‌گردد که روابط مطروحه آن اشاره شده است. به این منظور، در این مقاله و بر اساس چهار پل با شرایط متفاوت که زمان‌های تناوب متفاوتی دارند، پنج رکورد زلزله متفاوت در نظر گرفته شده (جدول ۱) و پاسخ‌های لرزه‌ای آنها در کنار یکدیگر بررسی می‌شود.

برای هر یک از پل‌ها، دو دهانه کنار یکدیگر در نظر گرفته شده که زمان تناوب آنها به ترتیب برای پل‌های

در این راستا، لویز گارسیا و سونگ (۲۰۰۹) با ارائه یک رابطه خطی مرتبط به زمان، به پیش‌بینی فاصله مورد نیاز بین دو ساختمان و یا دو عرشه پل مجاور یکدیگر پرداخته‌اند. ایشان حداقل فاصله بین دو سازه را به بیشینه جابجایی آنها مرتبط دانسته‌اند.

$$u_{rel}(t) = u_i(t) - u_j(t) \quad (1)$$

در این رابطه، u ها جابجایی سازه‌های مجاور یکدیگر می‌باشد که تابعی از زمان لرزه است. کسایی و میسون (۱۹۹۶) با ارائه معادله‌ای بین سازه‌های مجاور یکسان یا غیریکسان در ارتفاع، فاصله کمینه‌ای را توصیه می‌کنند.

$$u_{rel} = \sqrt{u_{\max(i)}^2 + u_{\max(j)}^2 - 2 \cdot \rho \cdot u_{\max(i)} \cdot u_{\max(j)}} \quad (2)$$

در این رابطه، میزان $\rho = -1$ تا صفر پیشنهاد شده است. اما فیلیاترالت و واگنر (۱۹۹۵)، ضمن تأیید رابطه فوق، به سبب تفاوت رفتاری سازه‌ها در بارهای لرزه‌ای، مقدار عددی دقیقی که تابعی از میرایی و زمان تناوب پل‌ها و یا سازه‌های مجاور یکدیگر است، پیشنهاد داده‌اند.

$$\rho = \frac{8\sqrt{\zeta_i \zeta_j} (\zeta_i + \zeta_j) \left(\frac{T_i}{T_j}\right) \left(\frac{T_j}{T_i}\right)^{1.5}}{\left(1 - \left(\frac{T_i}{T_j}\right)^2\right)^2 + 4\zeta_i \zeta_j \left(1 - \left(\frac{T_i}{T_j}\right)^2\right) \left(\frac{T_i}{T_j}\right) + 4(\zeta_i + \zeta_j) \left(\frac{T_i}{T_j}\right)^2} \quad (3)$$

در ادامه، نادرپور و همکاران (۲۰۱۶) با استفاده از رابطه (۲)، و با تمرکز بر زمان تناوب سازه‌های مجاور، ضریب جدیدی را معرفی و استفاده نموده‌اند.

$$\rho = \left(\frac{T_j}{T_i}\right) - 10.5 \cdot (T_j - T_i) \quad (4)$$

بنزین (۱۹۹۷) و جنگ و تزنگ (۲۰۰۰) نیز با ارائه روابطی به موضوع فاصله ایمن پرداخته و روابطی را به جهت جلوگیری از برخورد پیشنهاد داده‌اند. اما همانگونه که به وضوح مشخص است، عدم ایجاد فاصله مناسب بین دو عرشه پل باعث برخورد در حین بارهای لرزه‌ای شده و اثرات مخربی را با خود به همراه داشت. به این

یک تا چهار، ۰/۱ و ۰/۱۴، ۰/۲۵ و ۰/۲۷، ۰/۲۲ و ۰/۳۱ و نهایتاً ۰/۳۴ و ۰/۳۸ ثانیه در نظر گرفته می‌شود. تفاوت در زمان‌های تناوب به دلیل جرم متفاوت یا سختی گوناگون به سبب ارتفاع متفاوت پایه‌ها فرض شده است.

جدول ۱. مشخصات زلزله‌های مورد استفاده

زلزله	بزرگا	بیشینه شتاب (g)	بیشینه سرعت (m/s)	بیشینه جابجایی (m)
امپریال ولی	۶/۵	۰/۲۸۹	۳۱/۴۹	۱۳/۱۹
کوبه	۶/۸	۰/۳۴۴	۲۴/۶۷	۹/۷
لوما پریتا	۶/۹	۰/۳۶۷	۴۴/۷	۱۹/۶۱
لندرز	۷/۲	۰/۳۹۱	۴۷/۶۸	۲۰/۹۱
نورت‌ریج	۶/۷	۰/۵۶۸	۴۱/۹۶	۵/۷۱

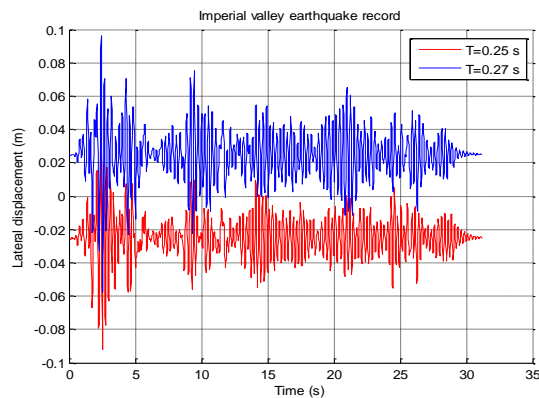
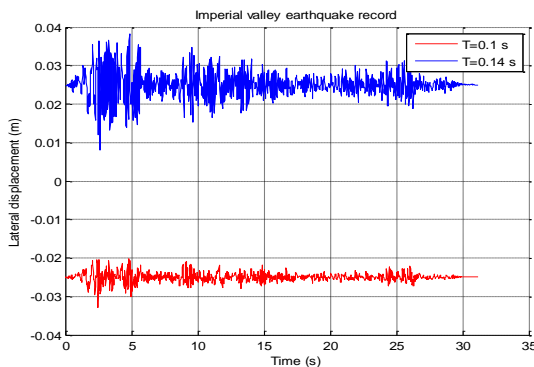
طبق نتیجه رخ داده، فاصله جدید با در نظر گرفتن عدم برخورد بین آنها پیشنهاد می‌گردد.

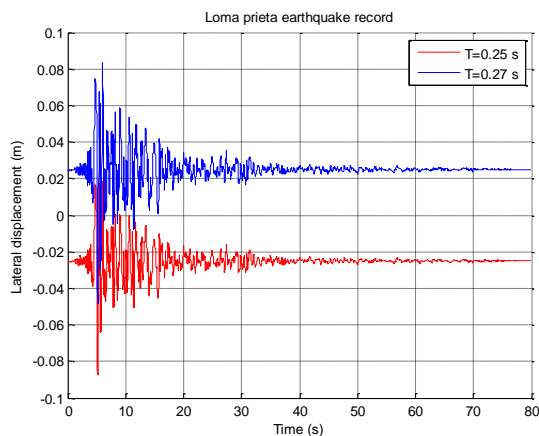
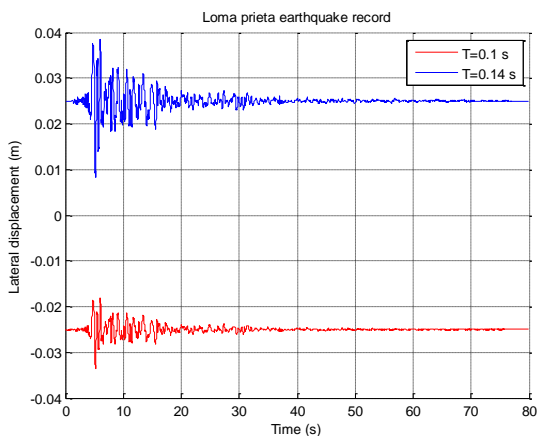
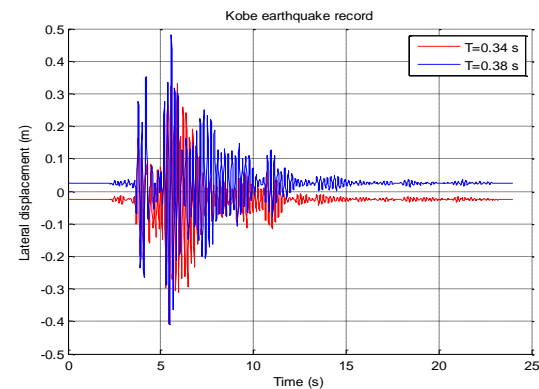
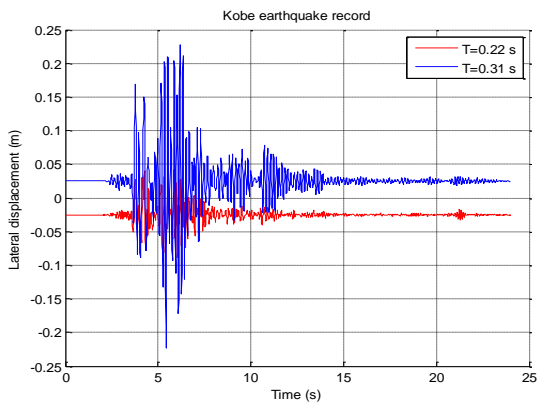
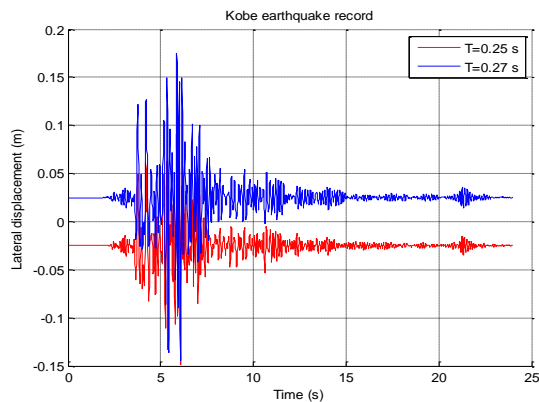
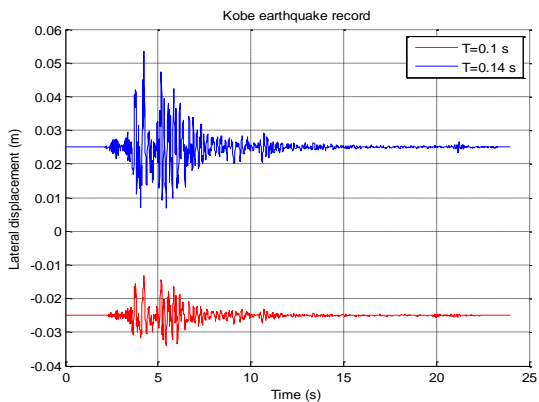
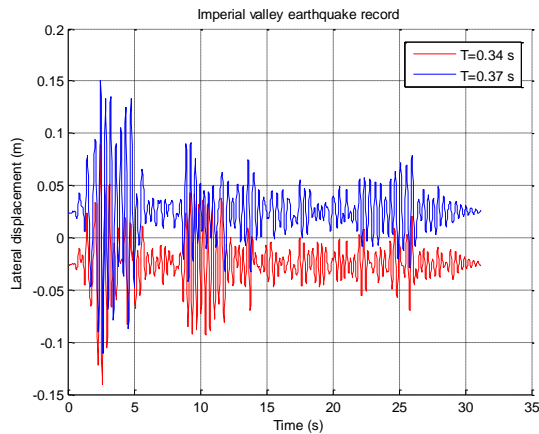
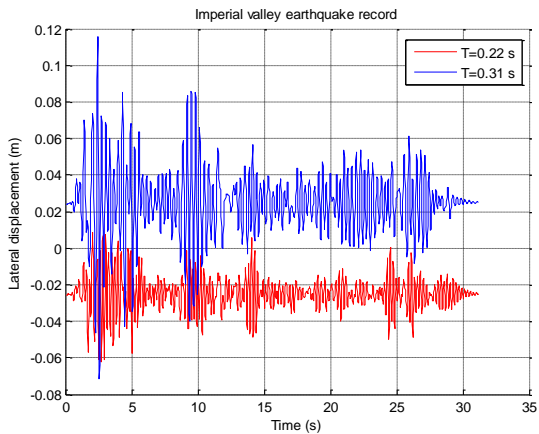
برای تحلیل مدل‌های مختلف فرضی، فاصله اولیه ۵ سانتی‌متری برای دو دهانه پل با عرشه همراستا در نظر گرفته می‌شود و پنج رکورد زلزله مذکور، تحریک لرزه‌ای دو سیستم یک درجه آزادی را در پی داشته و جابجایی جانبی آنها در شکل‌های مختلف دیده می‌شود.

نتایج ۲۰ تحلیل انجام شده در شکل ۳ ارائه شده است. همانگونه که مشاهده می‌شود، در زمان‌های تناوب کم، به علت جابجایی نازل، برخوردی رخ نمی‌دهد و همچنین در زمان‌های تناوب نزدیک به هم نیز به سبب پاسخ‌های لرزه‌ای یکسان و مشابه هم، تعداد برخوردها ناچیز است. به هر دلیل، برخورد ضربه بین دو عرشه پل باعث آسیب و تخریب شده که باید از این برخوردها جلوگیری گردد.

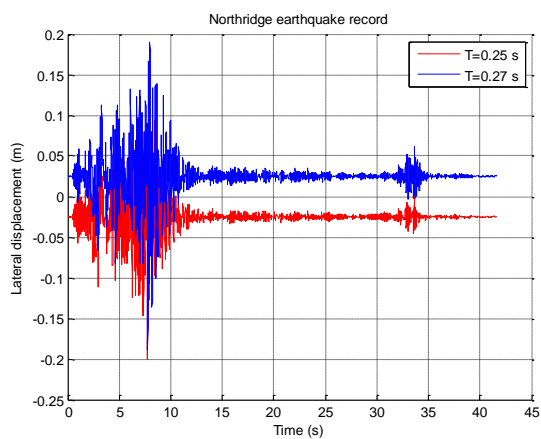
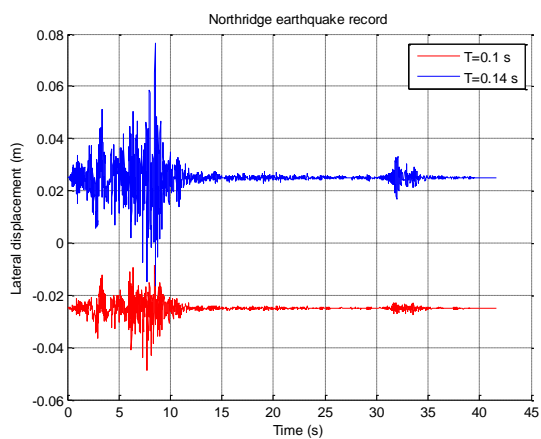
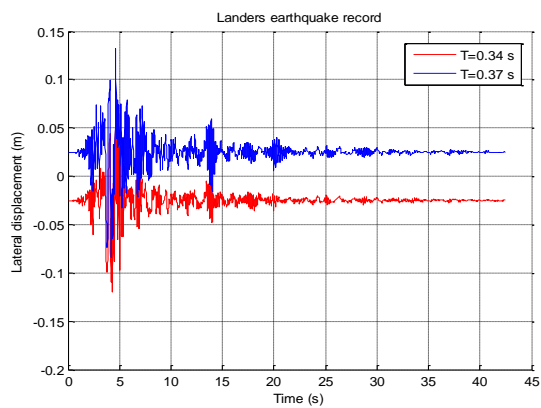
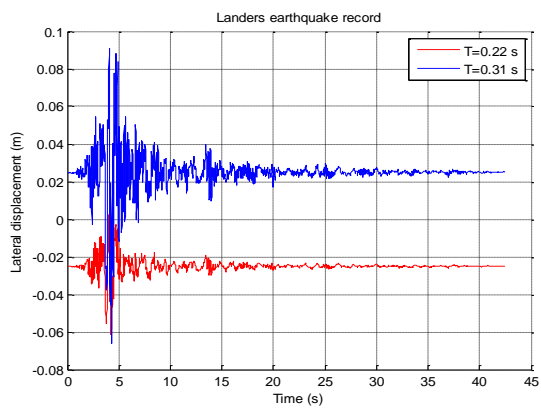
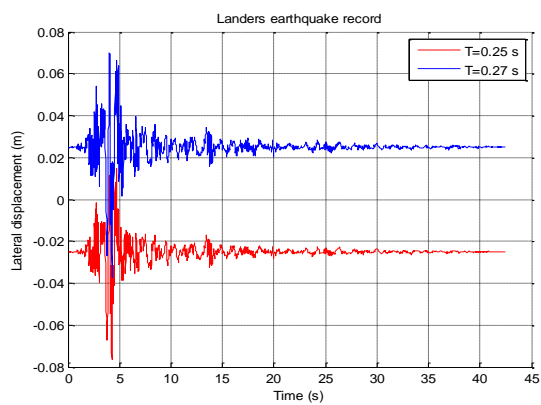
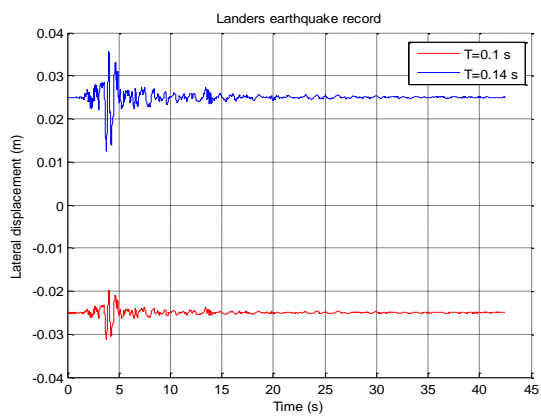
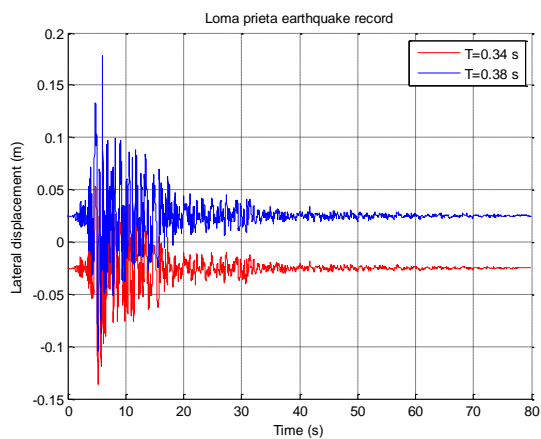
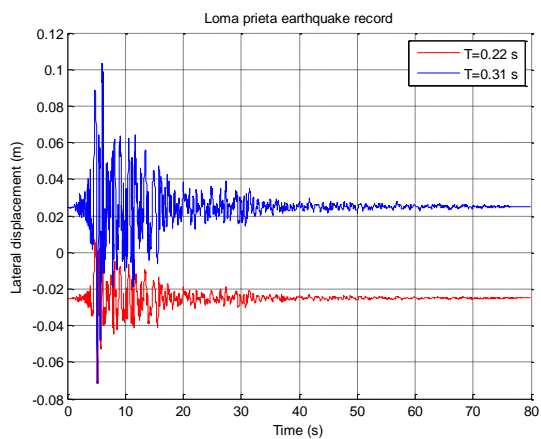
برای نیل به هدف بررسی فاصله ایمن، از یک مدل درختی استفاده شده است. به این منظور که هر یک از پل‌ها با زمان تناوب مشخص در کنار دهانه دیگری از همان مجموعه با زمان تناوب متفاوت قرار گرفته و تحت بار لرزه‌ای قرار گرفته و جابجایی جانبی آنها محاسبه می‌شود. سپس، فاصله ایمن بین دو مدل که کمترین فاصله برای ایجاد اطمینان از عدم برخورد دو مدل است با استفاده از هوش مصنوعی به دست می‌آید. در مجموع این جامعه آماری، ۲۰ مدل تحلیل شده و نمودار درختی آن رسم شده تا با استفاده از تحلیل‌های الگوریتمی بر اساس کمترین فاصله که مانع برخورد دو پل می‌باشد، رابطه‌ای بر اساس زمان تناوب و مشخصات لرزه‌ای زلزله ارائه گردد.

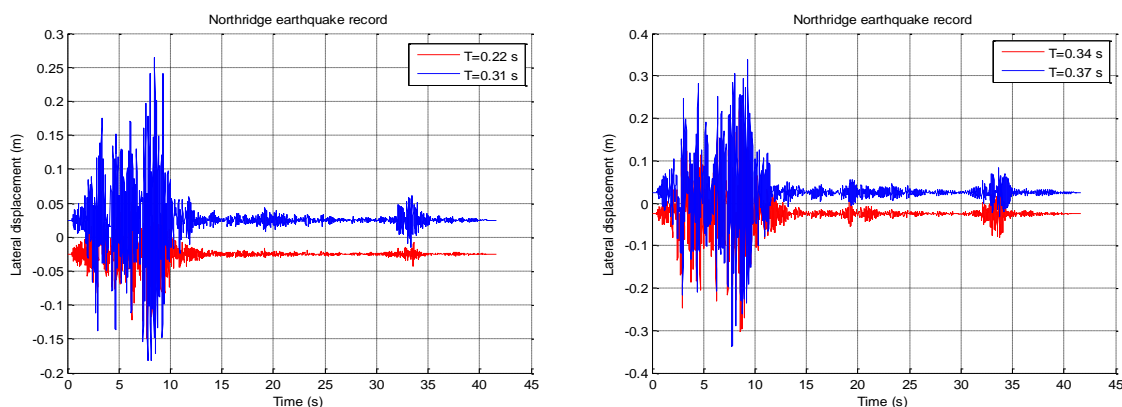
در نتیجه و برای مدل‌های مختلف در تحلیل، یک تحلیل اولیه بر اساس فاصله پیشنهادی انجام می‌شود و بر





محاسبه فاصله ایمن درز انقطاع در سازه‌های با مشخصات متفاوت با استفاده از هوش مصنوعی



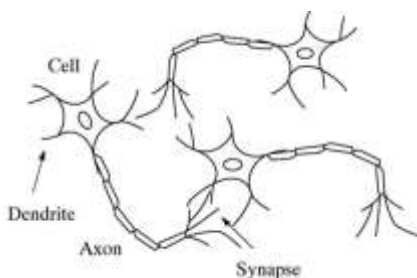


شکل ۳. جابجایی جانبی عرشه‌های پل با رکورد زلزله‌های مختلف

جدید و نوین پردازشگر اطلاعات می‌باشد. این شبکه‌ها از تعداد زیادی اعضای پردازشگر (نورون‌ها) با وابستگی داخلی بسیار زیاد، که با هماهنگی برای حل مسائل مختلف کار می‌کنند، تشکیل شده‌اند. مشابه با انسان، شبکه‌های عصبی مصنوعی به کمک مثال یاد می‌گیرند. یک شبکه عصبی مصنوعی برای یک کاربرد خاص مانند تشخیص الگو یا طبقه‌بندی داده‌ها طی فرایند یادگیری ایجاد می‌شود. یادگیری در سیستم‌های بیولوژیک با استفاده از ارتباطات سیناپسی که بین نورون‌ها به وجود می‌آید، شکل می‌گیرد (شکل ۴). همین فرایند در شبکه‌های عصبی نیز رخ می‌دهد. شبکه‌های عصبی مصنوعی یک روش عملی عمومی را برای توابع با مقادیر حقیقی، گسسته و برداری با استفاده از مثال‌ها تأمین نموده و بنابراین در کاربردهای گسترده مسائل مهندسی مورد استفاده قرار گرفته‌اند. در کاربردهای مهندسی، یک شبکه عصبی می‌تواند یک نگاهت برداری تلقی شود که بردار ورودی را به بردار خروجی می‌نگارد (خاتمی و همکاران، ۲۰۱۹).

به صورت کلی، دو راهکار اساسی برای جلوگیری از ضربه ارائه شده است. اولین رویکرد، تشابه کامل و یکسان دو دهانه پل به لحاظ سازه‌ای می‌باشد که جرم، سختی و ارتفاع یکسان داشته باشند تا در حین بارگذاری لرزه‌ای، پاسخی کاملاً یکسان و مشابه با یکدیگر ارائه نمایند. دومین رویکرد، که بحث اصلی این کار پژوهشی می‌باشد، بررسی فاصله ایمن بین دو دهانه پل با مشخصات متفاوت است که در مجموع یک سازه نامنظم را نشان می‌دهد.

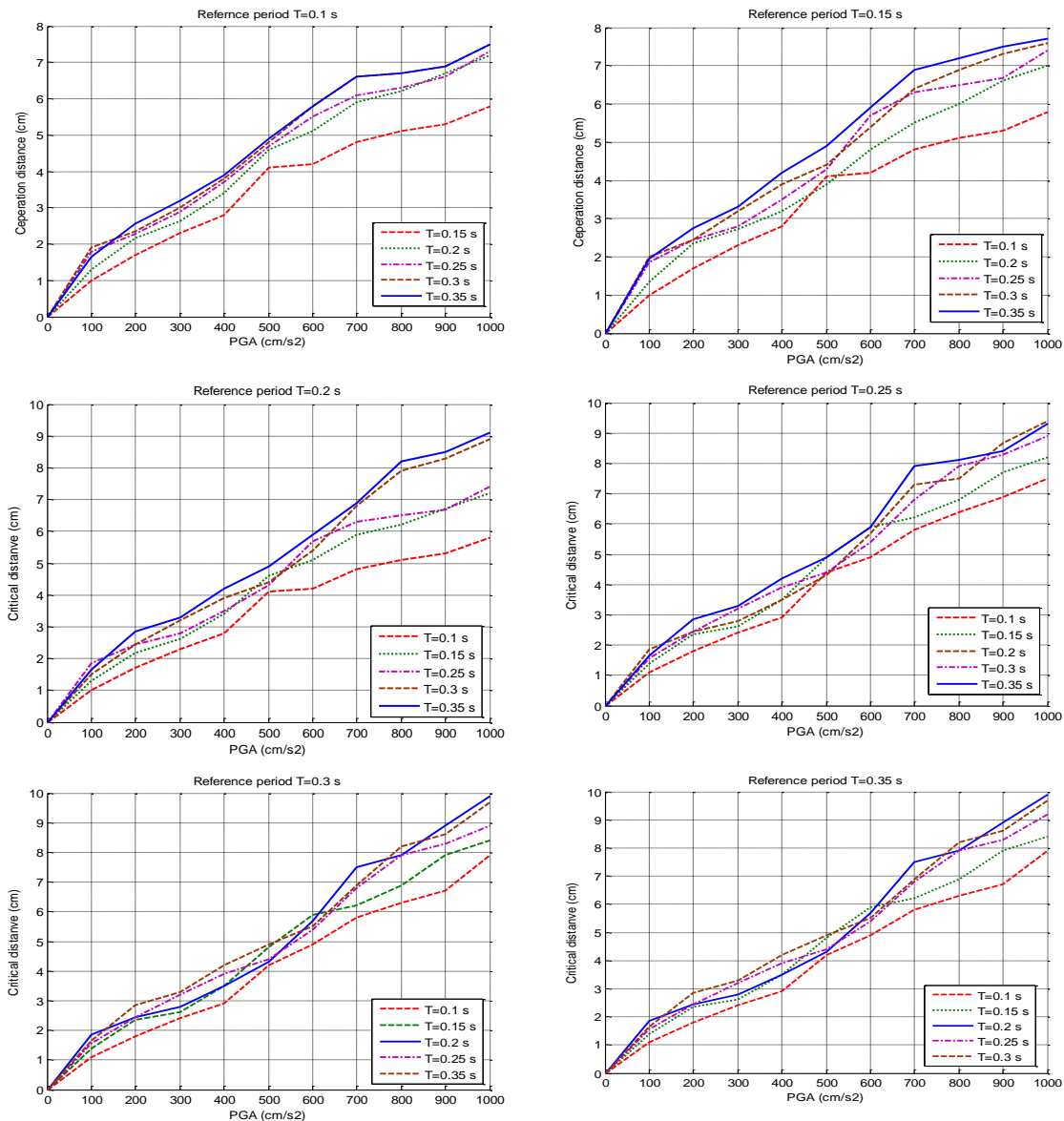
به این منظور، و جهت نیل به هدف اساسی یافتن فاصله ایمن بین دو دهانه پل با مشخصات متفاوت، از یک شبکه عصبی (هوش مصنوعی) استفاده شده است. از نقطه نظر تاریخی و در نگاه نخست، پیدایش شبکه‌های عصبی به سال‌های اخیر باز می‌گردد. با این حال، این زمینه حتی قبل از پیدایش کامپیوترها نیز مطرح بوده است. یک شبکه عصبی مصنوعی یک ابزار پردازش اطلاعات است که از سیستم‌های عصبی بیولوژیک (مانند مغز) الهام گرفته است. مؤلفه کلیدی این ابزار، ساختمان



شکل ۴. شماتیک یک نورون در شبکه عصبی (خاتمی و همکاران، ۲۰۱۹) [۱۳]

گرفته شود. بر این اساس، دو عرشه پل با زمان‌های تناوب در بازه ۰/۱ تا ۰/۳۵ ثانیه با گام‌های ۰/۰۵ ثانیه به صورت متوالی در نظر گرفته شده و در کنار یکدیگر تحلیل می‌گردند. در حقیقت، هوش مصنوعی با تحلیل هر یک از مدل‌ها و تکرار آن تا حصول نتیجه عدم برخورد دو عرشه پل، خروجی عددی را بر اساس زلزله مورد استفاده استخراج کرده و در یک نمودار بر مبنای پیشینه شتاب زلزله قرار می‌گیرد. همانگونه که در شکل ۵ دیده می‌شود، فاصله ایمن با روند صعودی و با افزایش میزان پیشینه شتاب افزایش می‌یابد.

به جهت محاسبه فاصله ایمن، اطلاعات پیش فرض دینامیک پل‌ها، شامل ارتفاع و طول دهانه، جرم، سختی و زمان تناوب معرفی و مشخصات زلزله، شامل پیشینه شتاب، سرعت و جابجایی مورد بررسی نیز در نظر گرفته می‌شود. این مشخصات به عنوان اطلاعات ورودی و فاصله ایمن به عنوان خروجی مطلوب تعریف می‌گردد. به این سبب، یک روند درختی در نظر گرفته شده و فاصله بین دو عرشه پل در اندازه‌های مختلف و در یک روند منطقی تغییر می‌کند تا کمترین فاصله که در آن برخورد رخ ندهد محاسبه و به عنوان خروجی در نظر



شکل ۵. فاصله ایمن در برابر پیشینه شتاب زلزله

$$S = a_1 \cdot (PGA) \cdot [T_N \times T_M] \quad (5)$$

$$S = a_1 \cdot a_2 \cdot (PGA) \cdot (PGD) \cdot \frac{[T_N \times T_M]}{h_M} \quad (6)$$

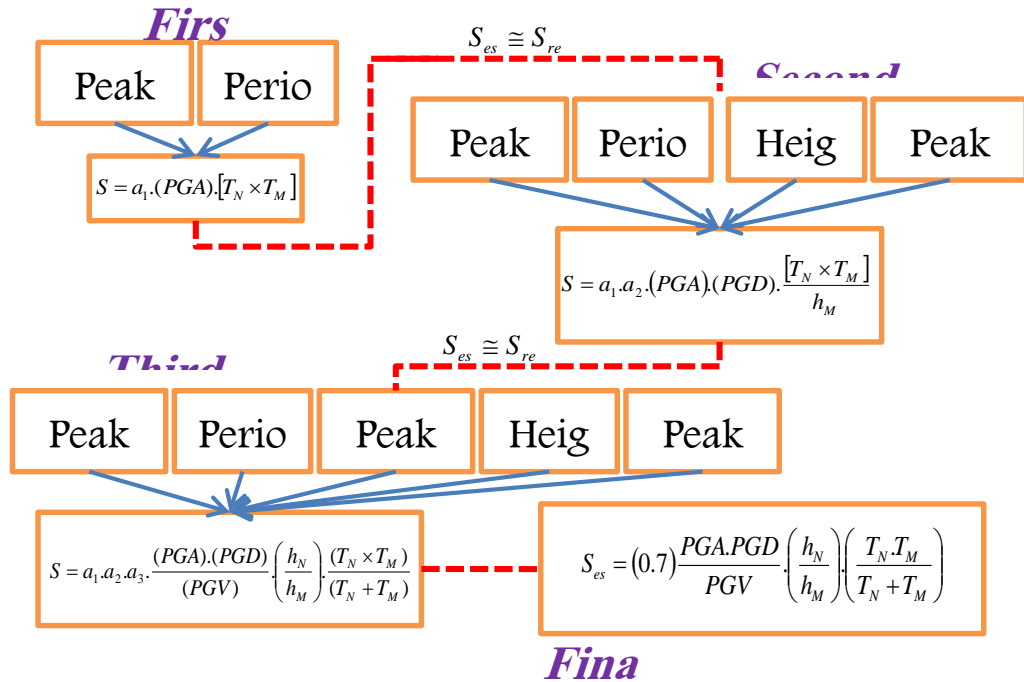
$$S = a_1 \cdot a_2 \cdot a_3 \cdot \frac{(PGA) \cdot (PGD)}{(PGV)} \cdot \left(\frac{h_N}{h_M} \right) \cdot \frac{(T_N \times T_M)}{(T_N + T_M)} \quad (7)$$

در این حالت، رابطه اصلی و پایه به شکل زیر ارائه می‌گردد:

$$S = \alpha \cdot \left(\frac{PGA \cdot PGD}{PGV} \right) \cdot (h) \cdot (T_{eq}) \quad (8)$$

شکل ۶، الگوریتم محاسبه فاصله ایمن را نشان می‌دهد.

بر اساس تحلیل‌های انجام شده و پیشنهاد شبکه عصبی جهت فاصله پل‌ها، با تمرکز بر پل‌های نامنظم در ارتفاع، ابتدا با استفاده از مشخصات زلزله‌های مورد استفاده و خروجی‌های شبکه عصبی، رابطه ریاضیاتی زیر برای محاسبه فاصله ایمن بین دو عرشه پل به صورت گام به گام و رعایت بعد رابطه پیشنهاد و فاصله ایمن تحلیل می‌شود. در صورتی که پاسخ فاصله منطقی باشد، رابطه پیشنهادی به عنوان رابطه اصلی پیشنهاد می‌شود و در غیر این صورت، رابطه اولیه تکمیل می‌شود. در نتیجه خواهیم داشت:



شکل ۶. الگوریتم محاسبه فاصله ایمن

که در رابطه ارائه شده، T زمان تناوب و h ارتفاع پایه پل‌ها می‌باشد ($N > M$).

به جهت بررسی صحت و تأیید رابطه فوق، دو نمونه پل نامنظم با ارتفاع پایه‌های متفاوت و زمان تناوب گوناگون بررسی می‌شود. در مثال اول، پایه پل به ارتفاع ستون‌های ۱۰ و ۱۲ متر با زمان‌های تناوب ۰/۱ و ۰/۱۷

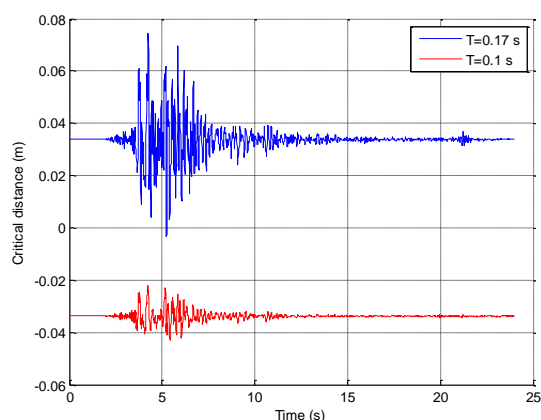
در رابطه (۸)، $\alpha = 0.7$ متناسب با ارتفاع پایه‌ها بوده و زمان تناوب نیز بر اساس معادل‌سازی زمان تناوب دو مدل ارائه شده است. در نتیجه خواهیم داشت:

$$S = (\alpha) \cdot \frac{(PGA) \cdot (PGD)}{(PGV)} \cdot \left(\frac{h_N}{h_M} \right) \cdot \frac{(T_N \times T_M)}{(T_N + T_M)} \quad (9)$$

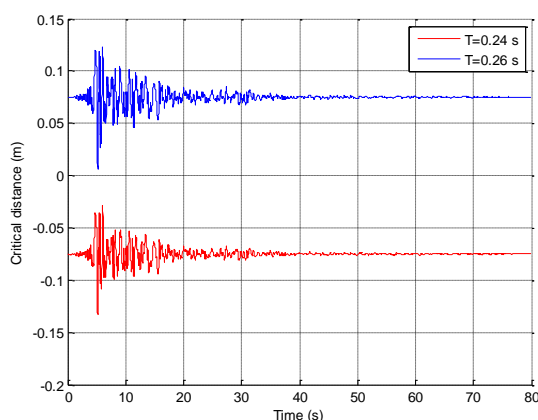
دو عرشه پل، ۱۵ سانتی متر پیشنهاد شده است که همانند مدل تحلیلی قبل، هیچ برخوردی بین دو مدل دیده نمی‌شود.

به نظر می‌رسد که می‌توان با تعمیم رابطه (۹)، فاصله مورد نیاز را برای ساختمان‌های منظم و نامنظم که در کنار یکدیگر قرار می‌گیرند، استفاده نمود. این کار نیاز به بررسی و استفاده از مشخصات ساختمانی مورد مطالعه دارد.

ثانیه تحت زلزله کوبه بررسی می‌گردد. با این وصف، فاصله ایمن بین دو عرشه پل با استفاده از اطلاعات جدول ۱ و رابطه (۹)، ۶/۸ سانتی متر پیشنهاد شده است. همانگونه که در شکل دیده می‌شود، با ایجاد فاصله پیشنهادی، هیچگونه برخوردی بین دو عرشه پل رخ نداده است. در مثال دیگر، پایه پل به ارتفاع ستون‌های ۱/۷ و ۲/۱ متر با زمان‌های تناوب ۰/۲۶ و ۰/۲۴ ثانیه تحت زلزله لوماپریتا بررسی می‌گردد. با این شرایط، فاصله ایمن بین



(الف)



(ب)

شکل ۷ جابجایی عرشه پل‌ها و تأیید صحت رابطه تحت زلزله الف) کوبه و ب) لوماپریتا

$$F_l = k_h \cdot \delta(t)^{1.5} + c_{imp} \dot{\delta}(t) \quad (10)$$

که در این معادله، k_h سختی میراگر (بالشتک) مورد استفاده می‌باشد و $\delta(t)$ نیز میزان جابجایی میراگر و رابطه سرعت بین دو جسم در زمان t است. با استفاده از رابطه (۱۰)، معادله c_{imp} به شرح زیر محاسبه می‌گردد:

$$c_{imp} = 2 \cdot \zeta \cdot \sqrt{k_l \sqrt{\delta(t)} \frac{m_i m_j}{m_i + m_j}} \quad (11)$$

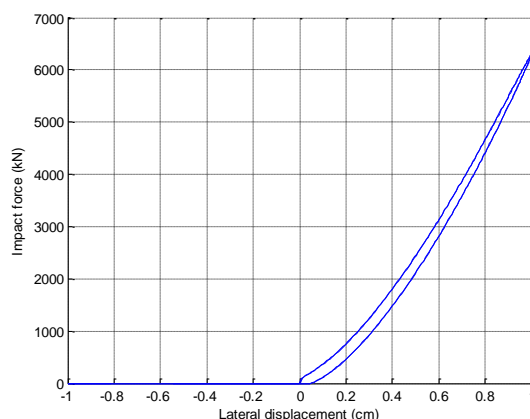
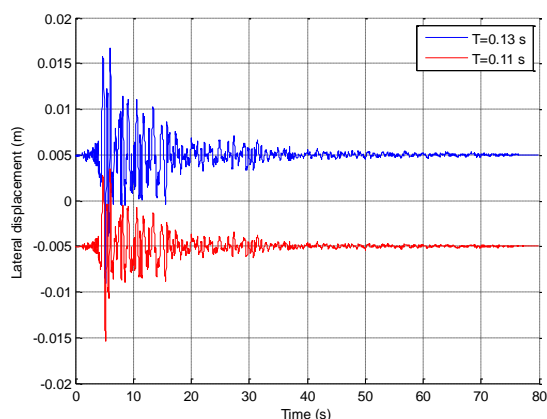
در این رابطه، c_{imp} مقدار میرایی میراگر و m نیز جرم دو عرشه مورد برخورد می‌باشد. در این رابطه، ζ ضریب میرایی بوده و بر اساس قانون انرژی، سرعت ضربه و انرژی پتانسیل ارائه شده توسط چوپرا (۱۹۹۵) به صورت زیر پیشنهاد می‌گردد:

$$\zeta_{imp} = \left(\frac{6}{7} \cdot \frac{(1 - e^2)}{e^{0.75} \cdot \sqrt{\pi}} \right)^2 \quad (12)$$

همانگونه که مشاهده می‌شود، فاصله‌ها به طور محافظه‌کارانه‌ای انتخاب می‌شود تا اطمینان از عدم برخورد، حتی به سبب مشکلات اجرایی، وجود داشته باشد. با این شرایط و برای فاصله‌های نامتعارف برای عرشه پل‌ها و الزام کاهش فاصله‌گذاری، می‌توان با استفاده از میراگرها یا بالشتک‌های ضربه‌گیر، نیروی ضربه را کاهش داد. عموماً، در مطالعات عددی، 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 δ در یکدیگر فرو رفته و از هم جدا می‌شوند. این ضربه، بر اساس میزان سرعت و جرم دو جسم، تولید نیرویی می‌نماید که باعث تخریب عرشه‌های بتنی پل‌ها می‌شود. میزان این نیرو بر اساس مدل ضربه ویسکوالاستیک غیرخطی که توسط یانکوسکی (۲۰۰۵) ارائه شده است محاسبه می‌شود.

حال و به جهت بررسی دقیق، دو دهانه پل ساخته شده به ارتفاع ۳ و ۳/۷ متر با زمان تناوب ۰/۱۱ و ۰/۱۳ ثانیه که به فاصله یک سانتی‌متری از هم اجرا شده‌اند تحت زلزله لوماپریتا قرار گرفته و تحلیل می‌شوند. همانگونه که در شکل ۸ دیده می‌شود، فاصله یک سانتی‌متری باعث ایجاد برخورد بین دو عرشه پل شده است که این ضربه‌ها روند خرابی پل را تشدید می‌کنند. با استفاده از رابطه ضربه، نیروی ضربه بین دو عرشه پل ۶۲۴۵ کیلو نیوتن محاسبه شده است که بیشینه نیرو ضربه نیز در فاصله یک سانتی‌متری رخ داده است؛ فاصله‌ای که مابین دو عرشه پل لحاظ شده بود.

که $0 < e = \frac{\dot{\delta}_b}{\dot{\delta}_a} < 1$ به عنوان ضربه ضربه معرفی شده و بر اساس سرعت ضربه قبل و بعد از برخورد محاسبه می‌گردد. همانگونه که مشاهده می‌شود، این رابطه بر پایه ضربه استرداد بوده و انتخاب دقیق این عدد می‌تواند در نتایج نیروی ضربه و انرژی مستهلک شده تأثیرگذار باشد. اما محققین عموماً عدد ۰/۶۵ را برای این ضربه در نظر گرفته‌اند. از آنجایی که ضربه ضربه، یک پارامتر بیشتر از صفر و کمتر از یک می‌باشد، اعداد محاسبه شده تحت ضرایب استرداد مختلف برای ضربه میرایی بیشتر از یک، عملاً غیرقابل قبول بوده و آن معادله برای ضرایب استرداد قابل قبول است که بتواند ضربه میرایی را در محدوده تعریف شده محاسبه و ارائه نماید.



شکل ۸. جابجایی عرشه پل‌ها با فاصله یک سانتی‌متری و نیروی ضربه بین آنها

اجرای پل می‌باشد. به این سبب، هر عرشه پل که به صورت یک المان یک درجه آزادی و به صورت منفرد طراحی می‌گردد، در کنار عرشه پل دیگر قرار گرفته و ممکن است در حین بارهای لرزه‌ای دچار برخورد شده و صدماتی رخ دهد. به این سبب، در این پژوهش، بر اساس مشخصات ذاتی المان‌های سازه‌ای پل همانند ارتفاع پایه، جرم عرشه، سختی و زمان تناوب و از طرفی مشخصات زلزله مورد بررسی، با استفاده از هوش مصنوعی، رابطه‌ای بر اساس یک روند سعی و خطا و با استفاده از کلیه پارامترهای تأثیرگذار ارائه شده و فاصله ایمن پیشنهاد شده است. برای تأیید این رابطه نیز از

همانگونه که مشاهده می‌شود، فاصله یک سانتی‌متری دهانه‌ها سبب شده است که بیشینه نیروی ضربه در این فاصله رخ دهد که در صورت ایجاد فاصله ایمن، از برخورد جلوگیری می‌شود. در نتیجه، به نظر می‌رسد بهینه‌ترین راه حل برای اطمینان از عدم برخورد، ایجاد فاصله ایمن بین دو عرشه پل می‌باشد.

۳. نتیجه‌گیری

بررسی جابجایی عرشه پل‌ها در حین زلزله و یا بارگذاری‌های متحرک نشان می‌دهد که ایجاد فاصله مابین آنها به سبب شرایط سازه‌ای از الزامات طراحی و

تحلیلی مورد مطالعه و پیشنهاد می‌شوند. بر این اساس، فاصله دو دهانه برای جلوگیری از برخورد محاسبه و ارائه گردید. به‌طور مثال، پایه پل به ارتفاع ستون‌های $1/7$ و $2/1$ متر و با زمان‌های تناوب $0/24$ و $0/26$ ثانیه تحت زلزله لوماپریتا، نیاز به فاصله ایمن بین دو عرشه پل در حدود 15 سانتی‌متر دارد. در صورتی که فاصله مورد اشاره رعایت نشود، دو عرشه به یکدیگر ضرباتی را وارد کرده و باعث تخریب می‌شوند.

عرشه‌های پل متفاوت و زلزله‌های گوناگون استفاده شده و فاصله پیشنهادی تأیید می‌گردد. به این سبب، بیشینه شتاب، سرعت و جابجایی زلزله به عنوان مشخصات لرزه‌ای و زمان تناوب و ارتفاع پایه‌های هر یک از دهانه‌های پل‌ها به عنوان مشخصات پل‌ها در نظر گرفته شده و در یک روند درختی قرار داده شده و نتایج تحلیل‌های متفاوت و گوناگون تحت زلزله‌های مختلف و شرایط متفاوت بررسی شده و نتایج آن تحت یک رابطه

۴. مراجع

- مرتضایی، ع. ۱۳۹۴. "اثر محتوای فرکانسی زمین‌لرزه‌های نزدیک گسل بر عملکرد لرزه‌ای پایه پلهای بتن آرمه". مجله مهندسی زیرساخت‌های حمل و نقل، ۱(۳): ۹۳-۱۰۹.
- Anagnostopoulis, S. A. 1986. "Pounding of building in series during earthquakes". *Earthq. Eng. Struct. Dyn.* 16(3): 443-456.
- Chopra, A. 1995. "Dynamic of structures, theory and applications to earthquake engineering". University of California at Berkeley.
- Filiatrault, A. and Wagner, P. 1995. "Analytical prediction of experimental building pounding". *J. Earthq. Eng. Struct. Dyn.*, 24: 1131-1154.
- (1) Ghasemi, H., Otsuka, H., James, D. and Nakajima, H. 1996. "Aftermath of the Kobe earthquake". *Federal Highway Administration Research and Technology*, 60(2).
- (2) <https://20civil.ir/>
- Jankowski, R. 2005. "Non-linear viscoelastic modeling of earthquake-induced structural pounding". *Earthq. Eng. Struct. Dyn.*, 34: 595-611.
- Jeng, V. and Tzeng, W. L. 2000. "Assessment of seismic pounding hazard for Taipei City". *Eng. Struct.* 22(5): 459-471.
- Kasai, K. and Maison, B. F. 1996. "Building pounding damage during the 1989 Loma Prieta earthquake". *Eng. Struct.*, 19(3): 195-207.
- Khatami, S. M., Naderpour, H., Barros, R. C., Jakubczyk-Galczyńska, A. and Jankowski, R. 2019. "Effective formula for impact damping ratio for simulation of earthquake-induced structural pounding". *Geosci.*, 9: 347.
- Komodromos, P. and Polycarpou, P. 2010. "On the numerical simulation of impact for the investigation of earthquake-induced pounding of building". Tenth International Conference on Computational Structures Technology, Civil-Comp Press, Stirlingshire, Scotland.
- Loghmani, A., Mortezaei, A. and Hemmati, A. 2020. "A new equation based on PGA to provide sufficient separation distance between two irregular buildings in plan". *Earthq. Struct.*, 18(5): 543-553. DOI: 10.12989/eas.2020.18.5.543.
- Lopez-Garcia, D. and Soong, T. T. 2009. "Evaluation of current criteria in predicting the separation necessary to prevent seismic pounding between nonlinear hysteretic structural systems". *Eng. Struct.*, 31(5): 1217-1229.
- Naderpour, H., Barros, R. C. and Khatami, S. M. 2016. "Suggestion of an equation of motion to calculate the damping ratio during earthquake based on a cyclic procedure". *J. Theor. Appl. Mech.*, 54(3): 963-973. DOI: 10.15632/jtam-pl.54.3.963
- Penzien, J. 1997. "Evaluation of building separation distance required to prevent pounding during strong earthquakes". *Earthq. Eng. Struct. Dyn.* 26(8): 849-858.
- Ye, K. and Zhu, H. 2008. "A note on the Hertz contact model with nonlinear damping for pounding simulation". *Earthq. Eng. Struct. Dyn.*, 38 (9):1135-1142.