

مطالعه آسیب‌پذیری تجهیزات غیرسازه‌ای بلوکی شکل در برابر دوران در زمان زلزله

افشین کلانتری، استادیار پژوهشکده مهندسی سازه پژوهشگاه
ولی شهبازی، فارغ‌التحصیل کارشناسی ارشد مهندسی عمران - مهندسی زلزله پژوهشگاه

۱- چکیده

با توجه به اهمیت تجهیزات غیرسازه‌ای و نقش آنها در عملکرد ساختمانها، پایداری لرزه‌ای آنها از اهمیت زیادی برخوردار است. در این مقاله، آسیب‌پذیری تجهیزات غیرسازه‌ای بر اثر حرکت گهواره‌ای^۱ با کمک رسم منحنی‌های شکنندگی بررسی شده است. فرض شده که بلوک تجهیزات، صلب و میزان اصطکاک بین این تجهیزات و سطح زیرین به اندازه‌ای است که هیچ‌گونه لغزشی صورت نمی‌گیرد. آسیب‌پذیری تجهیزات غیرسازه‌ای بلوکی شکل تحت اثر زلزله‌های مختلف به صورت احتمالاتی بررسی شده است. بدین منظور، ۸۰ نگاشت از زلزله‌های مختلف به بلوک مورد نظر به عنوان تحریک لرزه‌ای ورودی اعمال شده‌اند. نگاشتهای مذکور به بیشینه شتابهای مختلف بین $0.05-1/5$ مقیاس و در هر مقیاس برای هر نگاشت، تاریخچه پاسخ لرزه‌ای بلوک محاسبه گردیده است. در نهایت، با توجه به مقادیر پاسخهای به دست آمده، با استفاده از روشهای احتمالاتی، منحنی‌های آسیب‌پذیری برای تجهیزات بلوکی شکل با مشخصات مختلف به دست آمده‌اند و تأثیر پارامترهای ابعادی مختلف بلوک بر منحنی‌های به دست آمده مورد ارزیابی کلی قرار گرفته‌اند.

کلیدواژه‌ها: آسیب‌پذیری لرزه‌ای، دوران بلوک صلب، منحنی شکنندگی لرزه‌ای

۲- مقدمه

تجهیزات داخل ساختمانها، اعم از تجهیزات موجود در بیمارستانها، نیروگاهها، مراکز کامپیوتر و ... نقشی اساسی در عملکرد آنها دارد [۱]. در بسیاری از موارد، این اجزا در مقابل ارتعاش زمین بسیار آسیب‌پذیرند و تحریک لرزه‌ای، آنها را دستخوش آسیب و تخریب می‌نماید [۲].

اهمیت عملکردی اجزای غیرسازه‌ای در طراحی لرزه‌ای و ارزیابی عملکردی، هم اکنون توسط محققان و مهندسين، شناخته شده است. این موضوع بعد از زلزله ۱۹۷۱ سان‌فرناندو اهمیت ویژه‌ای یافت؛ زمانی که معلوم شد خسارت وارد بر اجزای غیرسازه‌ای نه تنها می‌تواند آثار زیانبار اقتصادی داشته باشد، بلکه می‌تواند تهدیدی جدی بر ایمنی جانی باشد. برای مثال، در بیمارستانهای مختلف بعد از زلزله ۱۹۷۱ سان‌فرناندو، بسیاری از تجهیزات علی‌رغم سلامت سازه‌ای، چندان قابل استفاده نبودند؛ زیرا، خساراتی بر تجهیزات و اجزای غیرسازه‌ای موجود در آنها وارد آمده بود [۳].

تجهیزات مذکور معمولاً به دو حالت مهار شده و یا مهار نشده در محل خود مورد استفاده قرار می‌گیرند. امکان لغزش و یا حرکت گهواره‌ای در تجهیزات از جمله حالت‌های پاسخ این سیستم‌هاست که با افزایش میزان آن از حدی معین به عنوان یک حالت شکست در نظر گرفته می‌شود [۲]. تجهیزات بلوکی شکل داخل ساختمانها، معمولاً بر اثر حرکت گهواره‌ای به هنگام زمین‌لرزه، آسیب‌پذیرند و ممکن است در طول مدت زمانی که تحریک لرزه‌ای را تحمل می‌کنند، به دلیل برخوردهای متعدد یا تغییر مکانهای ناشی از آن آسیب ببینند یا واژگون شوند و کارایی خود را از دست بدهند. در این حالت، با توجه به میزان اهمیت تجهیزات مورد نظر و نقشی که در کل مجموعه دارند، امکان کاهش سطح خدمت‌رسانی و عملکرد کلی مجموعه وجود خواهد داشت.

مطالعات عددی و آزمایشگاهی گسترده‌ای نیز در زمینه محاسبه پاسخ لرزه‌ای بلوک تجهیزات، تحت اثر تحریک لرزه‌ای، در قالب حرکات لغزشی یا گهواره‌ای و یا ترکیبی از دو نوع حرکت لغزشی و گهواره‌ای، انجام یافته است که در

.....
1. Rocking

دست آوردن منحنی‌های احتمال خرابی برای تجهیزات بلوکی شکل مختلف، مدّ نظر بوده است. به عنوان مثال، ژو^۵ و سونگ در سال ۱۹۹۸ [۲]، حرکت گهواره‌ای تجهیزات بلوکی شکل صلب را تحت اثر تحریکات حاصل از زمین‌لرزه، مطالعه و در نهایت با تعریف معیار خرابی بر اساس زاویه دوران بلوک، شکنندگی لرزه‌ای این تجهیزات را بررسی و برای بلوک‌های صلب با نسبت ابعاد مختلف، منحنی‌های شکنندگی را رسم کرده‌اند.

لوپوی^۶، پینتو^۷ و کالوی^۸ در سال ۲۰۰۵ [۸] نیز مطالعات تحلیلی و آزمایشگاهی بر روی پاسخ لرزه‌ای تجهیزات بلوکی شکل مهار نشده^۹ و برآورد منحنی‌های شکنندگی این تجهیزات، انجام داده‌اند. در این مطالعه، تجهیزات بلوکی شکل بر روی میز لرزان، آزمایش و بر اساس نتایج حاصل، منحنی‌های شکنندگی برای این تجهیزات به دست آمد.

نمونه‌های دیگری از مطالعه پاسخ لغزشی و دورانی سیستم‌های ثانویه و بلوک‌های صلب تحت اثر تحریکات ناشی از زمین‌لرزه وجود دارد که به عنوان مثال، می‌توان به مراجع [۹] و [۱۰] رجوع نمود.

با توجه به میزان اهمیت موضوع آسیب‌پذیری تجهیزات مذکور، در این مقاله روشهای عددی محاسبه پاسخ لرزه‌ای آنها معرفی و در نهایت با در نظر گرفتن واژگونی به عنوان یک حالت خرابی، منحنی‌های احتمال خرابی برای تجهیزات بلوکی شکل با مشخصات هندسی مختلف به دست آمده است.

۳- پاسخ دینامیکی بلوک صلب

در بخشهای بعد در مورد پاسخ دینامیکی بلوک صلب توضیح داده شده است.

۳-۱- هندسه بلوک

تجهیزات بلوکی شکل را در اغلب موارد می‌توان با تقریب قابل قبولی صلب فرض کرد. در این مطالعه، تجهیزات، بدون مهاربندی در نظر گرفته شده‌اند. بر این اساس،

-
5. Zhu
 6. Lupoi
 7. Pinto
 8. Calvi
 9. Free Standing Equipments

ادامه به مواردی از آنها به صورت خلاصه اشاره شده است. هاووزنر در سال ۱۹۶۳، پاسخ دینامیکی تجهیزات بلوکی شکل و صلب را که در بستر صلب قرار دارد، تحت تحریک لرزه‌ای افقی مورد ارزیابی قرار داد. در آن مطالعه، شتاب سطح زیر تجهیزات بلوکی شکل (شتاب پایه) به صورت مستطیلی و یا به صورت پالس‌های سینوسی بیان شده که تأکید آن در به دست آوردن کمینه شتاب لازم برای واژگونی بلوک بوده است. هاووزنر نشان داد که واژگونی یک بلوک معین (تجهیزات بلوکی شکل مفروض) به حاصل ضرب مقدار شتاب وارد بر آن در مدت زمان اعمالی^۲ بستگی دارد [۴].

ماکریس^۳ و راسس^۴ در سال ۱۹۹۸، پاسخ دورانی تجهیزات بلوکی شکل را بر اثر تحریکات لرزه‌ای پالسی سینوسی و کسینوسی، مورد بررسی قرار داده‌اند. آنها در این مطالعه، برای بلوک‌های با نسبت ابعاد مختلف، بعد از به دست آوردن معادله حاکم بر دوران سیستم، پاسخ دورانی را در حالت‌های تحلیل خطی، تحلیل غیرخطی و حل تقریبی به دست آورده، نتایج حاصل از هر روش را به صورت مقایسه‌ای بیان کرده‌اند [۵].

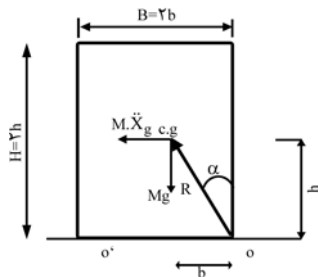
در مطالعه دیگری، آشتیانی و فیوض در سال ۱۳۸۱، پاسخ سیستم‌های ثانویه را در دو صورت با در نظر گرفتن برهمکنش بین سیستم‌های ثانویه و سیستم اصلی سازه و بدون در نظر گرفتن برهمکنش محاسبه کرده‌اند [۶].

تحلیل تاریخچه زمانی، یک مورد دیگر از مطالعات پاسخ لرزه‌ای تجهیزات بلوکی شکل است [۷]. در این مطالعه، محققین، بلوک‌های صلب واقع بر بستر صلب زمین را در چهار حالت سکون، لغزش، دوران، لغزش و دوران توأم، تحت اثر شتاب افقی حاصل از زمین‌لرزه قرار داده‌اند و در هر یک از حالتها، میزان حساسیت پاسخ بلوک‌ها را به پارامترهایی نظیر شتاب بیشینه تحریک حاصل از زمین‌لرزه، ابعاد بلوک و شرایط اولیه در لحظه شروع تحریک بررسی نموده‌اند.

با توجه به اهمیت موضوع، در برخی از این مطالعات که به بررسی رفتار تجهیزات بلوکی شکل پرداخته شده است، به

-
2. Duration
 3. Makris
 4. Roussos

دهد، تنها حرکت بلوک تحت تحریک، حرکت دورانی خواهد بود. شرایط موجود در حالت تعادل برای بلوک در شکل (۲) نشان داده شده است (رابطه‌های ۲ و ۳).



شکل (۲): بلوک با بارهای محرک و مقاوم

$$\Rightarrow Mg \times b > M \cdot \ddot{X}_g \times h \quad (2)$$

در رابطه (۲)، Mg لنگر مقاوم بلوک در برابر دوران و M نیروی محرک بلوک بر اثر تحریک وارد بر \ddot{X}_g است:

$$\ddot{X}_g < \frac{b}{h} g \quad (3)$$

با توجه به اینکه تحریک ورودی تنها شامل مؤلفه افقی است، امکان وقوع بی‌وزنی و در نتیجه برکنش^{۱۱} وجود ندارد. بیان واضح‌تر شرایط مرزی بلوک، برای شروع هر یک از انواع حرکتها، در قالب گرافیکی می‌تواند مفید باشد. با فرض اینکه شدت شتاب تحریک قائم، ضریبی از شدت تحریک افقی باشد، \ddot{y}_g نیز برابر $k\ddot{x}_g$ در نظر گرفته می‌شود که در آن k ضریبی ثابت و معمولاً مقدار آن بین صفر و یک است. جهت رو به بالا برای شتاب تحریک قائم و جهت راست برای شتاب تحریک افقی، مثبت در نظر گرفته می‌شود. بدین صورت که با تقسیم $|\ddot{x}_g|$ بر $g + \ddot{y}_g$ رابطه (۴) به دست می‌آید:

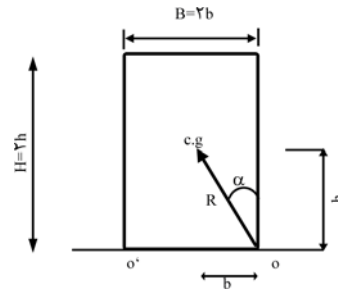
$$\frac{|\ddot{x}_g|}{g + \ddot{y}_g} = \frac{|\ddot{x}_g|}{g + k\ddot{x}_g} = \frac{1}{\frac{g}{|\ddot{x}_g|} + k \operatorname{sgn}(\ddot{y}_g)} \quad (4)$$

$$= \begin{cases} \frac{1}{\frac{g}{|\ddot{x}_g|} + k} = a, & \ddot{y}_g > 0 \\ \frac{1}{\frac{g}{|\ddot{x}_g|} - k} = c, & \ddot{y}_g < 0 \end{cases}$$

در این رابطه، sgn تابع علامت می‌باشد که اگر $y > 0$ باشد به

تجهیزات مذکور، بدون هیچ‌گونه مهارى به صورت آزاد بر روی بستر خود قرار گرفته‌اند. ابعاد بلوک مفروض عبارتند از: $H=2h$ و $B=2b$ (شکل ۱). این بلوک بر روی یک سطح افقی صلب تحت اثر تحریکات لرزه‌ای افقی ناشی از زمین‌لرزه قرار گرفته است. نسبت ابعاد بلوک برابر b/h و فاصله مرکز هندسی و ثقل آن از نقطه دوران برابر R می‌باشد. زاویه α در شکل برابر است با (رابطه ۱):

$$\alpha = \operatorname{tg}^{-1} \frac{b}{h} \quad (1)$$



شکل (۱): مشخصات هندسی بلوک

۳-۲- دوران بلوک

بلوک نشان داده شده در شکل (۱) در حالت عادی و تا زمانی که تحت هیچ‌گونه تحریکی قرار نگرفته، در حالت تعادل است. با شروع تحریک در بستر بلوک و فراگذشت آن از حدی معین، بلوک شروع به حرکت خواهد کرد. این حرکت ممکن است به حالت دوران، لغزش و یا ترکیبی از آنها اتفاق افتد. شدت تحریک لازم برای ایجاد لغزش در بلوک، تابعی از پارامترهایی از جمله ضریب اصطکاک بین بلوک صلب و بستر تکیه‌گاه آن است. در این مطالعه، فرض بر این بوده که ضریب اصطکاک مذکور، به اندازه‌ای بزرگ است که بلوک هیچ‌گونه لغزشی^{۱۰} نداشته باشد.

شرایط لازم برای اینکه در بلوک فقط حرکت گهواره‌ای صورت گیرد، این است که ضریب اصطکاک بین بلوک و بستر تکیه‌گاهی آن (μ) رابطه $\mu > \frac{b}{h}$ را ارضا کند [۸].

امکان رخداد حرکت لغزشی برای بلوک، توسط سونگ و ژو در سال ۱۹۷۷ و پامپی و همکاران در سال ۱۹۸۸ [۹] مطالعه شده است.

۳-۳- معیارهای شروع حرکت

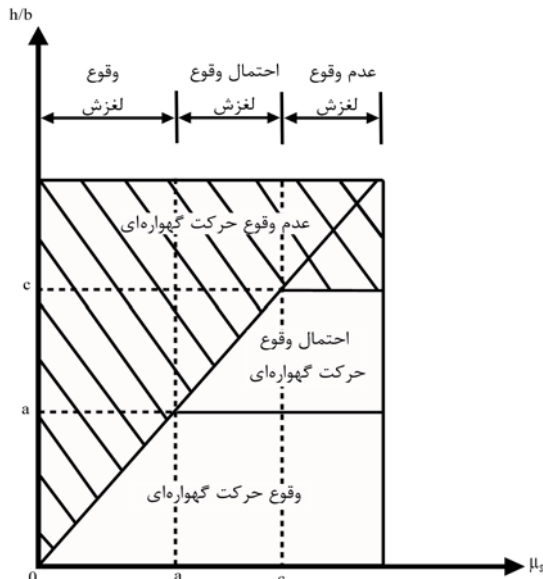
از آنجایی که ضریب اصطکاک بین بلوک و نشیمنگاه در حدی در نظر گرفته شده که حرکت لغزشی در بلوک رخ

11. Uplift

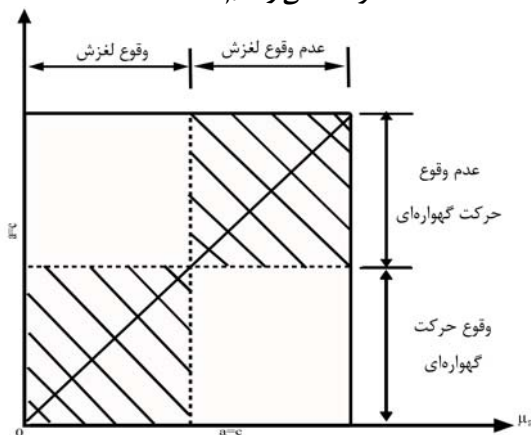
10. Sliding

b/h موجود خواهد بود:

- (الف) حرکت گهواره‌ای در بلوک رخ خواهد داد: $b/h < a$
 (ب) حرکت گهواره‌ای رخ نخواهد داد: $b/h > c$



شکل (۳): محدوده وقوع انواع حرکتها در بلوک (تحریک با هر دو مؤلفه افقی و قائم) [۲]



شکل (۴): محدوده وقوع انواع حرکتها در بلوک (تحریک وارده، فاقد مؤلفه قائم) [۲]

با توجه به معادلات و توضیحات مذکور، برای رخداد حرکت گهواره‌ای بدون رخداد حرکت لغزشی لازم است $\mu_s > \frac{b}{h}g$ باشد [۲، ۷، ۸، ۹ و ۱۰]. مطابق رابطه (۲)، چنانچه بیشینه شتاب تحریک وارد بر بلوک کمتر از $\frac{b}{h}g$ باشد، دورانی در بلوک صورت نخواهد گرفت و به حالت سکون باقی خواهد ماند؛ اما در صورتی که بیشینه شتاب وارد بر بلوک، از مقدار $\frac{b}{h}g$ بیشتر شود $\left(\ddot{X}_g > \frac{b}{h}g\right)$ ، بلوک تحت این تحریک شروع به دوران خواهد کرد. در این صورت، با توجه به شکل‌های (۵، الف و ب) برای دوران بلوک برای حالت الف ($\theta < 0$):

صورت $sgn(\ddot{y}_g) = 1$ و در صورتی که $y < 0$ باشد به صورت $sgn(\ddot{y}_g) = -1$ تعریف می‌شود. مقادیر a و c نیز با معلوم بودن مقدار بیشینه شدت تحریک به آسانی قابل محاسبه‌اند. اگر ضریب اصطکاک استاتیکی، μ_s و نسبت ابعاد بلوک، b/h در نظر گرفته شود، با مقایسه رابطه (۴) با رابطه‌های (۲) و (۳) می‌توان شکل (۳) را رسم نمود [۱۰]. اگر $\mu_s > c$ باشد، نیروی اینرسی افقی، کمتر از نیروی اصطکاک زیر بلوک است و توسط آن تحمل خواهد شد؛ بنابراین لغزش رخ نخواهد داد. اگر $\mu_s < a$ باشد، نیروی اینرسی افقی، بیشتر از نیروی اصطکاک زیر بلوک خواهد شد و لغزش در بلوک رخ خواهد داد. هنگامی که بلوک تحت تحریک قائم قرار دارد، تحریک به سمت بالا، موجب افزایش نیروی عمودی و نرمال بین بلوک و سطح تکیه‌گاه و در نتیجه موجب افزایش نیروی اصطکاک بین آنها در مقابل نیروی اینرسی افقی می‌شود؛ بنابراین حرکت لغزشی در بلوک، از احتمال رخداد کمتری برخوردار خواهد بود. به طور مشابه، در صورت وقوع تحریک قائم رو به پایین، نیروی عمودی و نرمال بین بلوک و سطح تکیه‌گاه و در نتیجه نیروی اصطکاک بین آنها در مقابل نیروی اینرسی افقی کاهش می‌یابد و در نتیجه بلوک، میل به لغزش خواهد داشت. برای محدوده $a < \mu_s < c$ امکان رخداد حرکت لغزشی در بلوک با توجه به اختلاف فاز بین تحریک افقی و تحریک قائم، وجود دارد؛ بنابراین، سه ناحیه در طول محور μ_s (شکل ۳) موجود خواهد بود [۲]:

(الف) حرکت لغزشی در بلوک رخ خواهد داد: $\mu_s < a$ ؛

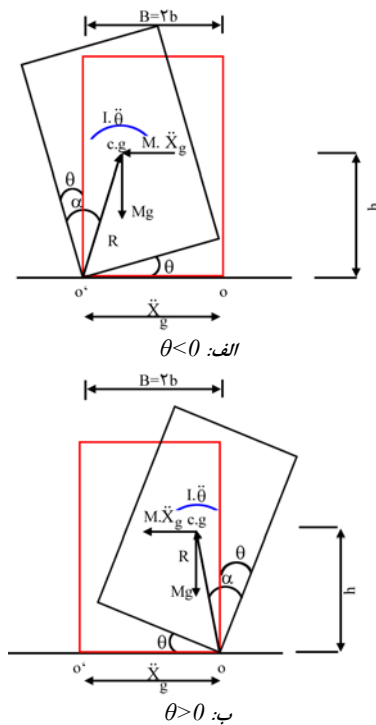
(ب) احتمال بروز حرکت لغزشی در بلوک وجود دارد:

$$a < \mu_s < c$$

(ج) حرکت لغزشی رخ نخواهد داد: $\mu_s > c$.

عرض ناحیه‌ای که در آن، لغزش بلوک محتمل است، به نسبت شدت تحریک افقی و قائم، بستگی دارد. این موضوع برای حالتی که تحریک فقط مؤلفه افقی دارد، در شکل (۴)، نشان داده شده است [۲].

نتایج مشابه برای تقسیم‌بندی نواحی رخداد حرکت گهواره‌ای به کار می‌رود. اگر $b/h > c$ باشد، حرکت گهواره‌ای رخ نخواهد داد؛ زیرا در این حالت، لنگر واژگونی توسط لنگر مقاوم بر اثر وزن بلوک، خنثی خواهد شد. در صورتی که $b/h < a$ باشد، در صورت تجاوز میزان لنگر واژگونی از لنگر مقاوم، حرکت گهواره‌ای در بلوک رخ خواهد داد؛ بنابراین برای حرکت دورانی در این حالت، دو ناحیه در طول محور



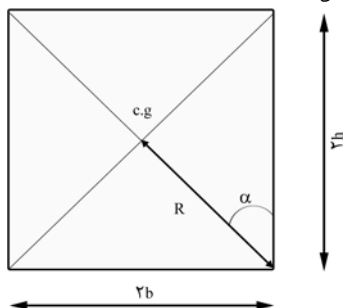
شکل (۵): نمودار آزاد بلوک در حال دوران بر اثر تحریک لرزه‌ای افقی (دوران در جهت مثلثاتی مثبت فرض شده است)

ابعاد و مشخصه دینامیکی تقریبی برای تجهیزات الکتریکی که در طول اثر زلزله، تحت حرکت گهواره‌ای قرار گرفته‌اند، در جدول (۱)، آورده شده است [۵].

جدول (۱): ابعاد و مشخصه دینامیکی تقریبی برای تجهیزات الکتریکی [۵]

P(rad/s)	α (rad)	R(ft)	h(ft)	b(ft)	Equipment
۱/۹	۰/۴۶۳۶	۶/۷۱	۶	۳	E1
۲/۳۲	۰/۵۴۰۴	۲/۹۲	۲/۵	۱/۵	E2*
۱/۰۶	۰/۳۸۰۵	۲۱/۵۴	۲۰	۸	E3
۲/۶۸	۰/۴۶۳۶	۳/۳۵	۳	۱/۵	E4
۲/۲۴	۰/۳۷۰۹	۴/۸۳	۴/۵	۱/۷۵	E5
۲/۳۳	۰/۲۸۶	۴/۴۳	۴/۲۵	۱/۲۵	E6
۲/۳۲	۰/۵۴۰۴	۲/۹۲	۳/۵	۱/۵	E7*
۲/۵۸	۰/۲۷۸۳	۳/۶۴	۳/۵	۱	E8
۲/۲۱	۰/۵۶۶۷	۳/۲۶	۲/۷۵	۱/۷۵	E9
۲/۲۱	۰/۵۶۶۷	۳/۲۶	۲/۷۵	۱/۷۵	E10*
۱/۷۳	۰/۵۰۷	۵/۱۵	۴/۵	۲/۵	E11*

* بلوک‌های استوانه‌ای



$$\begin{aligned} \sum M_{o'} &= \cdot, \theta < \cdot \\ -I\ddot{\theta} + MgR \sin(\alpha - |\theta|) &= \\ &= M\ddot{X}_g R \cos(\alpha - |\theta|), \theta < \cdot \Rightarrow \\ -I\ddot{\theta} + MgR \sin(\alpha + \theta) &= \\ &= M\ddot{X}_g R \cos(\alpha + \theta) \\ -I\ddot{\theta} - MgR \sin(-\alpha - \theta) &= \\ &= M\ddot{X}_g R \cos(-\alpha - \theta) \\ \Rightarrow I\ddot{\theta} + MgR \sin(-\alpha - \theta) &= \\ &= -M\ddot{X}_g R \cos(-\alpha - \theta) \end{aligned} \quad (\text{الف}, \delta)$$

به همین ترتیب برای حالت ب ($\theta > \cdot$):

$$\begin{aligned} \theta > \cdot \Rightarrow \sum M_o &= \cdot \Rightarrow I\ddot{\theta} + MgR \\ \sin(\alpha - |\theta|) &= -M\ddot{X}_g R \cos(\alpha - |\theta|) \end{aligned} \quad (\text{ب}, \delta)$$

$$\begin{aligned} \theta > \cdot \Rightarrow I\ddot{\theta} + MgR \sin(\alpha - \theta) &= \\ -M\ddot{X}_g R \cos(\alpha - \theta) & \end{aligned} \quad (۶)$$

$$\begin{aligned} \Rightarrow \ddot{\theta}(t) &= \frac{1}{I} \cdot MgR \\ \left[\begin{array}{c} \sin[\alpha \cdot \text{sgn}(\theta(t)) - \theta(t)] + \frac{\ddot{X}_g}{g} \\ \cos[\alpha \cdot \text{sgn}(\theta(t)) - \theta(t)] \end{array} \right] & \end{aligned} \quad (۷)$$

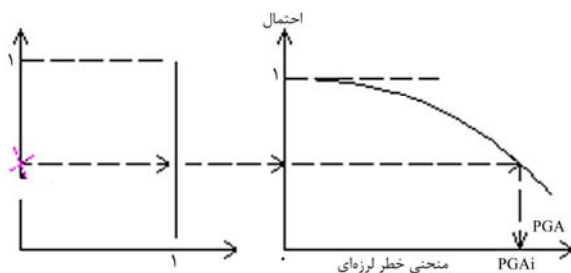
$$\begin{aligned} \left\{ I = \frac{r m R^2}{3}, p = \sqrt{\frac{r g}{f R}} \Rightarrow \ddot{\theta}(t) = -p^r \right. \\ \left[\begin{array}{c} \sin[\alpha \cdot \text{sgn}(\theta(t)) - \theta(t)] \\ + \frac{\ddot{X}_g}{g} \cos[\alpha \cdot \text{sgn}(\theta(t)) - \theta(t)] \end{array} \right] & \end{aligned} \quad (۸)$$

در این روابط $p = \sqrt{\frac{r g}{f R}}$ بر حسب واحد $\frac{rad}{sec}$ و R معیاری از اندازه بلوک است. با توجه به رابطه (۸) هر چه اندازه بلوک (R) بزرگتر باشد، p کمتر خواهد بود. مقدار فرکانس بلوک در حال دوران، ثابت نیست و نسبت به شدت ارتعاش بسیار حساس است [۴]. در رابطه (۸)، p مشخصه دینامیکی بلوک تجهیزات نامیده می‌شود. این مقدار برای تجهیزات الکتریکی برابر $p \approx 2 \frac{rad}{S}$ و برای تجهیزات خانگی برابر $p \approx 1 \frac{rad}{Sec}$ برآورد شده است [۵].

در بسیاری از زلزله‌های اخیر مشاهده شده است. در این مطالعه، واژگونی بلوک تجهیزات بر اثر حرکت گهواره‌ای به هنگام وقوع زمین‌لرزه، به عنوان معیاری برای خرابی تعریف شده است. به این منظور، مقدار $\theta = \theta_c = \alpha = tg^{-1} \frac{b}{h}$ به عنوان حد خرابی سیستم تعریف شده است [۲]. این مقدار از دوران، به مفهوم واژگونی بلوک است و تحلیل مربوط به نداشت زلزله مربوط به آن با رسیدن به این حد، متوقف می‌شود.

۵- روش تحلیل

برای محاسبه مقادیر θ در زمان ارتعاش بلوک، از روابط (۴)، (۵)، (۶) و (۷) استفاده شده است. تعداد ۸۰ نداشت مربوط به زمین‌لرزه‌های مختلف، در این مطالعه، مورد استفاده قرار گرفته است. برای به دست آوردن احتمال خرابی (واژگونی) بلوک تجهیزات، تحت اثر بیشینه شتابهای افقی (PGA)، از روش مونت کارلو^{۱۲}، استفاده شده است. بدین ترتیب که ابتدا تعداد ۵۰ عدد تصادفی بین ۰ و ۱ با توزیع یکنواخت انتخاب شده، سپس اعداد تصادفی انتخابی در مقدار ۱/۵ ضرب و از بین آنها، مقادیر ۰.۵ تا ۱/۵ به عنوان PGA انتخابی در واحد g ($9.81 m/sec^2$) انتخاب شده‌اند. در حالت دیگری می‌توان مطابق شکل (۶)، مقدار PGA متناظر با اعداد تصادفی انتخابی را با استفاده از روش تبدیل معکوس^{۱۳} از روی منحنی خطر زلزله برای منطقه مورد نظر، تعیین نمود.



شکل (۶): نحوه تولید مقادیر بیشینه شتاب (PGA) از روش تبدیل معکوس

در مرحله بعد، هر ۸۰ نداشت زلزله انتخابی به ۵۰ مقدار PGA به دست آمده از روش مذکور مقیاس شد و عملیات تحلیل در مجموع ۴۰۰۰ بار ($80 \times 50 = 4000$) صورت گرفت.

-
 12. Monte-Carlo Simulation Method
 13. Inverse Transform

هنگامی که بلوک تحت تأثیر حرکت گهواره‌ای قرار گرفته است، فرض می‌شود که دوران به صورت پیوسته و حول نقاط O و O' صورت می‌گیرد. در این صورت، با توجه به ثابت ماندن میزان اندازه حرکت، درست قبل از برخورد و بلافاصله بعد از برخورد بلوک به سطح زیرین، داریم:

$$I_o \dot{\theta}_1 - M \theta_1 r b R \sin \alpha = I_o \dot{\theta}_r \quad (9)$$

در این رابطه، $\dot{\theta}_1$ سرعت دورانی بلوک، درست قبل از ضربه یا برخورد بلوک به سطح زیرین و $\dot{\theta}_r$ سرعت زاویه‌ای بلوک بلافاصله بعد از برخورد می‌باشد. نسبت انرژی جنبشی بعد و قبل از برخورد به صورت رابطه (۱۰) است [۵]:

$$r = \frac{\dot{\theta}_r^2}{\dot{\theta}_1^2} \quad (10)$$

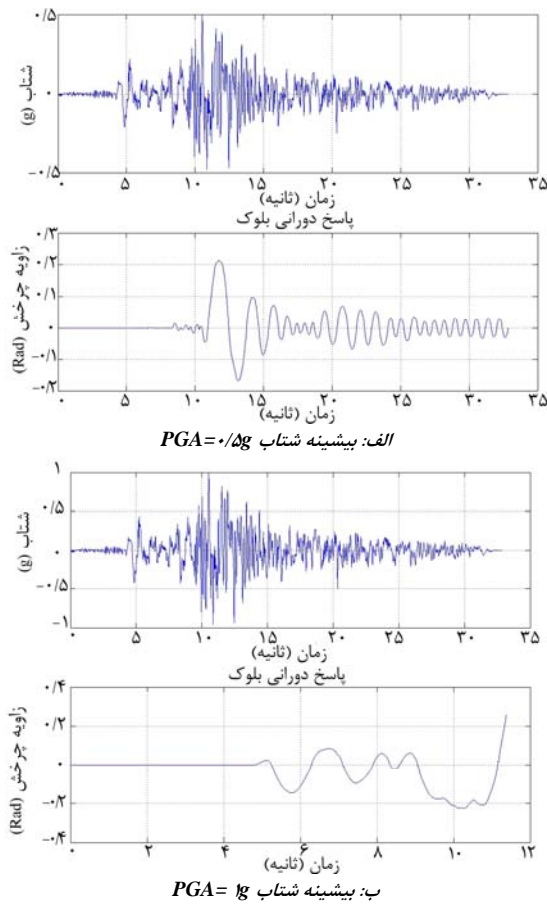
این رابطه نشان می‌دهد که سرعت زاویه‌ای بلوک بلافاصله بعد از برخورد، \sqrt{r} برابر سرعت زاویه‌ای بلوک قبل از برخورد است. با ترکیب رابطه‌های (۹) و (۱۰) خواهیم داشت:

$$r = \frac{r^3}{r} \sin^2 \alpha^2 \quad (11)$$

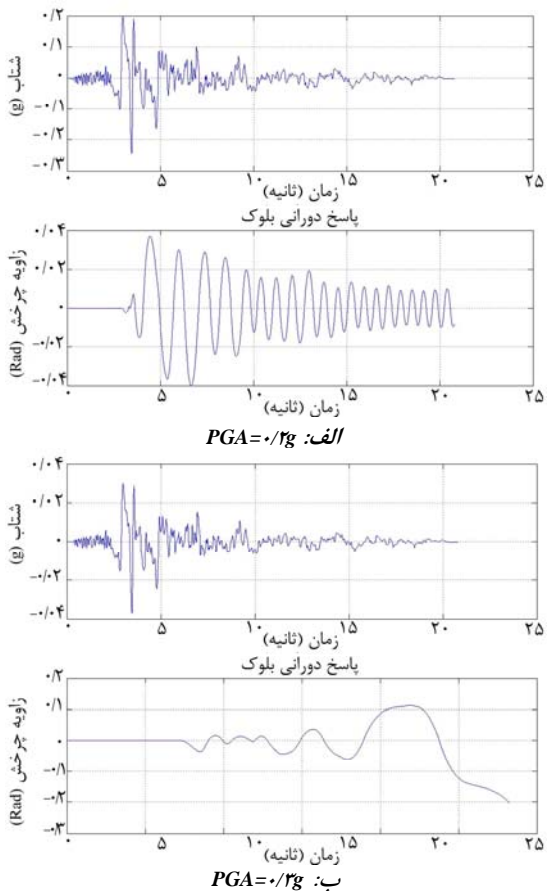
در رابطه (۱۱)، r ضریب بازگردانی بلوک نامیده می‌شود. با رابطه مذکور حداکثر مقدار r برای بلوک دارای زاویه α ، که تحت حرکت گهواره‌ای قرار گرفته است، به دست می‌آید. در این مطالعه، همه تحلیل‌ها با در نظر گرفتن مقدار ضریب بازگردانی (r) بیشینه (که از رابطه ۱۱ به دست می‌آید)، انجام شده است.

۴- معیارهای خرابی

تجهیزات مختلف داخل ساختمانها، نیروگاهها و یا مراکز کامپیوتر، در بسیاری از موارد در تحلیل‌ها به صورت صلب و بلوکی شکل در نظر گرفته می‌شوند. این تجهیزات در زمان وقوع تکانهای شدید حاصل از زمین‌لرزه، متحمل حرکاتی نظیر حرکت گهواره‌ای می‌شوند و حین این حرکت، ممکن است با برخوردی که در هر دور بین تجهیزات و تکیه‌گاه صورت می‌گیرد، آسیب ببینند. به تبع این آسیب، ممکن است در عملکرد و خدمت‌رسانی این تجهیزات اختلال به وجود آید و قابلیت خدمت‌رسانی خود را از دست بدهند. در برخی موارد نیز دوران این سیستم‌ها بیش از حدی معین ممکن است به واژگونی آنها منجر گردد. این حالات خرابی



شکل (۷): نمونه‌ای از پاسخ دورانی بلوک برای نگاشت زلزله طبس



شکل (۸): نمونه‌ای از پاسخ دورانی بلوک برای نگاشت زلزله ۱۹۹۲ ارزنجان با بیشینه شتاب

طی محاسبه پاسخ بلوک برای هر زلزله، به هنگام فراگذشت مقدار پاسخ بلوک از حد مجاز $\left(\theta = \alpha = \text{tg}^{-1} \frac{L}{h}\right)$ ، فرآیند تحلیل برای آن نگاشت، متوقف گردید. در پایان تحلیل، هر ۸۰ نگاشت به ازای هر PGA ، احتمال واژگونی برای هر PGA از رابطه (۱۲) به دست می‌آید:

$$P_{f_i} = \frac{N_i(\theta > \theta_c)}{N = 4000} \quad (12)$$

در این رابطه، P_{f_i} احتمال خرابی بلوک به ازای PGA_i ، $N_i(\theta > \theta_c)$ تعداد پاسخهایی که مقدار آنها به ازای PGA_i انتخاب شده از مقدار $\theta = \theta_c = \text{tg}^{-1} \frac{b}{h}$ بیشتر شده و $N = 50 \times 80 = 4000$ تعداد کل پاسخهاست. پس از محاسبه همه مقادیر P_{f_i} ، به ازای مقیاسهای PGA_i تابع چگالی $F(PGA_i)$ به صورت تجمعی محاسبه و توزیع تجمعی احتمال^{۱۴} برای بلوکی با ابعاد معین با رابطه (۱۳) محاسبه می‌شود:

$$P(PGA < PGA_i) = \int_{-\infty}^{PGA_i} F(PGA_i) d(PGA) \quad (13)$$

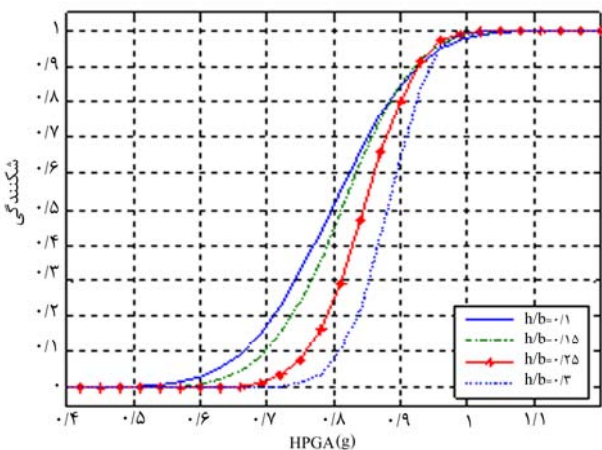
در رابطه (۱۳)، $P(PGA < PGA_i)$ احتمال خرابی بلوک (واژگونی بلوک) به ازای نگاشتی با بیشینه شتاب PGA_i است. منحنی شکنندگی برای هر نسبت ابعادی $b:h$ نمایشی از P_{f_i} به ازای PGA_i خواهد بود. نمونه‌ای از پاسخ گهواره‌ای محاسبه شده برای بلوک در شکل (۷) نشان داده شده است. نتایج مندرج در شکل (۷، الف)، برای زلزله ورودی طبس با بیشینه شتاب $1g$ است و در شکل (۷، ب) این نتایج برای همان زلزله و بیشینه شتاب $0.5g$ نشان داده شده است. ابعاد بلوک انتخابی $B=60$ ، $H=240$ و $b/h=0.25$ سانتیمتر است. در شکل (۸) نیز، پاسخ گهواره‌ای به دست آمده در محاسبات برای بلوکی با مشخصات ابعاد $B=60$ ، $H=240$ و $b/h=0.25$ سانتیمتر نشان داده شده است. زلزله ورودی، زلزله ۱۹۹۲ ارزنجان می‌باشد. بیشینه شتاب در شکل (۸، الف)، $0.2g$ و در شکل (۸، ب)، $0.3g$ است. ملاحظه می‌شود که در شکل‌های (۷، ب و ۸، ب) به علت فراگذشت مقدار پاسخ از حد مجاز، بلوک واژگون شده است.

14. Cumulative Probability Distribution

در مرحله ۱۱ با در دست داشتن مقادیر احتمال مربوط به هر سطح زلزله (PGA_i) ، احتمال تجمعی مربوط به هر یک از سطوح را به دست آورده و توزیع تجمعی آنها رسم می‌شود. نتایج محاسبات برای دو بلوک با نسبت ابعادی مختلف به صورت منحنی شکنندگی در شکل‌های (۹) و (۱۰) نشان داده شده‌اند. در این شکل‌ها، محور افقی بیانگر شدت زمین-لرزه‌های اعمالی (PGA) در واحد (m/sec^2) و محور قائم، بیانگر احتمال رسیدن یا فراگذر پاسخ سیستم بلوک از سطح خسارت مورد نظر و شامل مقادیری بین ۰ و ۱ می‌باشد.

عدد صفر در محور قائم برای هر بلوکی نشان می‌دهد که تحت اثر نگاشته‌های اعمالی در هر مقیاس، بلوک به پاسخ بحرانی نرسیده و در نتیجه خسارت ندیده است. همچنین مقدار ۱ در محور قائم بیانگر این است که تحت اثر نگاشته‌های اعمالی در مقدار PGA متناظر از محور افقی، بلوک به پاسخ بحرانی رسیده یا از آن تجاوز کرده است و در نتیجه تحت اثر تک تک نگاشته‌ها در آن مقیاس، خسارت دیده است. سطح خسارتی که در این مقاله برای بلوک‌های صلب به عنوان شکست در نظر گرفته شده است، برابر زاویه دورانی بحرانی بلوک است که به صورت $\theta = \theta_c = \alpha = tg^{-1} \frac{b}{h}$ تعیین می‌گردد [۲]. در حالت کلی با افزایش نسبت ابعاد بلوک، آسیب‌پذیری کاهش می‌یابد (شکل ۹).

با توجه به نتیجه به دست آمده از نمودارها، در دو بلوک با نسبت ابعاد یکسان، بلوک با مقدار P بیشتر R کوچکتر یا اندازه کوچکتر، آسیب‌پذیرتر است [۲].

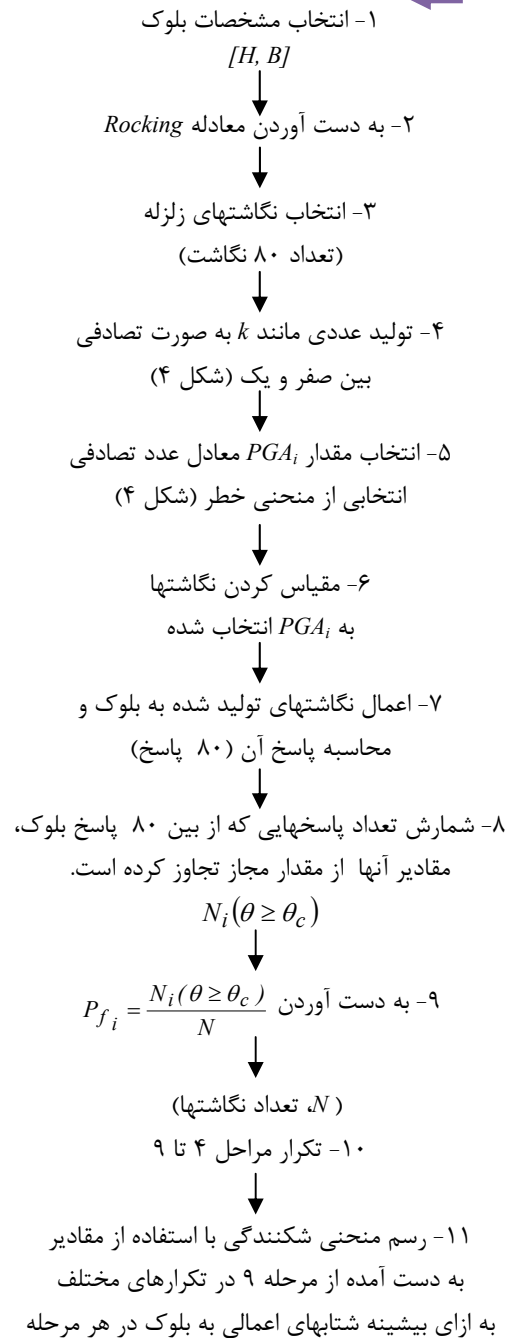


شکل (۹): منحنی شکنندگی برای بلوک‌های با نسبت ابعاد h/b مختلف

بعد از محاسبه پاسخ سیستم بلوک به ازای نگاشت زلزله‌های مختلف و با به دست آوردن تعداد پاسخهایی که از مرز بحرانی عبور کرده‌اند، با استفاده از الگوریتم زیر می‌توان منحنی‌های شکنندگی^{۱۵} را برای بلوک‌های با نسبت ابعاد^{۱۶} مختلف به دست آورد.

الگوریتم به دست آوردن منحنی‌های شکنندگی لرزه‌ای برای بلوک‌های صلب

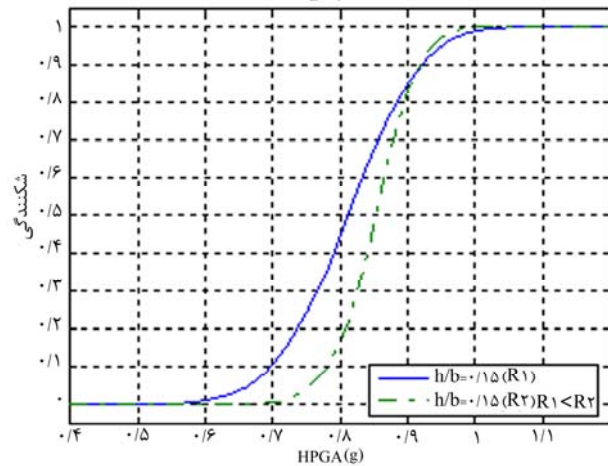
شروع



15. Fragility Curves
16. Aspect Ratio

۷- مراجع

- Bertero, R., D., Bertero, V., V. (2002). Performance-based seismic engineering: The need for a reliable conceptual comprehensive approach. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 31, 627-652.
- Zhu, Z. Y., Soong, T. T. (November 1998). Toppling fragility of unrestrained equipment. *Earthquake Spectra*, 14, 4.
- Soong, T. T., Lopez Garcia, D. (2003). Seismic vulnerability and protection of nonstructural components. *Joint NCEE/JRC Workshop International collaboration on earthquake disaster mitigation research*, (73-82). Taipei, Taiwan: National Center for Research on Earthquake Engineering.
- Housner, G. W. (1963). The behavior of inverted pendulum structures during earthquakes. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 53, 2, 403-417
- Makris, N. Roussos, Y. (1998). *Rocking response and overturning of equipments under horizontal excitation* [Report PEER-1998/05]. USA: University of Berkeley.
- فیوض، علیرضا. (۱۳۸۱). *تحلیل سیستم‌های ثانویه تحت اثر همزمان مؤلفه‌های شتاب زلزله و ساده‌سازی روش تحلیل*. رسالهٔ دکتری عمران- سازه، دانشگاه تربیت مدرس.
- Yang, Y. B., Hung, H. H., He, M. J. (2001). Sliding and rocking response of rigid blocks due to horizontal excitations (2000). *Structural Engineering and Mechanics*, 9, 11-16.
- Lupoi, G., Pinto, P., Calvi, G.M. (2005). *Fragility analysis on the seismic response of freestanding equipments: A individual study submitted in partial fulfillment of the requirements for the PhD. degree in earthquake engineering*. Rose School.
- Lopez Garcia, D., Soong, T. T. (2003). Sliding fragility of block-type non-structural components, Part-1: Unrestrained components. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 32, 111-129.
- Lopez Garcia, D., Soong, T. T. (2003). Sliding fragility of block-type non-structural components, Part-2: Restrained components. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 32, 1, 131-149.



شکل (۱۰): منحنی شکنندگی برای بلوک‌های با نسبت ابعاد h/b مختلف، R اندازه بلوک

۶- نتیجه‌گیری

محاسبه و رسم منحنی‌های شکنندگی برای ارزیابی آسیب‌پذیری لرزه‌ای تجهیزات، از اهمیت زیادی برخوردار است؛ به طوری که با در دست داشتن این منحنی‌ها برای هر دسته از تجهیزات، می‌توان میزان آسیب‌پذیری آنها را به ازای شدت پیشینه شتاب محتمل، برآورد نمود. در این مطالعه، منحنی‌های شکنندگی لرزه‌ای برای استفاده در عملیات ارزیابی لرزه‌ای سریع تجهیزات استخراج گردید. با توجه به تفاوت موجود در منحنی‌های شکنندگی به دست آمده برای بلوک‌های مختلف، می‌توان نتیجه گرفت:

- اندازه بلوک و نسبت ابعاد آن، در میزان پاسخ لرزه‌ای آنها و در نتیجه در آسیب‌پذیری آنها در برابر زلزله، بسیار مؤثر است.
- پارامتر $p = \sqrt{\frac{3g}{4R}}$ ، که مشخصهٔ دینامیکی بلوک و معیاری برای بیان اندازه بلوک است، در مقادیر پاسخ لرزه‌ای بلوک و میزان آسیب‌پذیری آنها تأثیر تعیین‌کننده‌ای دارد.
- با توجه به منحنی شکنندگی به دست آمده برای دو بلوک مشابه، می‌توان دریافت که در دو بلوک با نسبت ابعاد برابر، احتمال خرابی بلوک بزرگتر، کمتر است.
- مقادیر متفاوت پاسخ لرزه‌ای بلوک صلب برای زلزله‌های با پیشینه شتاب یکسان، میزان تأثیر محتوای فرکانسی را در فرآیند پاسخ لرزه‌ای بلوک نشان می‌دهد.