

پاسخ ضربه‌ی ۳ ساختمان مجاور تحت حرکت قوی نزدیک گسل و اثر آن در رفتار لرزه‌ی ساختمان‌های میانی و کناری

بهاره مظلوم فاضل (دانشجوی کارشناسی ارشد)
دانشکده مهندسی عمران، پردیس بین‌الملل، دانشگاه گیلان

رضا صالح جلالی* (استادیار)
گروه مهندسی عمران، دانشگاه گیلان

مهندسی عمران شریف، (بهار ۱۳۹۶)
دوره ۲، شماره ۱/۲، ص ۱۱۳-۱۲۳، (پادداشت فنی)

در پژوهش حاضر، مدل ساده‌ی از ساختمان‌ها به شکل سری، شامل ۳ ساختمان مجاور ۳، ۲ و ۳ طبقه، تحت مؤلفه‌های افقی و عمودی حاصل از حرکات موازی گسل و عمود بر گسل با بزرگا و اختلاف فازهای مختلف مورد بررسی قرار گرفته است. برای مدل‌های مذکور نتایج نشان می‌دهند: الف) نیروی ضربه می‌تواند سبب افزایش بیشینه نیروی برش طبقات شود و این افزایش در ساختمان‌های کناری، که از یک طرف ضربه می‌خورند، چشم‌گیرتر از ساختمان میانی، که از دو طرف ضربه می‌خورد، است. ب) با افزایش فاصله‌ی اولیه بین ساختمان‌ها، لزوماً ضربه کاهش نمی‌یابد و بسته به فاصله‌ی اولیه و دوره‌ی تناوب ساختمان‌ها و نیز رفتار مصالح، بیشینه نیروی ضربه می‌تواند بین ساختمان‌های چپ و میانی و یا ساختمان‌های راست و میانی رخ دهد. ج) در حالت خطی و تحت پالس عمود بر گسل با بزرگای ۵، ۶ و ۷، بیشینه نیروی ضربه‌ی قابل انتظار به ترتیب برابر ۵۸، ۱۰ و ۱۰۰ مگانیوتن و کمینه فاصله‌ی لازم جهت جلوگیری از ضربه به ترتیب برابر ۱۰، ۳۰ و ۵۰ سانتی‌متر است. د) در حالت غیرخطی، بیشینه نیروی ضربه‌ی قابل انتظار به ترتیب برابر ۱۰، ۴۰ و ۴۵ مگانیوتن و کمینه فاصله‌ی لازم جهت جلوگیری از ضربه به ترتیب برابر ۱۰، ۲۰ و ۳۰ سانتی‌متر است.

واژگان کلیدی: ضربه، حرکت زمین در نزدیک گسل، جهت‌گیری پیش‌رونده، حرکت پرتابی، ساختمان‌ها به شکل سری.

saleh@guilan.ac.ir
bahareh_mf@yahoo.com

۱. مقدمه

در هنگام زلزله، ساختمان‌هایی که نزدیک هم قرار دارند، به علت تفاوت در خصوصیات دینامیکی، پاسخ‌های متفاوتی از خود نشان می‌دهند و ارتعاش مشابه و هماهنگ نخواهند داشت و در نتیجه احتمال برخورد و انهدام در اثر ضربه برای این قبیل ساختمان‌ها وجود دارد. برخورد ساختمان‌های هم‌جوار با فاصله‌ی ناکافی و یا اجزاء پل، بارها و بارها هنگام وقوع زمین‌لرزه مشاهده شده است، که از جمله می‌توان به زلزله‌های آلاسکا (۱۹۶۴)، سان فرناندو (۱۹۷۱)، مکزیکوسیتی (۱۹۸۵)، لوما پریتا (۱۹۸۹)، آتن (۱۹۹۹)، و کوبه (۱۹۹۵) اشاره کرد. این پدیده ممکن است به آسیب جدی یا تخریب کلی سازه‌ها منجر شود. از سوی دیگر، در مورد سازه‌های طویل، پدیده‌ی ضربه بین قسمت‌های فوقانی سازه اغلب به دلیل اثر انتشار موج و اعمال تحریکات لرزه‌ی متفاوت به تکیه‌گاه‌های سازه ایجاد می‌شود.

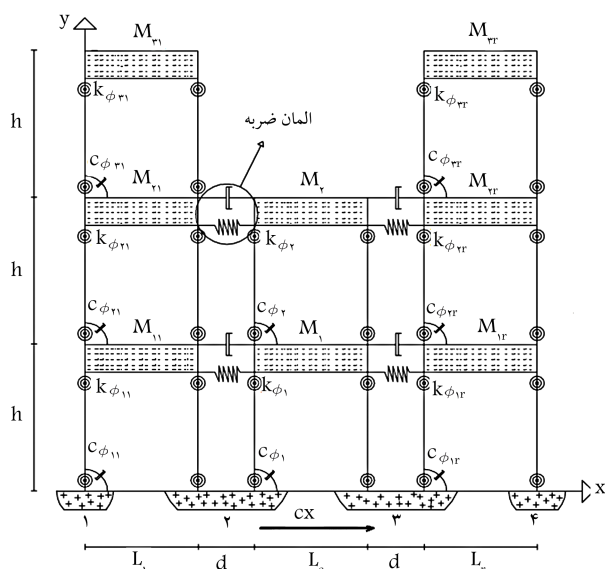
در سال ۱۹۸۸، در بررسی اثر ضربه بر سری ساختمان‌های مجاور، نشان داده شده است که با توجه به نسبت دوره‌ی تناوب ساختمان‌های انتهایی به دوره‌ی تناوب

* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۳۹۴/۱/۲۴، اصلاحیه ۱۳۹۴/۶/۲۹، پذیرش ۱۳۹۴/۷/۶.

ساختمان‌های میانی، ضربه همواره سبب افزایش جابه‌جایی نسبی در ساختمان‌های انتهایی می‌شود. در صورتی که نسبت دوره‌ی تناوب ساختمان انتهایی به ساختمان میانی بزرگ‌تر از ۱ باشد، ضربه سبب افزایش و در غیر این صورت سبب کاهش جابه‌جایی نسبی در ساختمان‌های میانی می‌شود.^[۱]

در مطالعه‌ی در سال ۲۰۰۶ نیز طیف پاسخ ضربه ارائه و نشان داده شده است که فاصله‌ی اولیه بین سازه‌های مجاور، بسامد، میرایی، جرم، و شکل‌پذیری سازه‌ها و نیز اختلاف فاز حرکات ورودی زمین می‌توانند آثار عمده‌ی در بیشینه نیروی ضربه داشته باشند.^[۲] همچنین در سال ۲۰۰۸، اثرات ضربه بین ۲ ساختمان مجاور و هم ارتفاع با خواص دینامیکی متفاوت و در نظر گرفتن رفتار غیرخطی مصالح مورد بررسی قرار گرفته و نتایج نشان داده شده است که برخورد بین ۲ ساختمان، اثر قابل توجهی در رفتار ساختمان سبک‌تر و انعطاف‌پذیرتر دارد و این امر ممکن است باعث تشدید در پاسخ و ایجاد تغییر شکل دائمی و بزرگ در آن شود و مصالح را به نقطه‌ی تسلیم برساند.^[۳] از سوی دیگر، رفتار ساختمان‌های سنگین‌تر و سخت‌تر تقریباً بی‌تأثیر از برخورد بین ساختمان‌هاست. همچنین بیشینه



شکل ۱. مدل دینامیکی ۳ ساختمان مجاور.

هستند. مدل به‌کار گرفته‌شده در شکل ۱، در واقع نشان‌دهنده‌ی رفتار صفحه‌یی ساختمان‌های برشی سه بعدی است و تیر صلب معادل کف صلب است. جهت تمیزدادن پارامترهای به‌کار گرفته‌شده، پارامترهای ساختمان ۳ طبقه‌ی سمت چپ دارای اندیس «L»، پارامترهای ساختمان ۳ طبقه‌ی سمت راست دارای اندیس «R» و پارامترهای ساختمان ۲ طبقه‌ی میانی دارای اندیس «C» هستند. پارامترهای در نظر گرفته‌شده به این صورت تعریف شده‌اند: $k_{\phi_{iL}}, k_{\phi_{iC}}, k_{\phi_{iR}}$: به ترتیب سختی اولیه‌ی فشرده‌ی دورانی ستون‌های طبقه‌ی i ام ساختمان‌های راست، میانی و چپ؛

$C_{\phi_{iL}}, C_{\phi_{iC}}, C_{\phi_{iR}}$: به ترتیب ضریب میرایی دورانی ستون‌های طبقه‌ی i ام ساختمان‌های راست، میانی و چپ؛

m_{iL}, m_{iC}, m_{iR} : به ترتیب جرم طبقه‌ی i ام ساختمان‌های راست، میانی و چپ؛ $L_L = L_C = L_R = L$: طول ساختمان‌ها؛

d : فاصله‌ی اولیه بین ساختمان‌ها؛

h : ارتفاع طبقات؛

$I_i = \frac{1}{12} m_i L^2$: ممان اینرسی جرمی تیر i ام؛

F_I : نیروی ضربه بین ساختمان‌های مجاور؛

ϕ_{ij} : دوران نسبی j امین ستون از طبقه‌ی i ام؛

$u_{gi}, v_{gi}, \theta_{gi}$: به ترتیب جابه‌جایی افقی، عمودی و دورانی حرکت زمین در پای i امین ستون؛

$U_{Gi}, V_{Gi}, \theta_{Gi}$: به ترتیب جابه‌جایی مطلق افقی، عمودی و دورانی مرکز نقل کف i ام.

۱.۲. معادلات حرکت ساختمان ۳ طبقه‌ی سمت چپ تحت حرکات

ناهمگون پایه‌ها

شکل ۲، مدل تغییرشکل یافته‌ی ساختمان ۳ طبقه‌ی سمت چپ تحت نیروهای ضربه F_I و حرکات ناهمگون پایه‌ها را نشان می‌دهد.

جابه‌جایی‌های مطلق افقی و عمودی دو انتهای تیر i ام با توجه به شکل ۲

جابه‌جایی ساختمان سبک‌تر و انعطاف‌پذیرتر به تغییرات جزئی در پارامترهای مختلف سازه‌یی مانند: فاصله بین ساختمان‌ها، جرم طبقه، سختی سازه‌یی، و مقاومت تسلیم بسیار حساس است. از سوی دیگر، تأثیر این پارامترها در پاسخ ساختمان سنگین‌تر و سخت‌تر نامحسوس است. همچنین زمین‌لرزه‌های نزدیک گسل به جهت فاصله‌ی کم بین محل شکست گسل، که همان منبع تولید موج است و محل دریافت آن به لحاظ محتوای بسامدی بالا بسیار غنی است و در عین حال پالس سرعت با دوره‌ی تناوب بالا نیز در رکورد آنها مشاهده می‌شود.^[۴] هر چند آیین‌نامه‌های موجود برای قسمت بسامد بالای رکورد راهکارهایی ارائه می‌دهند، لیکن پالس سرعت با دوره‌ی تناوب بالا به عنوان یک عامل مخرب مطرح است. همچنین طیف نیروی ضربه تحت زلزله‌های حوزه‌های دور و نزدیک مورد بررسی قرار گرفته و ضمن در نظر گرفتن پارامترهای مختلفی همچون جرم و درصد میرایی سازه نشان داده شده است که بسته به مشخصه‌های رکورد زلزله و خصوصیات سازه‌های مجاور، افزایش فاصله‌ی بین آنها می‌تواند سبب افزایش نیروی ضربه شود.^[۵] در مطالعه‌ی دیگری نیز اثر ضربه در ساختمان‌های بتنی با و بدون جداگر لرزه‌یی تحت زلزله‌های نزدیک گسل مورد مطالعه قرار گرفته و ضمن ارائه‌ی مدل ضربه‌ی پیشنهادی به مقایسه‌ی آن با مدل‌های دیگر پرداخته شده است.^[۶]

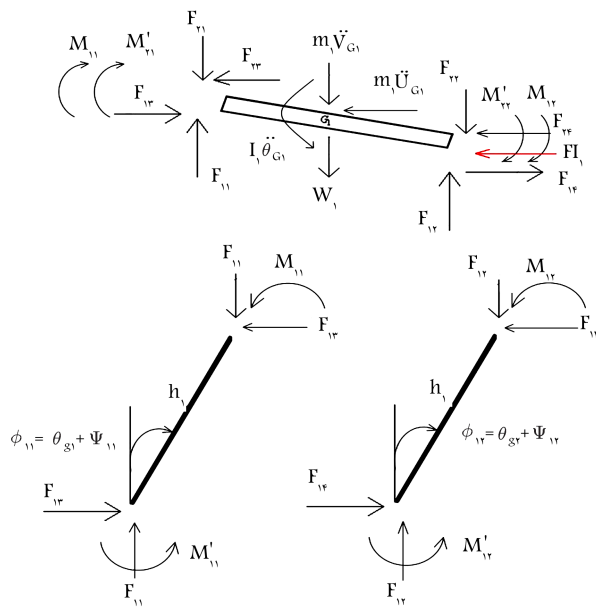
در محدوده‌ی نزدیک گسل، زمین‌لرزه متأثر از مکانیزم گسیختگی یا گسلش، جهت انتشار گسیختگی نسبت به محل و جابه‌جایی‌های ماندگار زمین ناشی از لغزش نکتونیک گسل است.^[۷] پژوهش‌ها نشان داده‌اند که حرکات پالسی شکل زمین در نزدیک گسل و خصوصاً دامنه و دوره‌ی تناوب پالس سرعت، اثر چشم‌گیری در عملکرد سازه‌ها دارد.^[۷] همچنین مدل ساده‌یی از ساختمان‌های مجاور ۱ و ۲ طبقه تحت مؤلفه‌های افقی و عمودی حاصل از حرکات عمود بر گسل و موازی گسل با بزرگا و اختلاف فازهای مختلف مورد بررسی قرار گرفته و نشان داده شده است که رفتار غیرخطی مصالح و تغییر شکل‌های خمیری، بیشینه نیروی ضربه و کمینه فاصله‌ی لازم جهت جلوگیری از ضربه را به شکل چشم‌گیری نسبت به حالت خطی کاهش می‌دهد و نیز اختلاف فاز حرکات ورودی پایه‌ها می‌تواند سبب افزایش ۱/۵ تا ۲ برابری بیشینه نیروی ضربه و کمینه فاصله‌ی لازم جهت جلوگیری از ضربه شود، که در این بزرگ‌نمایی مؤلفه‌ی افقی حرکت زمین نقش عمده را بازی می‌کند و مؤلفه‌های قائم و دورانی حرکت زمین، نقش چندانی ندارند.^[۸]

در پژوهش حاضر، مدلی ساده از ساختمان‌های ۳، ۲ و ۳ طبقه که به صورت سری مجاور هم قرار گرفته‌اند، در نظر گرفته شده و هدف بررسی رفتار ساختمان‌های میانی و انتهایی و نیز برآوردی از بیشینه نیروی ضربه‌ی قابل انتظار و کمینه فاصله‌ی لازم جهت جلوگیری از برخورد آنها تحت پالس‌های نزدیک گسل با بزرگا و اختلاف فازهای مختلف است.

۲. مدل دینامیکی

شکل ۱، مدل دینامیکی ساختمان‌های ۳، ۲ و ۳ طبقه‌ی مجاور را نشان می‌دهد، که توسط المان ویسکوالاستیک غیرخطی که فرایند برخورد را شبیه‌سازی می‌کند، به یکدیگر متصل شده‌اند.

طبقات هر ساختمان متشکل از تیر صلب است، که توسط ستون‌های بدون جرم و با صلبیت محوری نگه داشته شده است. ستون‌ها با فشرده‌ی دورانی غیرخطی و میراگرهای دورانی خطی به دیگر طبقات یا زمین متصل‌اند. فشرده‌ی دورانی، بیان‌گر سختی خمشی ستون‌ها و میراگرهای دورانی نشان‌دهنده‌ی میرایی ساختمان



شکل ۳. دیاگرام آزاد طبقه‌ی اول ساختمان ۳ طبقه‌ی سمت چپ.

$$\theta_{G_i} = \sin^{-1} \left[\frac{v_{g1} - v_{g2} + h_1 \cos \phi_{11} - h_1 \cos \phi_{12}}{L} \right] \quad i = 2, \dots, n$$

$$U_{G_i} = U_{G_{i-1}} + \frac{h_i}{\gamma} [\sin(\theta_{G_{i-1}} + \phi_{i1}) + \sin(\theta_{G_{i-1}} + \phi_{i2})]$$

$$i = 2, \dots, n$$

$$V_{G_i} = V_{G_{i-1}} - \frac{h_i}{\gamma} [2 - \cos(\theta_{G_{i-1}} + \phi_{i1}) - \cos(\theta_{G_{i-1}} + \phi_{i2})]$$

$$i = 2, \dots, n$$

$$\theta_{G_i} = \sin^{-1} \left\{ \sin \theta_{G_{i-1}} + \frac{h_i}{L} [\cos(\theta_{G_{i-1}} + \phi_{i1}) - \cos(\theta_{G_{i-1}} + \phi_{i2})] \right\} \quad i = 2, \dots, n \quad (3)$$

شکل ۳، دیاگرام آزاد تیر و ستون‌های طبقه‌ی اول از ساختمان ۳ طبقه‌ی سمت چپ را بعد از تغییر شکل نشان می‌دهد. با توجه به شکل ۳، می‌توان معادلات تعادل طبقه‌ی اول را به صورت مجموعه روابط ۴ نوشت:

$$\sum F_X = 0 \Rightarrow -m_{1L} \ddot{U}_{G_1} - F_{12} - F_{22} + F_{12} + F_{12} - F_{12} = 0$$

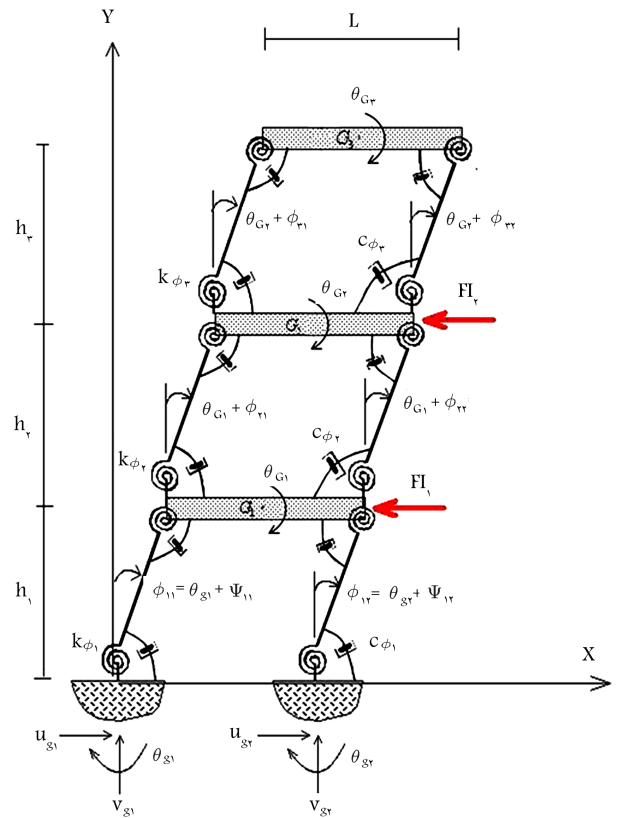
$$\sum F_Y = 0 \Rightarrow -m_{1L} \ddot{V}_{G_1} - F_{11} - F_{21} + F_{11} + F_{12} - W_1 = 0$$

$$\begin{aligned} \sum M_G = 0 \Rightarrow & M'_{11} + M'_{12} + M_{11} + M_{12} - I_{1L} \ddot{\theta}_{G_1} \\ & + \frac{L}{\gamma} \cos \theta_{G_1} (F_{11} - F_{21} + F_{22} - F_{12}) \\ & + \frac{L}{\gamma} \sin \theta_{G_1} (F_{12} - F_{22} + F_{21} - F_{11} + F_{12}) = 0 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \sum M_{11} = 0 \Rightarrow & -M_{11} - M'_{11} + F_{11} h_1 \sin \phi_{11L} \\ & - F_{12} h_1 \cos \phi_{11L} = 0 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \sum M_{12} = 0 \Rightarrow & -M_{12} - M'_{12} + F_{12} h_1 \sin \phi_{12L} \\ & - F_{11} h_1 \cos \phi_{12L} = 0 \end{aligned} \quad (4)$$

که در آن‌ها، $M_{11}, M_{12}, M'_{11}, M'_{12}$ لنگرهای خمشی داخلی هستند و مطابق



شکل ۲. مدل تغییر شکل یافته‌ی ساختمان ۳ طبقه‌ی سمت چپ.

به صورت مجموعه روابط ۱ تعیین می‌شوند:

$$\begin{aligned} u_{T_{i1}} &= U_{G_i} + \frac{L}{\gamma} (1 - \cos \theta_{G_i}) & i = 1, 2, \dots, n \\ u_{T_{i2}} &= U_{G_i} - \frac{L}{\gamma} (1 - \cos \theta_{G_i}) & i = 1, 2, \dots, n \\ v_{T_{i1}} &= V_{G_i} + \frac{L}{\gamma} \sin \theta_{G_i} & i = 1, 2, \dots, n \\ v_{T_{i2}} &= V_{G_i} - \frac{L}{\gamma} \sin \theta_{G_i} & i = 1, 2, \dots, n \end{aligned} \quad (1)$$

جابجایی‌های مطلق افقی و عمودی بالای ستون‌ها به صورت مجموعه روابط ۲ تعیین می‌شوند:

$$\begin{aligned} u_{T_{i1}} &= u_{T_{(i-1)1}} + h_i \sin(\theta_{G_{i-1}} + \phi_{i1}) & i = 1, 2, \dots, n \\ v_{T_{i1}} &= v_{T_{(i-1)1}} - h_i [1 - \cos(\theta_{G_{i-1}} + \phi_{i1})] & i = 1, 2, \dots, n \\ u_{T_{i2}} &= u_{T_{(i-1)2}} + h_i \sin(\theta_{G_{i-1}} + \phi_{i2}) & i = 1, 2, \dots, n \\ v_{T_{i2}} &= v_{T_{(i-1)2}} - h_i [1 - \cos(\theta_{G_{i-1}} + \phi_{i2})] & i = 1, 2, \dots, n \end{aligned} \quad (2)$$

با ترکیب روابط ۱ و ۲، مجموعه‌ی روابط ۳ را خواهیم داشت:

$$\begin{aligned} U_{G_i} &= \frac{1}{\gamma} (u_{g1} + u_{g2} + h_1 \sin \phi_{11} + h_1 \sin \phi_{12}) & i = 2, \dots, n \\ V_{G_i} &= \frac{1}{\gamma} [(v_{g1} + v_{g2} - h_1 (1 - \cos \phi_{11}) - h_1 (1 - \cos \phi_{12}))] & i = 2, \dots, n \end{aligned}$$

تعداد طبقات است).^[۹] همچنین توزیع میرایی در طبقات نیز مطابق توزیع جرم و سختی در نظر گرفته شده است.

$$\begin{aligned} m_j &= \left(1 - \frac{j-1}{N-1}\right) m_1 \quad j = 1, 2, \dots, N \\ k_{\phi_j} &= \left(1 - \frac{j-1}{N-1}\right) k_{\phi_1} \quad j = 1, 2, \dots, N \\ C_{\phi_j} &= \left(1 - \frac{j-1}{N-1}\right) C_{\phi_1} \quad j = 1, 2, \dots, N \end{aligned} \quad (9)$$

با تشکیل ماتریس‌های جرم، سختی و میرایی و حل معادله‌ی مشخصه به صورت مجموعه روابط ۱۰، می‌توان مقادیر سختی و میرایی دورانی را با توجه به دوره‌ی تناوب و میرایی مود اول به دست آورد:

$$\begin{aligned} |K - \omega^2 M| = 0 &\Rightarrow \left(\frac{4k_{\phi_1}}{h_1^3} + \frac{4k_{\phi_2}}{h_2^3} - \omega^2 m_1 \right) \\ &\left(\frac{4k_{\phi_2}}{h_2^3} + \frac{4k_{\phi_3}}{h_3^3} - \omega^2 m_2 \right) \left(\frac{4k_{\phi_3}}{h_3^3} - \omega^2 m_3 \right) \\ &- \left(\frac{4k_{\phi_2}}{h_2^3} \right)^2 \times \left(\frac{4k_{\phi_1}}{h_1^3} + \frac{4k_{\phi_2}}{h_2^3} - \omega^2 m_1 \right) \\ &- \left(\frac{4k_{\phi_3}}{h_3^3} \right)^2 \times \left(\frac{4k_{\phi_2}}{h_2^3} - \omega^2 m_2 \right) = 0 \\ T_1 &= 0.3 \text{ sec} \xrightarrow{Eg \cdot (10)} \frac{4k_{\phi_1}}{m_1 h_1^3} = 1798.31 \\ \xi_1 &= 0.05 \Rightarrow \frac{C_{\phi_1}}{m_1 h_1^3} = 2.14 \end{aligned} \quad (10)$$

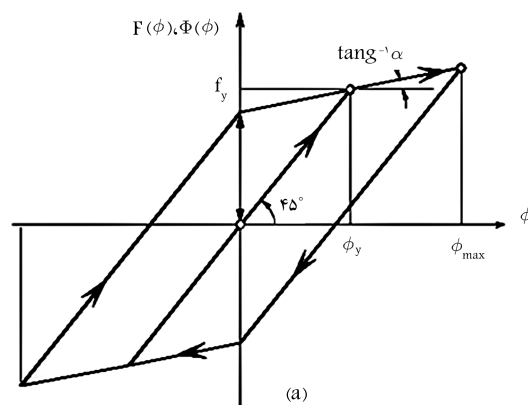
۲.۲. معادلات حاکم بر کل سیستم

با در نظر گرفتن روندی مشابه برای به دست آوردن معادلات تعادل ساختمان‌های ۲ طبقه‌ی میانی و ۳ طبقه‌ی سمت راست و با در نظر گرفتن نیروهای ضربه در طبقات تحت برخورد، دستگاه معادلات غیرخطی حاکم بر کل سیستم را می‌توان به صورت مجموعه روابط ۱۱ به دست آورد، که به روش رانگ کوتای مرتبه‌ی چهارم قابل حل است:

$$\begin{cases} z_{11L}\ddot{\phi}_{11L} + z_{12L}\ddot{\phi}_{21L} + z_{13L}\ddot{\phi}_{31L} + z_{14L} = 0 \\ z_{21L}\ddot{\phi}_{11L} + z_{22L}\ddot{\phi}_{21L} + z_{23L}\ddot{\phi}_{31L} + z_{24L} = 0 \\ z_{31L}\ddot{\phi}_{11L} + z_{32L}\ddot{\phi}_{21L} + z_{33L}\ddot{\phi}_{31L} + z_{34L} = 0 \\ z_{11C}\ddot{\phi}_{11C} + z_{12C}\ddot{\phi}_{21C} + z_{13C} = 0 \\ z_{21C}\ddot{\phi}_{11C} + z_{22C}\ddot{\phi}_{21C} + z_{23C} = 0 \\ z_{11R}\ddot{\phi}_{11R} + z_{12R}\ddot{\phi}_{21R} + z_{13R}\ddot{\phi}_{31R} + z_{14R} = 0 \\ z_{21R}\ddot{\phi}_{11R} + z_{22R}\ddot{\phi}_{21R} + z_{23R}\ddot{\phi}_{31R} + z_{24R} = 0 \\ z_{31R}\ddot{\phi}_{11R} + z_{32R}\ddot{\phi}_{21R} + z_{33R}\ddot{\phi}_{31R} + z_{34R} = 0 \end{cases} \quad (11)$$

۳.۲. شبیه‌سازی نیروی ضربه

جهت شبیه‌سازی نیروی ضربه (F_I) از مدل ویسکوالاستیک غیرخطی،^[۱۰] استفاده شده است، که در آن نیروی برخورد بین جرم‌های چپ (m_L) و راست (m_R)



شکل ۴. مدل سختی دوخطی برای فنرهای دورانی.

مجموعه‌ی روابط ۵ تعیین می‌شوند:

$$\begin{aligned} \frac{M_{11}}{m_{1L} h_1^3} &= \frac{K_{\phi_{1L}}}{m_{1L} h_1^3} F(\phi_{11L} - \theta_{G_{1L}}) + \frac{C_{\phi_{1L}}}{m_{1L} h_1^3} (\dot{\phi}_{11L} - \dot{\theta}_{G_{1L}}) = m_{11} \\ \frac{M_{12}}{m_{1L} h_1^3} &= \frac{K_{\phi_{1L}}}{m_{1L} h_1^3} F(\phi_{12L} - \theta_{G_{1L}}) + \frac{C_{\phi_{1L}}}{m_{1L} h_1^3} (\dot{\phi}_{12L} - \dot{\theta}_{G_{1L}}) = m_{12} \\ \frac{M'_{11}}{m_{1L} h_1^3} &= \frac{K_{\phi_{1L}}}{m_{1L} h_1^3} F(\phi_{11L} - \theta_{g_1}) + \frac{C_{\phi_{1L}}}{m_{1L} h_1^3} (\dot{\phi}_{11L} - \dot{\theta}_{g_1}) = m'_{11} \\ \frac{M'_{12}}{m_{1L} h_1^3} &= \frac{K_{\phi_{1L}}}{m_{1L} h_1^3} F(\phi_{12L} - \theta_{g_1}) + \frac{C_{\phi_{1L}}}{m_{1L} h_1^3} (\dot{\phi}_{12L} - \dot{\theta}_{g_1}) = m'_{12} \end{aligned} \quad (5)$$

که در آن ها، $F(\phi)$ تابع دوخطی مطابق شکل ۴ است.

معادله‌ی حرکت مستقل طبقه‌ی اول حاصل از رابطه‌ی ۴، به صورت رابطه‌ی ۶

خواهد بود:

$$\begin{aligned} -\frac{F_{I_1}}{m_{1L} L} - \frac{\ddot{U}_{G_{1L}}}{L} - \frac{C_{1L}^* (\ddot{V}_{G_{1L}} + g)}{L} - \frac{B_{1L}^* I_{1L} \ddot{\theta}_{G_{1L}}}{m_{1L} L^3} \\ + \frac{H_{1L}^* m_{1L} (\ddot{V}_{G_{1L}} + g)}{m_{1L} L} - \frac{G_{1L}^* I_{1L} \ddot{\theta}_{G_{1L}}}{m_{1L} L^3} \\ - \frac{I_{1L} \ddot{\theta}_{G_{1L}} K_{1L}^*}{m_{1L} L} + \frac{N_{1L}^* m_{1L} (\ddot{V}_{G_{1L}} + g)}{m_{1L} L} + I_{1L}^* = 0 \end{aligned} \quad (6)$$

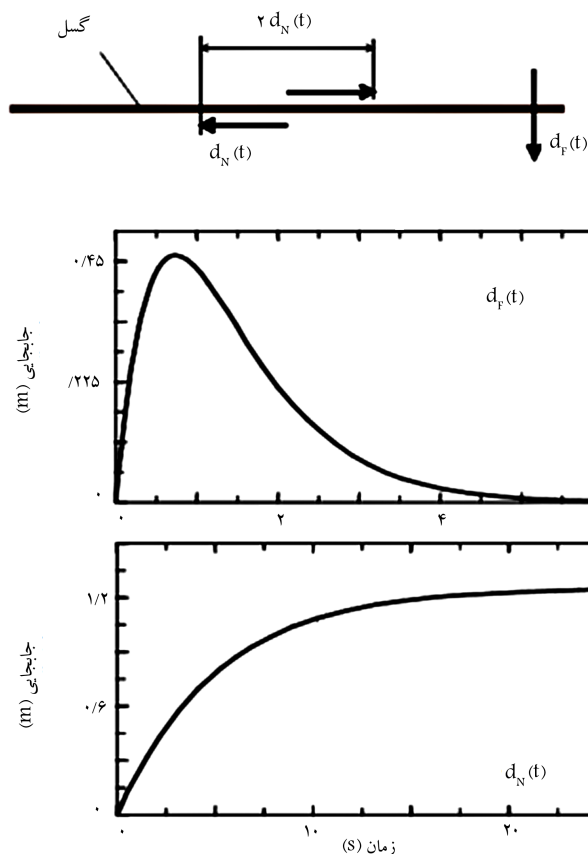
معادله‌ی ۶ بر حسب دوران‌های نسبی ستون‌ها به صورت رابطه‌ی ۷ نوشته می‌شود:

$$d_1 \ddot{\phi}_{11L} + d_2 \ddot{\phi}_{12L} + d_3 \ddot{\phi}_{21L} + d_4 \ddot{\phi}_{22L} + d_5 = 0 \quad (7)$$

به همین ترتیب با در نظر گرفتن معادلات تعادل طبقات دوم و سوم و نیز با توجه به صلبیت تیرها، دستگاه معادلات غیرخطی حرکت ساختمان ۳ طبقه سمت چپ به صورت مجموعه روابط ۸ به دست می‌آید، که در آن‌ها، Z_{ijL} توابعی غیرخطی از $\dot{\phi}_{ijL}$ ، ϕ_{ijL} ، نیروهای ضربه (F_I) و حرکات ورودی زمین هستند.

$$\begin{cases} Z_{11L}\ddot{\phi}_{11L} + Z_{12L}\ddot{\phi}_{21L} + Z_{13L}\ddot{\phi}_{31L} + Z_{14L} = 0 \\ Z_{21L}\ddot{\phi}_{11L} + Z_{22L}\ddot{\phi}_{21L} + Z_{23L}\ddot{\phi}_{31L} + Z_{24L} = 0 \\ Z_{31L}\ddot{\phi}_{11L} + Z_{32L}\ddot{\phi}_{21L} + Z_{33L}\ddot{\phi}_{31L} + Z_{34L} = 0 \end{cases} \quad (8)$$

توزیع جرم و سختی در طبقات به صورت مجموعه روابط ۹ در نظر گرفته شده است، که در آن صورت دوره‌ی تناوب اصلی ساختمان تقریباً برابر $1/N$ خواهد بود (N)



شکل ۵. حرکت در امتداد گسل، $d_N(t)$ ، و حرکت عمود بر گسل، $d_F(t)$ ، برای بزرگای $M = ۶$ [۱۸]

جدول ۱. ویژگی‌های جابه‌جایی عمود بر گسل. [۱۸]

| M | α_F (۱/s) | A_F (cm/s) | $d_{F,max}$ (cm) | $\dot{d}_{F,max}$ (cm/s) |
|-----|---------------------|-----------------|---------------------|-----------------------------|
| ۵ | ۷٫۹۰ | ۱۵۱٫۶۱ | ۷٫۰۶ | ۱۵۱٫۶۱ |
| ۶ | ۴٫۴۴ | ۵۴۶٫۹۷ | ۴۵٫۳۲ | ۵۴۶٫۹۷ |
| ۷ | (۲٫۵۰) | (۸۶۰٫۳۴) | (۱۲۶٫۶) | (۸۶۰٫۳۴) |

جدول ۲. ویژگی‌های جابه‌جایی در امتداد گسل. [۱۸]

| M | τ_N (s) | A_N (cm) | $d_{N,max}$ (cm) | $\dot{d}_{N,max}$ (cm/s) |
|-----|-----------------|---------------|---------------------|-----------------------------|
| ۵ | ۱٫۲ | ۲۹٫۲ | ۱۴٫۶ | ۱۲٫۱۷ |
| ۶ | ۱٫۸ | ۲۴۵٫۵ | ۱۲۲٫۷۵ | ۶۸٫۱۹ |
| ۷ | (۳٫۰) | (۱۲۸۸٫۰) | (۶۴۴٫۰) | (۲۱۴٫۷) |

از آنجایی که رکوردهای ثبت‌شده محدود به بزرگای $M = ۵$ هستند، لذا مقادیر A_F و α_F و همچنین A_N و τ_N به ازاء $M = ۷$ در جدول‌های ۱ و ۲ در داخل پارتیز نشان داده شده و مقادیر آنها از طریق رگرسیون به‌دست آمده است. [۱۸]

دامنه‌های d_F و d_N در تحلیل‌های رگرسیون متعددی براساس مشاهدات لغزش گسل و استفاده از روابط کاهندگی مورد مطالعه قرار گرفته است. لغزش گسل اغلب براساس متوسط جابه‌جایی گسل (\bar{u})، و به‌صورت $\bar{u} = ۲d_N$ تعریف می‌شود (شکل ۵). در شکل ۶، ناحیه‌ی قرمز رنگ که با $p = ۰٫۵$ مشخص شده است،

به‌صورت مجموعه روابط ۱۲ تعریف می‌شود:

$$F_I(t) = 0 \text{ for } \delta(t) \leq 0$$

$$F_I(t) = \bar{\beta}\delta^{\tau_F}(t) + \bar{c}(t)\dot{\delta}(t) \text{ for } \delta(t) > 0 \text{ and } \dot{\delta}(t) > 0$$

$$F_I(t) = \bar{\beta}\delta^{\tau_F}(t) \text{ for } \delta(t) > 0 \text{ and } \dot{\delta}(t) \leq 0$$

$$\delta(t) = u_L(t) - u_R(t) - d$$

$$\bar{\beta} = ۲٫۷۵ \times ۱۰^{-۹}$$

$$\bar{\xi} = ۰٫۳۵ \quad (e = ۰٫۶۵) \quad (۱۲)$$

که در آن، u_R و u_L به‌ترتیب جابه‌جایی جرم‌های m_R و m_L است و d نیز فاصله‌ی اولیه بین آنهاست. $\bar{\beta}$ بیان‌گر سختی ضربه و بستگی به سختی مصالح دارد. $\bar{c}(t)$ بیان‌گر میرایی مدل است و در هر لحظه به‌صورت رابطه‌ی ۱۳ تعریف می‌شود:

$$\bar{c}(t) = ۲\bar{\xi}\sqrt{\bar{\beta}\sqrt{\delta(t)}}\frac{m_L m_R}{m_L + m_R} \quad (۱۳)$$

که در آن، $\bar{\xi}$ نسبت میرایی برخورد است، که تابعی از میزان اتلاف انرژی در طول برخورد (e) است. یک رابطه‌ی تقریبی بین $\bar{\xi}$ و e در مدل ویسکوالاستیک غیرخطی به شکل رابطه‌ی ۱۴ ارائه شده است: [۱۰]

$$\bar{\xi} = \frac{۹\sqrt{\delta}}{۲} \frac{1 - e^2}{e(e(9\pi - ۱۶) + ۱۶)} \quad (۱۴)$$

مقادیر پارامترهای ضربه به‌صورت روابط ۱۵ در نظر گرفته شده است: [۱۰]

$$\bar{\beta} = ۲٫۷۵ \times ۱۰^{-۹} \text{ N/m}^{\tau_F} \quad (۱۵)$$

$$\bar{\xi} = ۰٫۳۵ \quad (e = ۰٫۶۵)$$

۳. حرکت زمین در نزدیک گسل

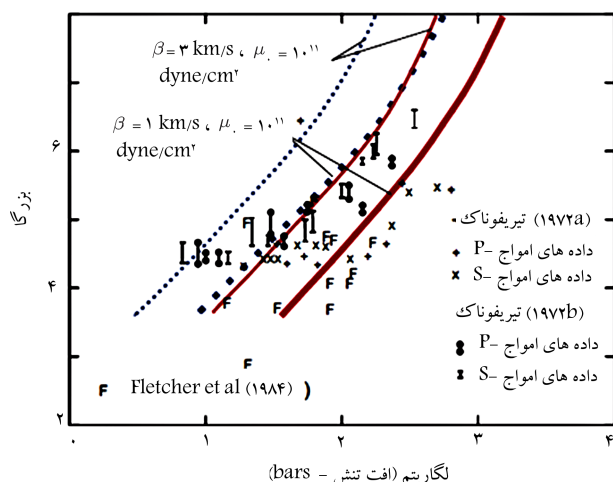
حرکت زمین در نزدیک گسل به علت توزیع نامنظم لغزش، توزیع غیریکنواخت صلبیت در اطراف گسل، توزیع غیریکنواخت تنش بر سطح گسل و فرایند پیچیده و غیرخطی گسلش، بسیار پیچیده است و لذا امکان پیش‌بینی جزئیات حرکت گسل وجود ندارد. [۱۲، ۱۱] در این نوشتار، از روشی ساده استفاده شده و حرکت گسل با پالس‌هایی که متوسط دامنه و مدت زمان آنها براساس مشاهدات و رکوردهای ثبت‌شده، کالیبره شده‌اند، مدل شده است. [۱۴، ۱۳] شکل ۵، گسل و حرکات آن را نشان می‌دهد. حرکت d_N بیان‌گر افزایش تدریجی جابه‌جایی در امتداد گسل و به سمت جابه‌جایی استاتیکی دائمی است، در حالی که d_F بیان‌گر پالس در امتداد عمود بر گسل است. [۱۵] انگیزه‌ی انتخاب این‌گونه پالس‌ها را می‌توان در برخی مطالعات پیشین، [۱۷، ۱۶] مشاهده کرد. حرکت عمود بر گسل نیز با استفاده از رابطه‌ی ۱۶ تعریف می‌شود: [۱۸]

$$d_F(t) = A_F t e^{-\alpha_F t} \quad (۱۶)$$

که در آن، مقادیر A_F و α_F به ازاء بزرگای مختلف زلزله در جدول ۱ نشان داده شده‌اند. برای حرکت در امتداد گسل نیز از رابطه‌ی ۱۷ استفاده شده است: [۱۸]

$$d_N(t) = \frac{A_N}{\tau} \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}\right) \quad (۱۷)$$

که در آن، مقادیر A_N و τ_N به ازاء بزرگای مختلف زلزله در جدول ۲ ارائه شده‌اند.



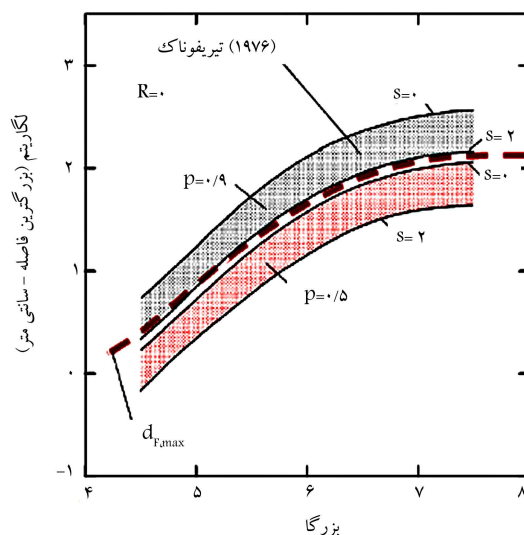
شکل ۸. اندازه‌گیری میزان افت تنش در سطح گسل با استفاده از رکوردهای ثبت شده در نزدیکی آن و مقایسه‌ی آن با میزان افت تنش حاصل از d_F (خطوط پیوسته: جدول ۱) و d_N (خطوط نقطه‌چین: جدول ۲) به‌کارگرفته‌شده در نوشتار حاضر. [۲۰]

منحنی خط‌چین، دامنه‌ی $2d_{N,max}$ به‌کاررفته در این نوشتار را نشان می‌دهد (مطابق جدول ۲)، که تطابق خوبی با دیگر نتایج دارد.

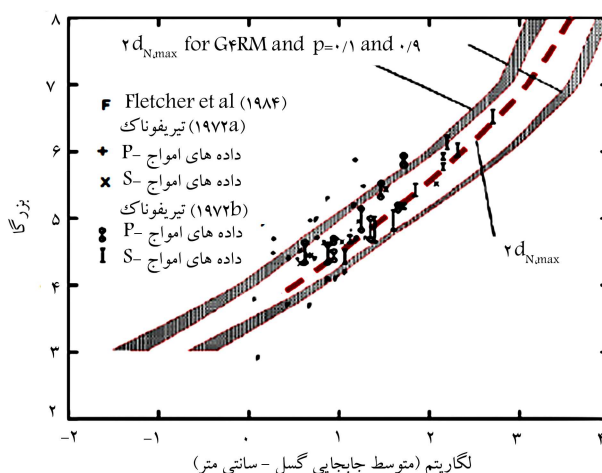
خاصیت فیزیکی مهم توابع d_F و d_N به‌کاررفته در نوشتار حاضر، سرعت اولیه‌ی آنهاست. می‌توان نشان داد $d_F \sim \sigma\beta/\mu$ ، که در آن، σ برابر تنش مؤثر در سطح گسل، β سرعت موج برشی در ناحیه‌ی گسلش، و μ صلیبیت ناحیه‌ی اطراف گسل است. برای d_N می‌توان نشان داد که در زمان $t = 0$ ، $d_N = 0.5C_0\sigma\beta/\mu$ ، و مقادیر C_0 برابر ۰، ۱، ۰.۶۵ و ۱.۵۲ برای بزرگای زلزله‌ی ۵، ۶ و ۷ است. [۲۳] بزرگ‌ترین مقدار سرعت مشاهده‌شده تاکنون برابر ۱۷۰ cm/s است، که حدود ۵ تا ۱۰ کیلومتری بالاتر از گسل و طی زلزله‌ی نورث‌ریج کالیفرنیا (۱۹۹۴) ثبت شده است. [۲۳] از آنجایی که هیچ‌گونه اندازه‌گیری سرعت بر روی سطح گسل وجود ندارد، لذا بیشینه سرعت d_F و d_N را می‌توان فقط به شکل غیرمستقیم بر حسب تنش ارزیابی کرد. دقت اندازه‌گیری تنش بستگی به فرضیات و روش‌های به‌کارگرفته‌شده جهت تفسیر رکوردهای ثبت‌شده دارد. بنابراین با حل معادلات فوق بر حسب σ ، می‌توان از $\sigma \sim 2\mu d_N/(\beta C_0)$ برای حرکت در امتداد گسل (خطوط نقطه‌چین در شکل ۸) و $\sigma \sim \mu d_F/\beta$ برای حرکت عمود بر گسل (خطوط پیوسته در شکل ۸) جهت مقایسه با دیگر مطالعات انجام‌شده بر روی تنش استفاده کرد. شکل ۸، این مقایسه را به ازاء مقادیر معمول μ و β نشان می‌دهد.

۴. پاسخ لرزه‌یی ۳ ساختمان مجاور تحت حرکات نزدیک گسل

در مهندسی زلزله اغلب فرض می‌شود امواج لرزه‌یی همزمان به پایه‌های سازه می‌رسند و از اثر انتشار امواج در خاک چشم‌پوشی می‌شود. این بدین معنی است که امواج لرزه‌یی یا به‌طور قائم به سازه برخورد می‌کنند و یا طول موجی بسیار بزرگ‌تر از ابعاد سازه دارند. اما به‌طور کلی امواج لرزه‌یی ممکن است به‌طور مایل به سازه برخورد کنند و طول موجی قابل قیاس با ابعاد سازه داشته باشند. در این شرایط باید اثر تحریکات ناهمگون پایه‌ها در تحلیل‌های دینامیکی لحاظ شود. ماهیت حرکت نسبی ستون‌های واقع بر پی‌های منفرد یا گسترده به عوامل مختلفی از جمله: نوع فونداسیون، سختی تیر و دال‌های اتصال، ویژگی‌های خاک اطراف



شکل ۶. دامنه‌ی تغییرات بیشینه جابه‌جایی تعیین‌شده‌ی زمین ($d_{F,max}$) توسط آنالیز رگرسیون رکوردهای ثبت‌شده. [۲۰]

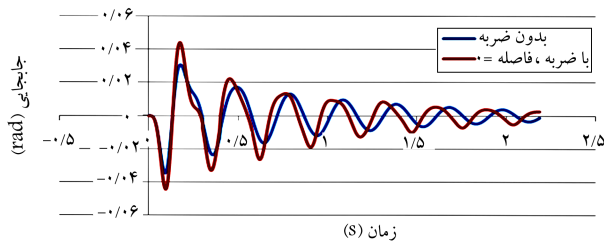


شکل ۷. مقایسه‌ی بین بیشینه دامنه‌ی جابه‌جایی حرکت زمین در امتداد گسل محاسبه‌شده توسط مدل‌های رگرسیون GFRM و با استفاده از دامنه‌ی رکوردهای ثبت‌شده (ناحیه‌ی خاکستری رنگ به ازاء $p = 0.9$ و $p = 0.1$) با دامنه‌ی $2d_{N,max}$ (جدول ۲) به‌کارگرفته‌شده در نوشتار حاضر (منحنی خط‌چین). [۲۰]

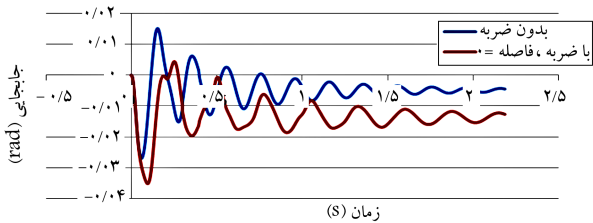
متوسط بیشینه جابه‌جایی زمین (d_{max}) را بر حسب بزرگای زلزله و در مرکز زلزله ($R = 0$) برای تمام خاک‌ها از نوع رسوبی ($s = 0$) تا خاک‌های صخره‌یی ($s = 2$) نشان می‌دهد. ناحیه‌ی خاکستری رنگ، بیشینه جابه‌جایی زمین را با احتمال وقوع ۹۰٪ ($p = 0.9$) نشان می‌دهد. [۲۰، ۱۹] در شکل مذکور، بیشینه دامنه‌ی d_F ، $d_{F,max}$ ، که در جدول ۱ ارائه شده است، به‌صورت منحنی خط‌چین نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، دامنه‌ی $d_{F,max}$ با نتایج حاصل از رگرسیون اطلاعات ثبت‌شده در دوراز گسل تطابق خوبی دارد.

شکل ۷، متوسط دامنه‌ی جابه‌جایی گسل ($\bar{u} = 2d_N$)، بر حسب بزرگای زلزله را نشان می‌دهد. علائم مختلف به‌کاررفته در شکل مذکور، نتایج حاصل از مطالعات دیگر پژوهشگران را نشان می‌دهد. [۲۲، ۲۱، ۱۹]

در حالی که محدوده‌ی بین ۲ ناحیه‌ی خاکستری رنگ، بیشینه دامنه‌ی $\bar{u} = 2d_N$ را با قابلیت اعتماد ۸۰٪ و براساس مدل رگرسیون (GFRM) نشان می‌دهد. [۲۳، ۲۲]

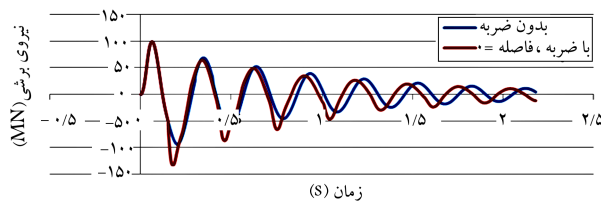


الف) طبقه سوم ساختمان سمت راست در حالت خطی؛

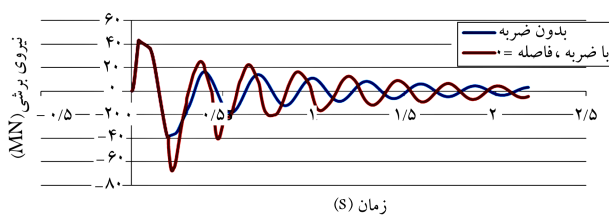


ب) طبقه دوم ساختمان میانی در حالت غیر خطی.

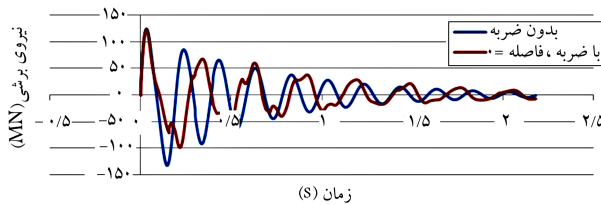
شکل ۹. تاریخچه‌ی زمانی جابه‌جایی نسبی ساختمان‌های مجاور با دوره‌های تناوب $T_L = 0.3$, $T_C = 0.2$, $T_R = 0.3$ تحت پالس عمود برگسل با بزرگای $M = 7$.



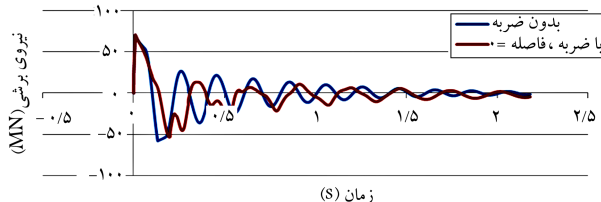
الف) برش طبقه دوم ساختمان سمت چپ در حالت خطی؛



ب) برش طبقه دوم ساختمان سمت چپ در حالت غیر خطی؛



ج) برش طبقه اول ساختمان میانی در حالت خطی؛



د) برش طبقه اول ساختمان میانی در حالت غیر خطی.

شکل ۱۰. تاریخچه‌ی زمانی برش طبقات ۳ ساختمان مجاور با دوره‌های تناوب $T_L = 0.3$, $T_C = 0.2$, $T_R = 0.3$ تحت پالس عمود برگسل با بزرگای $M = 7$.

فونداسیون، نوع و جهت امواج لرزه‌یی بستگی دارد. در این نوشتار فرض شده است که ساختمان‌های مجاور در نزدیکی گسل و تحت مؤلفه‌های افقی و عمودی حرکت زمین قرار داشته و اثر اختلاف فاز تحریکات پایه‌ها در بیشینه نیروی ضربه و کمینه فاصله جهت جلوگیری از برخورد مورد بررسی قرار گرفته است. ستون‌ها بر روی پی‌های منفرد قرار داشته و از اندرکنش خاک و سازه صرف‌نظر شده است. محور طولی سازه‌های مجاور، یعنی محور X ، منطبق بر محور انتشار موج یعنی محور r از منبع زمین‌لرزه است و تحریکات زمین‌لرزه، جابه‌جایی متفاوتی در پای ستون‌ها ایجاد می‌کند. در شکل ۱، انتشار امواج زمین‌لرزه از سمت چپ (پایه ۱) به سمت راست (پایه ۴) فرض شده و تحریکات در پای ستون‌ها، دامنه‌های مشابه، ولی با اختلاف فاز دارند. خاطرنشان می‌شود اختلاف فاز (تأخیر زمانی) بین حرکت پایه‌ها، به فاصله‌ی آنها و سرعت فاز افقی موج عبوری (C_x) بستگی دارد. مطابق شکل ۱، سیستم در پای ستون‌ها تحت حرکات هم‌زمان افقی و عمودی زمین (u_{gi} , v_{gi} , $i = 1, 2, 3, 4$) قرار گرفته است، به‌طوری که مجموعه روابط ۱۸ را خواهیم داشت:

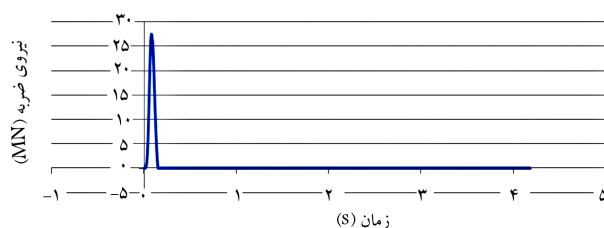
$$\begin{aligned} u_{gr}(t) &= u_{g1}(t - \tau/3) \\ u_{gr}(t) &= u_{g1}(t - 2\tau/3) \\ u_{gr}(t) &= u_{g1}(t - \tau) \\ v_{gr}(t) &= v_{g1}(t - \tau/3) \\ v_{gr}(t) &= v_{g1}(t - 2\tau/3) \\ v_{gr}(t) &= v_{g1}(t - \tau) \\ \theta_{g1}(t) &= \theta_{g2}(t) = \theta_{g3}(t) = \theta_{g4}(t) = 0 \\ \tau &= \frac{L_L + L_C + L_R}{C_x} \end{aligned} \quad (18)$$

که در آن، τ میزان اختلاف فاز یا همان تأخیر زمانی است. به جهت ساده‌سازی در نوشتار حاضر، حرکت قائم زمین برابر با حرکت افقی فرض شده است $[v_{gi}(t) = u_{gi}(t)]$. مؤلفه‌های عمود برگسل و موازی گسل حرکت افقی زمین ($u_{gi}(t)$) به ترتیب با استفاده از معادلات ۱۶ و ۱۷ تعریف می‌شوند. طول هر کدام از ساختمان‌ها فازهای متفاوتی در نظر گرفته شده است $(\tau = 0.7, 0.3, 0.5, 0.7, 1 \text{ sec})$. ارتفاع طبقات برابر ۳/۵ متر بوده و دوره‌ی تناوب مود اول ساختمان‌های ۳ طبقه برابر ۰/۳ و ۰/۶ ثانیه و دوره‌ی تناوب مود اول ساختمان ۲ طبقه نظیر به نظیر برابر ۰/۲ و ۰/۴ ثانیه فرض شده است. توزیع جرم، سختی و میرایی در طبقات توسط رابطه‌ی ۹ تعریف شده و جرم طبقه‌ی اول ساختمان‌ها برابر $m_{1R} = m_{1C} = m_{1L} = 360 \text{ ton}$ در نظر گرفته شده است. درصد میرایی مود اول ساختمان‌ها، ۵٪ فرض شده و در تحلیل‌های غیرخطی نیز رفتار فنرهای دورانی طبقات به صورت کشسان - خمیری با حد تسلیم $\phi_y = 0.01$ در نظر گرفته شده است. ساختمان‌های مجاور تحت اثر هم‌زمان حرکات نزدیک گسل، نیروی ضربه‌ی ناشی از برخورد و نیروی وزن قرار گرفته و رفتار غیرخطی مصالح و اثر تغییرشکل‌های بزرگ نیز در نظر گرفته شده است.

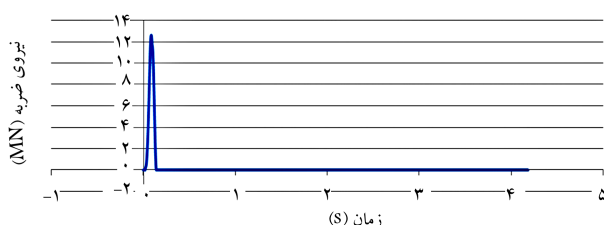
شکل‌های ۹ و ۱۰، به ترتیب تاریخچه‌ی زمانی جابه‌جایی نسبی و نیروی برشی طبقات را تحت پالس عمود برگسل با بزرگای $M = 7$ برای حالت‌های خطی و غیرخطی نشان می‌دهند، که مطابق آن‌ها نیروی ضربه می‌تواند سبب افزایش بیشینه جابه‌جایی نسبی و تغییرشکل ماندگار و نیز بیشینه نیروی برشی طبقات شود و این

افزایش در ساختمان‌های انتهایی، که از یک طرف ضربه می‌خورند، چشم‌گیرتر از ساختمان میانی، که از دو طرف ضربه می‌خورد، است و این روند برای دوره‌های تناوب $T_L = 0.6, T_C = 0.4, T_R = 0.6$ نیز مشاهده می‌شود.

شکل‌های ۱۱ و ۱۲، به ترتیب تاریخچه‌ی زمانی نیروی ضربه بین طبقات و نیز چگونگی تغییرات بیشینه نیروی ضربه‌ی طبقات بر حسب فاصله‌ی اولیه بین ساختمان‌های مجاور تحت پالس عمود برگسل با بزرگای $M = 7$ را نشان می‌دهند، که مطابق آن‌ها با افزایش فاصله‌ی اولیه بین ساختمان‌ها لزوماً ضربه کاهش نیافته و بیشینه ضربه ممکن است در فاصله‌ی $d > 0$ رخ دهد، موضوعی که در پژوهشی در سال ۱۳۹۲ [۵] نیز به آن اشاره شده است. همچنین وقتی رفتار مصالح خطی

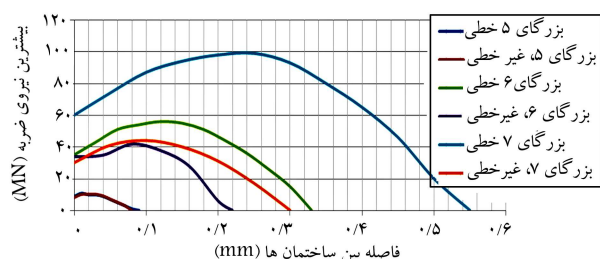


الف) ضربه‌ی بین طبقه‌ی دوم ساختمان‌های سمت چپ و میانی؛

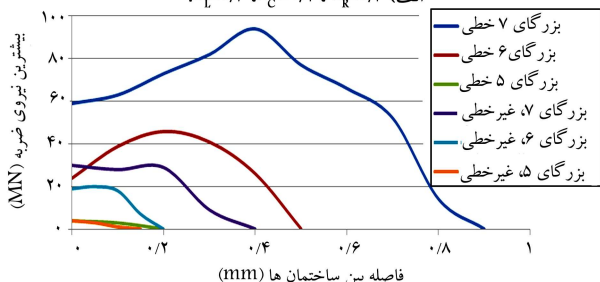


ب) ضربه‌ی بین طبقه اول ساختمان‌های سمت چپ و میانی.

شکل ۱۱. تاریخچه‌ی زمانی نیروی ضربه بین طبقات ۳ ساختمان مجاور با دوره‌های تناوب $T_L = 0.3, T_C = 0.2, T_R = 0.3$ تحت پالس عمود برگسل با بزرگای $M = 7$ و در حالت غیرخطی وقتی که $d = 0$.

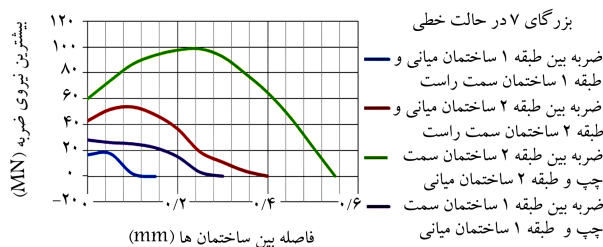


الف) $T_L=0.3, T_C=0.2, T_R=0.3$

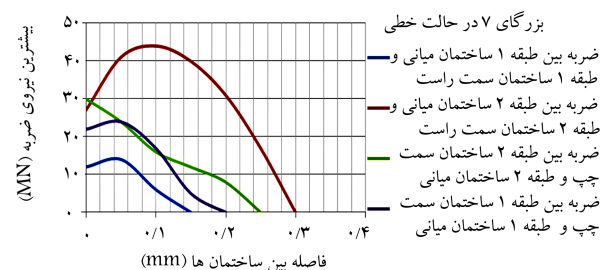


ب) $T_L=0.6, T_C=0.4, T_R=0.6$

شکل ۱۳. چگونگی تغییرات بیشینه نیروی ضربه بر حسب فاصله‌ی اولیه بین ۳ ساختمان مجاور تحت پالس‌های عمود برگسل با بزرگای مختلف در ۲ حالت خطی و غیرخطی.

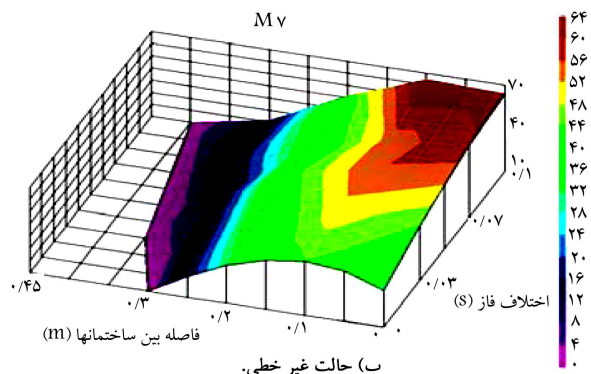
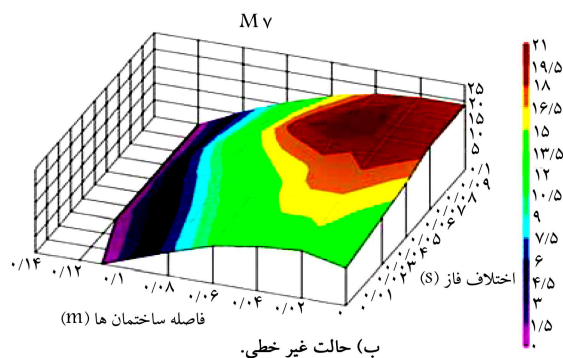
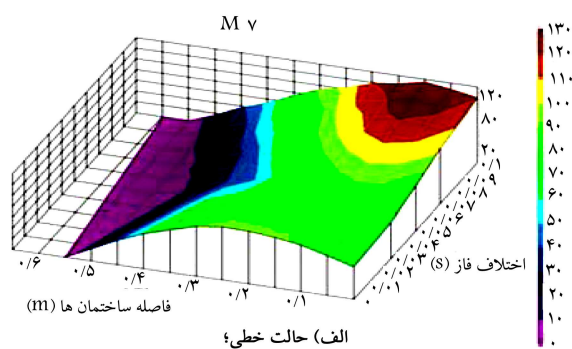
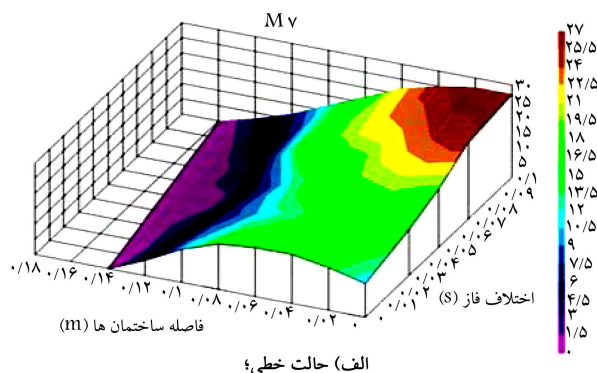


الف) در حالت خطی؛



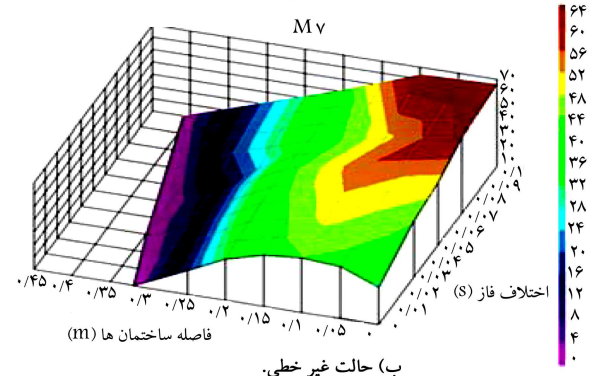
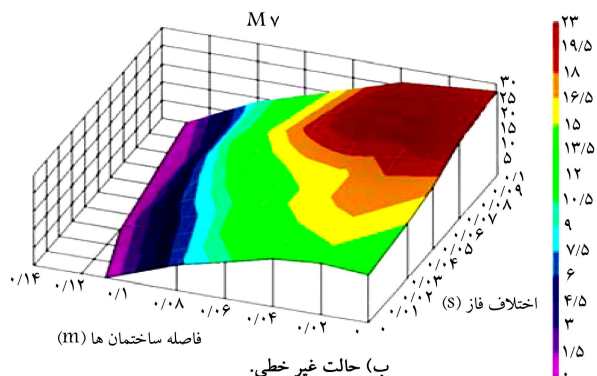
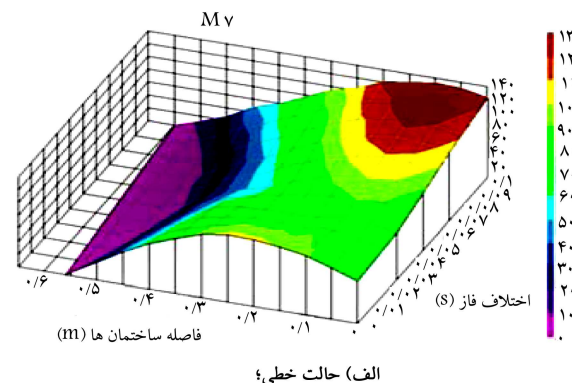
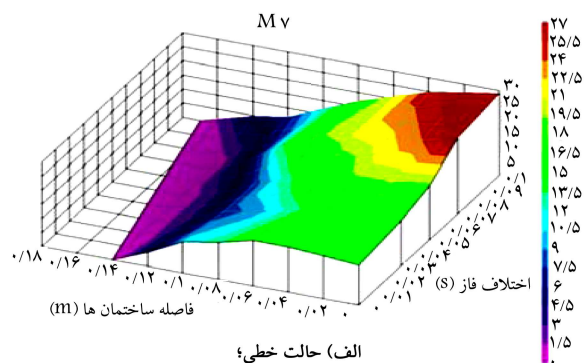
ب) در حالت غیر خطی.

شکل ۱۲. چگونگی تغییرات بیشینه نیروی ضربه طبقات بر حسب فاصله‌ی اولیه بین ۳ ساختمان مجاور با دوره‌های تناوب $T_L = 0.3, T_C = 0.2, T_R = 0.3$ تحت پالس عمود برگسل با بزرگای $M = 7$.



شکل ۱۶. تغییرات بیشینه نیروی ضربه بر حسب اختلاف فاز و فاصله‌ی اولیه بین ۳ ساختمان مجاور با دوره‌های تناوب $T_L = 0.3$, $T_C = 0.2$, $T_R = 0.3$ تحت مؤلفه‌ی افقی (u) حرکت موازی گسل با بزرگای $M = 7$.

شکل ۱۴. تغییرات بیشینه نیروی ضربه بر حسب اختلاف فاز و فاصله‌ی اولیه بین ۳ ساختمان مجاور با دوره‌های تناوب $T_L = 0.3$, $T_C = 0.2$, $T_R = 0.3$ تحت مؤلفه‌ی افقی (u) حرکت عمود بر گسل با بزرگای $M = 7$.



شکل ۱۷. تغییرات بیشینه نیروی ضربه بر حسب اختلاف فاز و فاصله‌ی اولیه بین ۳ ساختمان مجاور با دوره‌های تناوب $T_L = 0.3$, $T_C = 0.2$, $T_R = 0.3$ تحت اثر همزمان مؤلفه‌های افقی و قائم حرکت موازی گسل با بزرگای $M = 7$.

شکل ۱۵. تغییرات بیشینه نیروی ضربه بر حسب اختلاف فاز و فاصله‌ی اولیه بین ۳ ساختمان مجاور با دوره‌های تناوب $T_L = 0.3$, $T_C = 0.2$, $T_R = 0.3$ تحت اثر همزمان مؤلفه‌های افقی و قائم حرکت عمود بر گسل با بزرگای $M = 7$.

۱۳۹۴^[۸]، اختلاف فاز حرکات ورودی پایه‌ها می‌تواند سبب افزایش ۱/۵ تا ۲ برابری بیشینه نیروی ضربه نسبت به حالت ($\tau = d = 0$) شود، که مؤلفه‌ی افقی حرکت زمین (u) نقش اصلی را در این بزرگ‌نمایی بازی می‌کند. در شکل‌های ۱۶ و ۱۷، نیز تحت حرکت موازی گسل روندی مشابه شکل‌های ۱۴ و ۱۵ به چشم می‌خورد، با این تفاوت که به علت سرعت پایین پالس‌های موازی گسل نسبت به پالس‌های عمود بر گسل، بیشینه نیروی ضربه و کمینه فاصله‌ی لازم جهت جلوگیری از ضربه تحت پالس موازی گسل بسیار کمتر از مقادیر مربوط تحت پالس عمود بر گسل است.

۵. نتیجه‌گیری

برای مدل‌های در نظر گرفته شده نتایج نشان می‌دهند:

۱. نیروی ضربه می‌تواند سبب افزایش بیشینه نیروی برش طبقات شود و این افزایش

در ساختمان‌های کناری، که از یک طرف ضربه می‌خورند، چشم‌گیرتر از ساختمان میانی، که از دو طرف ضربه می‌خورد، است.

۲. با افزایش فاصله‌ی اولیه بین ساختمان‌ها، لزوماً ضربه کاهش نمی‌یابد و بسته به فاصله‌ی اولیه و دوره‌ی تناوب ساختمان‌ها و نیز رفتار مصالح، بیشینه نیروی ضربه می‌تواند بین ساختمان‌های چپ و میانی و یا ساختمان‌های راست و میانی رخ دهد.

۳. در حالت خطی و تحت پالس عمود بر گسل با بزرگای ۵، ۶ و ۷، بیشینه نیروی ضربه‌ی قابل انتظار به ترتیب برابر ۱۰، ۵۸ و ۱۰۰ مگانیوتن و کمینه فاصله‌ی لازم جهت جلوگیری از ضربه به ترتیب برابر ۱۰، ۳۰ و ۵۰ سانتی‌متر است.

۴. در حالت غیرخطی، بیشینه نیروی ضربه‌ی قابل انتظار به ترتیب برابر ۱۰، ۴۰ و ۴۵ مگانیوتن و کمینه فاصله‌ی لازم جهت جلوگیری از ضربه به ترتیب برابر ۱۰، ۲۰ و ۳۰ سانتی‌متر است.

منابع (References)

- Anagnostopoulos, S.A. "Pounding of building in series during earthquakes", *Earthquake Engrg. and Struct. Dyn.*, **16**(3), pp. 443-456 (1988).
- Jankowski, R. "Pounding force response spectrum under earthquake excitation", *Engineering Structures*, **28**(8), pp. 1149-1161 (2006).
- Jankowski, R. "Earthquake-induced pounding between equal height buildings with substantially different dynamic properties", *Engineering Structures*, **30**(10), pp. 2818-2829 (2008).
- Ghobarah, A. "Response of structures to near-fault ground motion", *13th World Conference on Earthquake Engineering (13WCEE)*, Vancouver, B.C., Canada, Paper No.1031, pp. 1-9 (1-6 Aug. 2004).
- Yaghmaei-Sabegh, S. and Jalali-Milani, N. "Pounding force response spectrum for near-field and far-field earthquakes", *Scientia Iranica A*, **19**(5), pp. 1236-1250 (2012).
- Barros, R.C., Naderpour, H., Khatami, S.M. and Mortezaei, A. "Influence of seismic pounding on RC buildings with and without base isolation system subject to near-fault ground motions", *Journal of Rehabilitation in Civil Engineering*, **1**(1), pp. 39-52 (2013).
- Hall, J., Heaton, T., Halling, M. and Wald, D. "Near-source ground motion and its effects on flexible buildings", *Earthquake Spectra*, **11**(4), pp. 569-605 (1995).
- Rezaei Balouchi, M., and Saleh Jalali, R. "Pounding response of adjacent buildings with non-equal height under near-fault strong ground motion", *Modares Civil Engineering Journal (MCEJ)*, **15**(1), pp. 35-46 (2015).
- Gupta, V.K. and Trifunac, M.D., *Investigation of Building Response to Translational and Rotational Earthquake Excitations*, Report No. 89-02, Dept. of Civil Eng., Univ. of Southern California (1989).
- Jankowski, R. "Non linear viscoelastic modelling of earthquake induced structural pounding", *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, **34**(6), pp. 595-611 (2005).
- Mavroeidis, G.P., Dong, G. and Papageorgiou, A.S. "Near-fault ground motions and the response of elastic and inelastic single-degree-of-freedom (SDOF) systems", *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, **33**(9), pp. 1023-1049 (2004).
- Trifunac, M.D. "A three-dimensional dislocation model for the San Fernando, California, earthquake of February 9, 1971", *Bulletin of the Seismological Society of America*, **64**(1), pp. 149-172 (1974).
- Aki, K. "Seismic displacement near a fault", *Journal of Geophysical Research*, **73**(16), pp. 5359-5376 (1968).
- Brune, J.N. "Tectonic stress and the spectra of seismic shear waves from earthquakes", *Journal of Geophys. Research*, **75**(26), pp. 4997-5009 (1970).
- Haskell, N.A. "Elastic displacements in the near-field of a propagating fault", *Bulletin of the Seismological Society of America*, **59**(2), pp. 865-908 (1969).
- Jalali, R.S., Trifunac, M.D., Ghodrati Amiri, G. and Zahedi, M. "Wave-passage effects on strength-reduction factors for design of structures near earthquake faults", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, **27**(8), pp. 703-711 (2007).
- Jalali, R.S., Bahari Jokandan, M. and Trifunac, M.D. "Earthquake response of three-span bridge, with mid-span supported by isolators, to near-field pulse and permanent-displacement step", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, **48**, pp. 89-103 (2013).

18. Trifunac, M.D., *Broad Band Extension of Fourier Amplitude Spectra of Strong Motion Acceleration*, Report CE 93-01, Dept. of Civil Engineering, University of Southern California, Los Angeles, California (1993).
19. Trifunac, M.D. "Tectonic stress and source mechanism of the imperial valley, California earthquake of 1940", *Bulletin of the Seismological Society of America*, **62**(5), pp. 1283-1302 (1972).
20. Jalali. R.S. and Trifunac. M.D. "Strength-reduction factors for structures subjected to near-source differential strong ground motions", *ISSET Journal of Earthquake Technology*, **44**(1), pp. 285-304 (2007).
21. Trifunac, M.D. "Stress estimates for San Fernando, California earthquake of February 9, 1971: Main event and thirteen aftershocks", *Bulletin of the Seismological Society of America*, **62**(3), pp. 721-750 (1972).
22. Fletcher, J., Boatwright, J., Haar, L., Hanks, T. and McGarr, A. "Source parameters for aftershocks of Oroville, California, earthquake", *Bulletin of the Seismological Society of America*, **74**(4), pp. 1101-1123 (1984).
23. Trifunac, M.D. "Fourier amplitude spectra of strong motion acceleration: Extension to high and low frequencies", *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, **23**(4), pp. 389-411 (1994).