

تأثیر جداسازی لرزه‌یی بر شکنندگی لرزه‌یی تجهیزات صلب بلوکی

افشین کلانتری (استادیار)

ولی شهبازی (کارشناس ارشد)

پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله

منحنی‌های شکنندگی لرزه‌یی برای تجهیزات غیرسازه‌یی بلوکی مهارنشده در سه حالت متفاوت: «تجهیزات روی بستر زمین و مهارنشده»، «تجهیزات روی طبقات ساختمان و بدون سیستم‌های جداساز لرزه‌یی» و «تجهیزات روی طبقات ساختمان و با جداسازی لرزه‌یی کف» به دست آمده‌اند. به منظور ارزیابی آسیب‌پذیری لرزه‌یی تجهیزات بلوکی تحت اثر حرکت گهواره‌یی آنها به هنگام زلزله، منحنی‌های شکنندگی در حالات سه‌گانه‌ی یادشده رسم شده است. تجهیزات بلوکی با نسبت ابعاد مختلف مورد مطالعه قرار گرفته‌اند. در این پژوهش، برای محاسبه‌ی منحنی‌های شکنندگی لرزه‌یی از روش شبیه‌سازی مونت‌کارلو استفاده شده است. نتایج حاصل از مطالعه‌ی پاسخ دورانی تجهیزات بلوکی تحت اثر زلزله، و نیز رسم منحنی‌های شکنندگی برای آنها نشان می‌دهد که جداسازی لرزه‌یی کف طبقاتی که تجهیزات در آنها قرار دارند در کاهش میزان آسیب‌پذیری بلوک‌های صلب تأثیر به‌سزایی دارد به‌نحوی که در بلوک‌های مشابه، آنها که در طبقاتی با کف جداسازی شده قرار دارند، نسبت به بلوک‌هایی در سطح همان طبقات و بدون جداسازی لرزه‌یی، از سطح آسیب‌پذیری پایین‌تری برخوردارند. همچنین آسیب‌پذیری این تجهیزات با افزایش نسبت ابعاد بلوک‌های صلب کاهش می‌یابد؛ از دو بلوک با نسبت ابعاد یکسان، بلوکی که اندازهاش بزرگ‌تر است آسیب‌پذیری پایین‌تری دارد.

واژگان کلیدی: تجهیزات بلوکی، حرکت گهواره‌یی، منحنی‌های شکنندگی لرزه‌یی، جداسازی لرزه‌یی طبقه، شبیه‌سازی مونت‌کارلو.

۱. مقدمه

«سیستم‌های ثانویه» سیستم‌ها و اجزایی هستند با جرم بسیار کوچک‌تر از جرم سازه‌ها، که به قسمتی از سازه‌ی اصلی (کف طبقات، بام یا دیوارها، و ستون‌های ساختمان‌ها و سازه‌های صنعتی) متصل می‌شوند. این سیستم‌ها جزء سیستم باربر سازه محسوب نمی‌شوند و از آنها انتظار باربری نمی‌رود، اما ممکن است در هنگام زلزله تحت اثر نیروهای بزرگی قرار گیرند.^[۱] از این رو لازم است به موضوع پایداری و ایمنی سیستم‌های ثانویه در مقابل نیروهای وارده تحت اثر زلزله توجه ویژه شود تا بعد از زلزله همچنان عملکرد خود را حفظ کنند.

تحقیقات در زمینه‌ی کاهش خطر زمین‌لرزه در سال‌های گذشته، به‌عنوان یکی از موضوعات مورد توجه در سال‌های اخیر پیشرفت‌های چشمگیری داشته است. با این وجود، سطح طراحی تجهیزات غیرسازه‌یی موجود در داخل ساختمان‌ها نازل‌تر از دیگر اجزای سازه‌یی است. در نتیجه ساختمان‌هایی که تحت تکان‌های شدید زمین، از نظر سازه‌یی آسیبی نمی‌بینند ممکن است به‌دلیل خساراتی که

به اجزای غیرسازه‌یی موجود در آنها وارد می‌آید، سرویس‌دهی لازم را نداشته باشند.^[۲] مثلاً خسارات وارده بر بیمارستان‌ها در زلزله‌ی سانفرانسیسکو (۱۹۷۱) نشان داد که خسارت وارده به اجزای غیرسازه‌یی نه‌تنها می‌تواند اثرات زیان‌بار اقتصادی به دنبال داشته باشد، بلکه می‌تواند تهدیدی جدی برای امنیت جانی باشد.^[۱] خسارت اقتصادی ناشی از آسیب وارده به تجهیزات و اجزای غیرسازه‌یی نیز در مواردی بااهمیت خواهد بود. بررسی‌ها نشان می‌دهد که در بسیاری از سازه‌های اداری، هتل‌ها و بیمارستان‌ها، میزان سرمایه‌گذاری در اجزای سازه‌یی و غیرسازه‌یی و نیز در محتویات ساختمان‌ها - در مقایسه با سازه‌ی ساختمان - سهم قابل توجهی دارد و بروز آسیب در آنها خسارات سنگینی در بر خواهد داشت.^[۳]

هدف این مطالعه، تحلیل آسیب‌پذیری لرزه‌یی و رسم منحنی‌های شکنندگی لرزه‌یی در تجهیزات صلب بلوکی و تأثیر جداسازی لرزه‌یی به‌عنوان عاملی برای کاهش میزان آسیب‌پذیری و شکنندگی لرزه‌یی آنها است. بدین منظور در ادامه، پس از بررسی گزارش‌های فنی موجود، به تحلیل پاسخ لرزه‌یی تجهیزات بلوکی اشاره شده

است. در گام بعد با معرفی نحوه‌ی جداسازی کف تجهیزات، تأثیر جداسازی طبقه در میزان بهبود رفتار تجهیزات به کمک مقایسه‌ی منحنی‌های شکنندگی لرزه‌یی حالات مختلف تجهیزات بررسی، و سپس مطالب مطالعه‌شده جمع‌بندی و نتایج حاصله تفسیر شده است.

۲. مروری بر تحقیقات انجام شده

مطالعه‌ی پاسخ لرزه‌یی تجهیزات

در مطالعات موجود برای تحلیل لرزه‌یی سیستم‌های ثانویه از دو روش «تحلیل تاریخی‌چهی زمانی» و «تحلیل طیفی» استفاده شده است. در سال ۱۹۶۳ پاسخ دینامیکی تجهیزات بلوکی و صلب، که در بستر صلب قرار دارد، تحت تحریک لرزه‌یی افقی مورد ارزیابی قرار گرفت. [۵] در آن مطالعه، شتاب سطح زیرین تجهیزات بلوکی (شتاب پایه) به صورت مستطیلی یا به صورت پالس‌های سینوسی بیان شده است.

در سال ۱۹۹۸ پاسخ دورانی تجهیزات بلوکی بر اثر تحریکات لرزه‌یی پالسی سینوسی و کسینوسی مورد بررسی قرار گرفت. [۶] در این مطالعه، بعد از به دست آوردن معادله‌ی حاکم بر دوران سیستم، پاسخ دورانی بلوک‌های با نسبت ابعاد مختلف در حالت‌های تحلیل خطی و غیرخطی، و حل تقریبی مقایسه شد.

در سال ۲۰۰۰ پاسخ لغزش و دوران بلوک‌های صلب واقع بر بستر صلب زمین، تحت اثر شتاب افقی حاصل از زمین لرزه در چهار حالت: سکون، لغزش، دوران، و لغزش توأم با دوران مورد بررسی قرار گرفت. [۷]

شکنندگی لرزه‌یی یک احتمال شرطی برای شکست یا خرابی سیستم مورد نظر به ازای شدت زمین لرزه است. در طراحی لرزه‌یی براساس عملکرد، شکست یا خرابی به وضعیتی اطلاق می‌شود که سازه یا سیستم مورد نظر در آن وضعیت قادر به ارضای ملزومات تعریف شده در سطح عملکرد مورد نظر نباشد. چنانچه شدت زمین لرزه به عنوان تنها متغیر موجود در نظر گرفته شود (مثلاً شدت شتاب بیشینه در رکورد زلزله یا بیشینه شتاب طیفی آن در تناوب‌های کوچک‌تر و...)، احتمال شرطی شکنندگی به صورت تابعی از شدت زمین لرزه قابل محاسبه خواهد بود که آن را «منحنی شکنندگی لرزه‌یی» می‌نامند. [۸-۱۰]

در سال ۲۰۰۲ روشی برای شناسایی و بررسی شکنندگی لرزه‌یی سازه‌ها ارائه شد که در آن پاسخ سازه در قالب احتمالاتی، از طیف پاسخ کشسان، منحنی‌های طیف ظرفیت و روابط تشکیل شده برای به دست آوردن توابع توزیع احتمالاتی طیف به دست آمده است. [۱۱]

در سال ۲۰۰۱ مدل‌هایی از تقاضای تغییر شکل و نیز ظرفیت تغییر شکل دیوارهای سازه‌یی بتنی مسلح را برای سطح تأمین امنیت جانی^۱، با استفاده از روش «برآورد پارامتر بایسیان^۲» ارائه دادند. [۱۱] در سال ۲۰۰۶ نیز با استفاده از روش بیزی، منحنی‌های شکنندگی برای ساختمان‌های بتنی مسلح محاسبه شد. [۱۲]

محققین در سال ۲۰۰۶ منحنی‌های شکنندگی برای سیستم سقف کاذب را در مورد سیستم‌های ثانویه توسعه دادند. [۸] در مطالعه‌ی مذکور چهار سطح خسارت: «جرئی^۳»، «متوسط^۴»، «جدی^۵» و «کامل^۶» برای شبکه‌ی سقف تعریف شده است؛ همچنین با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی، پارامترهای تحریک ورودی و تکنیک برازش منحنی، نسبت به رسم منحنی‌های شکنندگی برای این سطوح خسارت اقدام شده است.

برای تولید «منحنی‌های شکنندگی» از پارامترهای تحریک ورودی مختلف مانند:

بیشینه شدت شتاب زلزله (PGA)، بیشینه سرعت زلزله (PGV)، تغییر مکان نسبی طبقه، شتاب طیفی در پیوندهای مشخص و شتاب طیفی در یک محدوده‌ی فرکانسی استفاده شده است.

محققین همچنین در مطالعات تحلیلی و آزمایشگاهی خود نسبت به برآورد پاسخ لرزه‌یی تجهیزات بلوکی مهارنشده^۷ و منحنی‌های شکنندگی آنها اقدام کرده‌اند. [۴] آنها در مطالعه‌ی خود تجهیزات بلوکی را بر روی میز لرزان مورد آزمایش قرار داده و در این فرایند، منحنی‌های شکنندگی را برای تجهیزات مورد استفاده به دست آورده‌اند. در سال ۱۹۹۸ حرکت گهواره‌یی تجهیزات بلوکی صلب تحت اثر تحریکات حاصل از زمین لرزه مورد مطالعه قرار گرفت و در نهایت با تعریف معیار خرابی براساس زاویه‌ی دوران بلوک، منحنی‌های شکنندگی برای بلوک‌های صلب با نسبت ابعاد مختلف رسم شد. [۱۳]

در ادامه محققین دیگری به انجام مطالعات تحلیلی و آزمایشگاهی پیرامون پاسخ لرزه‌یی تجهیزات بلوکی مهارنشده^۸ و برآورد منحنی‌های شکنندگی آنها پرداخته‌اند. [۴] آنها در مطالعه‌ی مذکور، تجهیزات بلوکی را بر روی میز لرزان مورد آزمایش قرار داده و براساس نتایج به دست آمده، منحنی‌های شکنندگی را برای تجهیزات مورد مطالعه به دست آورده‌اند.

۳. تحلیل پاسخ لرزه‌یی تجهیزات بلوکی تحت اثر زلزله

شکست تجهیزات داخل ساختمان‌ها معمولاً دوران بیش از حد در حرکت گهواره‌یی یا لغزش این تجهیزات در طول اثر زلزله را شامل می‌شود. از آنجا که این تجهیزات غالباً دارای دو حالت شکست یادشده هستند، ترکیب‌های مختلفی از حالت‌های خرابی مذکور مورد تحلیل پاسخ لرزه‌یی قرار گرفته‌اند. به عنوان مثال، در سال ۱۹۶۳ بلوک صلبی تحت تحریک ورودی سینوسی و کسینوسی، مورد تحلیل قرار داده شد. [۵] در زمینه‌ی تحلیل پاسخ دورانی و لغزشی تجهیزات بلوکی در اثر زلزله مطالعات دیگری نیز صورت گرفته است. [۲]

۱.۳. معرفی تجهیزات مورد نظر برای تحلیل پاسخ لرزه‌یی

در میان تجهیزات مختلف ساختمان‌ها، تجهیزاتی وجود دارند که تقریباً از نظر هندسی به صورت بلوکی‌اند و معمولاً به دو صورت در داخل ساختمان‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرند: [۷]

الف) تجهیزات مهارشده^۹؛

ب) تجهیزات مهارنشده^{۱۰}.

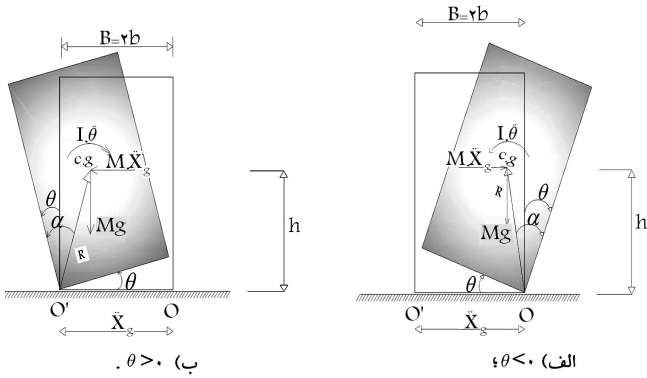
تجهیزات مهارشده به تجهیزاتی اطلاق می‌شود که در بستر خود مهار شده‌اند و از وقوع حرکت آنها تا حدی جلوگیری به عمل آمده است. تجهیزاتی که در این مطالعه مورد بررسی قرار گرفته‌اند، جزو آن دسته از تجهیزات بلوکی‌اند که در بستر خود آزادانه و بدون هیچ‌گونه مهارشدگی قرار گرفته‌اند.

۱.۱.۳. شرایط مرزی برای شروع حرکت بلوک

در برابر تحریک لرزه‌یی وارده بر بستر تجهیزات بلوکی، معمولاً احتمال وقوع دو نوع پاسخ وجود دارد: [۱۳، ۱۴]

الف) لغزش^{۱۱}؛

ب) دوران یا حرکت گهواره‌یی^{۱۲}.



شکل ۲. نمودار آزاد بلوک در حال دوران بر اثر تحریک لرزه‌یی افقی.

در شکل ۲ دوران در جهت مثلثاتی مثبت فرض شده است. چنانچه شکل ۲ نشان‌گر نمودار آزاد نیروهای وارده بر بلوک در حال حرکت گهواره‌یی باشد، در این صورت معادله‌ی دینامیکی حاکم بر این حرکت عبارت خواهد بود از: [۱۳، ۶]

$$\theta < 0 \Rightarrow I \cdot \ddot{\theta} + mgR \sin(-\alpha - \theta) = -m\ddot{x}_g R \cos(-\alpha - \theta) \quad (3)$$

$$\theta > 0 \Rightarrow I \ddot{\theta} + mgR \sin(\alpha - \theta) = -m\ddot{x}_g R \cos(\alpha - \theta) \quad (4)$$

از ترکیب معادلات ۳ و ۴، معادله‌ی ۵ به دست می‌آید: [۱۳، ۶]

$$I = \frac{4MR^2}{3}, \quad p = \sqrt{\frac{3g}{4R}}$$

$$\Rightarrow \ddot{\theta}(t) = -p^2 [\text{Sin}(\alpha \text{sgn}(\theta(t)) - \theta(t)) + \frac{\ddot{x}_g}{g} \text{Cos}(\alpha \text{sgn}(\theta(t)) - \theta(t))] \quad (5)$$

معادله‌ی اخیر، بیان‌گر حرکت گهواره‌یی بلوک بر بستر صلب زمین است که تحت تحریک افقی با شدت شتاب \ddot{x}_g قرار دارد. [۱۳، ۶، ۱۴] در معادله‌ی ۵ واحد عبارت $p = \sqrt{\frac{3g}{4R}}$ «رادیان بر ثانیه» است. پارامتر R که فاصله‌ی مرکز ثقل یا مرکز هندسی بلوک از مرکز دوران است، معیاری برای اندازه‌ی بلوک است. با توجه به معادله‌ی ۵، هرچه اندازه‌ی بلوک بزرگ‌تر باشد، p کم‌تر خواهد بود. مقدار فرکانس بلوک در حال دوران، ثابت نیست و نسبت به شدت ارتعاش وارده بسیار حساس است. [۵] در معادله‌ی ۵، مشخصه‌ی دینامیکی بلوک تجهیزات است. این مقدار برای تجهیزات الکترونیکی برابر $p \approx 2 \frac{\text{rad}}{\text{s}}$ و برای تجهیزات خانگی برابر $p \approx 8 \frac{\text{rad}}{\text{s}}$ برآورد شده است. [۶]

ضریب بازگردانی r

ضریب بازگردانی به صورت $r = \frac{\dot{\theta}_1}{\dot{\theta}_2}$ ، برای اعمال کاهش انرژی یا استهلاک انرژی در اثر برخورد بین بلوک در حال دوران و بستر در نظر گرفته می‌شود که در آن $\dot{\theta}_1$ نشان‌گر میزان سرعت دورانی بلوک درست قبل از ضربه یا برخورد بلوک به سطح زیرین است و $\dot{\theta}_2$ سرعت زاویه‌یی بلوک بلافاصله بعد از برخورد است. این رابطه نشان می‌دهد که سرعت زاویه‌یی بلوک بلافاصله بعد از وقوع برخورد، \sqrt{r} برابر سرعت زاویه‌یی بلوک قبل از برخورد است. از ترکیب معادلات مربوط به حرکت بلوک در دو وضعیت قبل و پس از برخورد براساس روابط فوق خواهیم داشت: [۱۳، ۶]

$$r = \left[1 - \frac{3}{4} \text{Sin}^2 \alpha \right]^2 \quad (6)$$

چنانچه میزان نیروی محرک ورودی به تجهیزات بلوکی مهارنشده (در راستای موازی با سطوح تماس بین سطح بلوک و سطح بستر آن)، بر نیروی اصطکاک موجود در بین سطوح تماس بلوک و سطح زیرین غلبه کند، بلوک ممکن است شروع به لغزش کند. همچنین اگر لنگر حاصل از نیروی محرک وارده به بلوک، بر لنگر حاصل از نیروهای مقاوم در برابر تحریک غلبه کند، بلوک شروع به دوران خواهد کرد. در حالت دیگری نیز تجهیزات ممکن است هر دو پاسخ لغزش و دوران را تماماً از خود نشان دهد.

در این مطالعه بلوک صلب با ابعاد $B = 2b$ و $H = 2h$ و نسبت ابعاد b/h که در آن:

$$\alpha = \text{tg}^{-1} \left(\frac{b}{h} \right) \quad \text{و} \quad R = \sqrt{b^2 + h^2} \quad (1)$$

و R فاصله‌ی مرکز هندسی و ثقل این بلوک از نقطه‌ی دوران است (شکل ۱). برای شروع حرکت گهواره‌یی در بلوک باید معادله‌ی ۲ برقرار باشد: [۱۳]

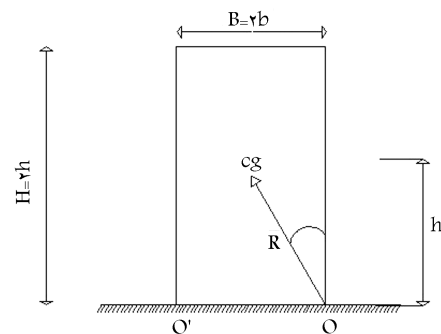
$$\Rightarrow |\ddot{x}_g| \geq \frac{b}{h} (g + \ddot{y}_g) \quad (2)$$

در این حالت، نیروی اینرسی افقی کم‌تر از بیشینه نیروی اصطکاک موجود بین سطوح تماس بلوک و تکیه‌گاه مربوطه است و این حالت منجر به عدم رخداد لغزش در بلوک خواهد شد؛ اما در این حالت، لنگر واژگونی بیشتر از لنگر مقاوم شده و منجر به شروع حرکت گهواره‌یی در بلوک خواهد شد. از سوی دیگر، برای رخداد حرکت گهواره‌یی بدون رخداد حرکت لغزشی، باید شرط $\mu_s > \frac{b}{h} g$ برقرار باشد. [۱۳، ۶]

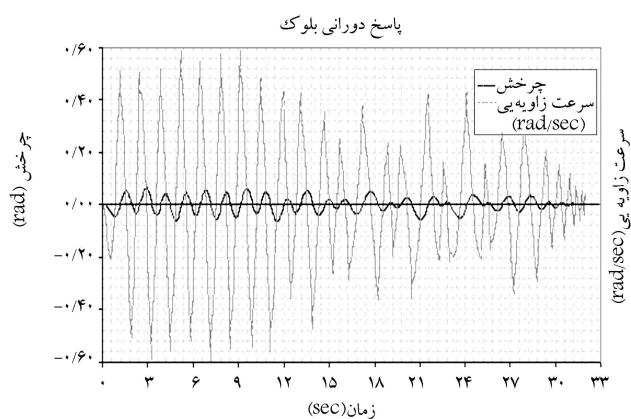
این مطالعه با فرض برقراری شرط فوق، و این که مقدار ضریب اصطکاک بین بلوک و سطح زیرین آن به‌اندازه‌یی است که هیچ‌گونه لغزشی در بلوک صورت نگیرد و مطالعات برای حالتی که بلوک تحت تحریک لرزه‌یی وارده فقط دچار حرکت گهواره‌یی قرار گرفته انجام شده است.

۲.۱.۳. حرکت گهواره‌یی بلوک صلب تحت تحریک لرزه‌یی افقی

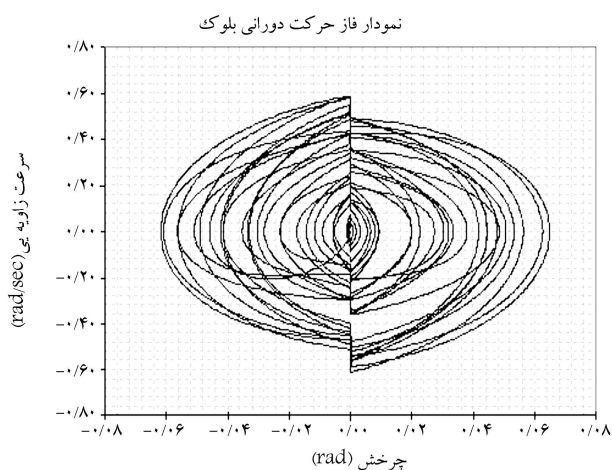
بلوک صلبی را در نظر می‌گیریم که تحت اثر تحریک لرزه‌یی افقی حاصل از زمین لرزه قرار گرفته است (شکل ۱). چنان که پیش‌تر اشاره شد، برای شروع حرکت گهواره‌یی بلوک لازم است میزان لنگر محرک حاصل از زمین لرزه بیشتر از میزان لنگر مقاوم حاصل از وزن بلوک باشد که با توجه به معادله‌ی ۲، مقدار قدر مطلق شتاب وارده بر بلوک برای شروع دوران در حالتی که تحریک فقط افقی باشد، برابر $|\ddot{x}_g| \geq \frac{b}{h} g$ است. [۱۳] در این صورت با توجه به شکل ۱ الف و ۲ ب، معادله‌ی حاکم بر حرکت گهواره‌یی بلوک صلب در اثر تحریک حاصل از زمین لرزه به صورت روابط ۳ و ۴ خواهد بود.



شکل ۱. مشخصات هندسی بلوک.

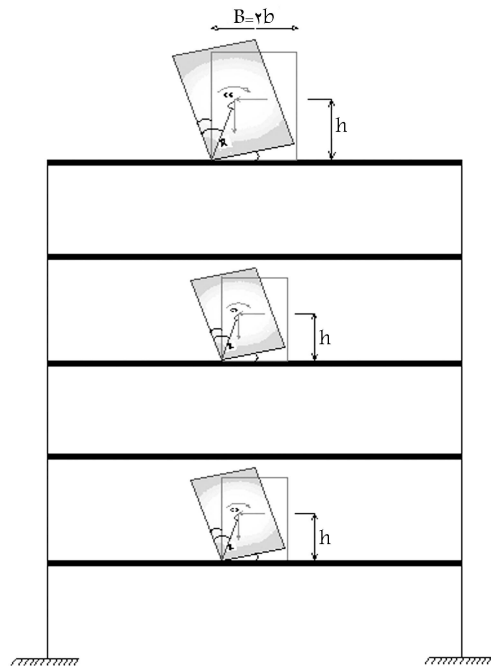


الف) تاریخچه‌ی زمانی پاسخ دوران و سرعت زاویه‌ی بلوک تحت زلزله ال-سنترو؛



ب) نمودار سرعت زاویه‌ی بلوک بر حسب دوران بلوک (Phase Plot) ($b/h=0.75$)

شکل ۴. مشخصات پاسخ دوران بلوک در حال دوران.



شکل ۵. بلوک تجهیزات واقع در طبقات ساختمان.

از رابطه‌ی ۶ می‌توان بیشترین مقدار r را برای بلوک دارای زاویه‌ی α که تحت حرکت گهواره‌یی قرار گرفته به دست آورد.^[۱۳۶] در این مطالعه، همه‌ی تحلیل‌ها با در نظر گرفتن بیشینه ضریب بازگردانی (r) (که از معادله‌ی ۶ به دست می‌آید)، انجام شده است.

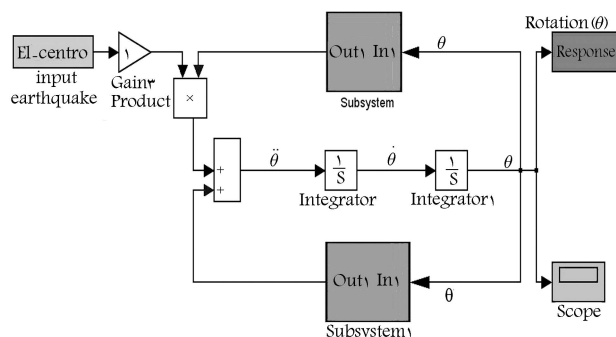
۳.۱.۳. روش انتگرال‌گیری عددی جهت حل معادله‌ی دیفرانسیل مرتبه‌ی دوم

در این مطالعه، معادله‌ی ۵ را که پاسخ حرکت گهواره‌یی بلوک صلب بر اثر تحریک افقی حاصل از زمین‌لرزه است، با استفاده از نرم‌افزار MATLAB، (دستور ۴۵ ODE) که معادلات دیفرانسیل را به روش انتگرال‌گیری عددی مرتبه‌ی چهارم رانگ-کوتا حل می‌کند، حل و تاریخچه‌ی زمانی پاسخ دوران سیستم بلوک را تحت تحریک‌های ورودی مختلف به دست آورده‌ایم. در شکل ۳ نمودار محاسبه‌ی پاسخ دوران بلوک صلب، در محیط SIMULINK رسم شده است. بدین ترتیب، با برنامه‌نویسی در نرم‌افزار MATLAB و SIMULINK، پاسخ سیستم را با در نظر گرفتن اثر ضربه بین بلوک و سطح زیرین آن محاسبه کرده‌ایم.

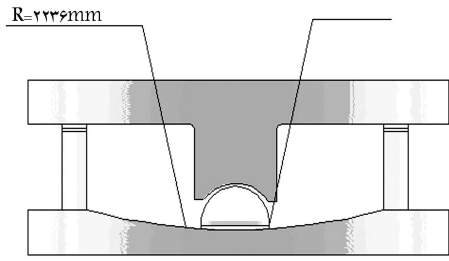
شکل ۴ علاوه بر تاریخچه‌ی زمانی دوران و سرعت دوران بلوک، نمودار سرعت زاویه‌ی بلوک در حال دوران بر حسب زاویه‌ی دوران بلوک را نیز در شرایط مختلف دوران نشان می‌دهد. چنان‌که مشاهده می‌شود، پاسخ دوران بلوک بعد از دوران در انتهای زمان تحریک بر اثر زلزله، میرا شده و به صفر رسیده است. این حالت بر اثر کاهش سطح انرژی در بلوک حاصل از ضربه، پس از برخورد بین بلوک و سطح زیرین، اتفاق می‌افتد.

۲.۳. پاسخ لرزه‌یی تجهیزات بلوکی واقع بر سطح طبقات ساختمان

در این مبحث پاسخ دینامیکی تجهیزات مورد نظر در طبقات ساختمان محاسبه و بررسی خواهد شد. از آنجا که جرم تجهیزات در مقایسه با جرم طبقه‌ی مربوطه قابل چشم‌پوشی است، برای به دست آوردن پاسخ لرزه‌یی بلوک کافی است پاسخ شتاب طبقه‌ی مربوطه را که تجهیزات در آن واقع است، بر اثر تحریک لرزه‌یی حاصل از زمین‌لرزه به دست آورده و به‌عنوان تحریک ورودی به بلوک تجهیزات اعمال شود. یادآور می‌شود که در روش دیگری می‌توان از طیف پاسخ به دست آمده برای طبقه‌ی مورد نظر، برای تحلیل لرزه‌یی بلوک تجهیزات استفاده کرد. در این مطالعه از حالت اول (تاریخچه‌ی زمانی پاسخ شتاب مطلق طبقه) تحریک ورودی به بلوک تجهیزات استفاده شده است. مطابق شکل ۵، ساختمان مذکور یک ساختمان پنج‌طبقه است و مشخصات جرم، سختی و فرکانس آن به صورت جدول ۱ است.^[۱]



شکل ۳. نمودار محاسبه تاریخچه‌ی زمانی پاسخ دوران بلوک تحت اثر زلزله، در MATLAB و SIMULINK.



شکل ۶. سیستم FPS مورد استفاده در جداسازی کف طبقات. [۱۵]

(یا طبقه‌ی مربوطه در این مطالعه)، انجام می‌دهد. اصول عملکردی سیستم‌های FPS، در سال‌های ۱۹۸۷ تا ۱۹۹۴ بسط و توسعه داده شده است. [۱۵]

در سیستم یادشده، از یک میراگر مایع ویسکوز به منظور تقویت و بهبود توانایی سیستم جداساز در جذب انرژی، استفاده شده است. در شکل ۶ ابعاد انتخاب شده برای جداساز را برای نیل به مشخصات دینامیکی مورد نظر نشان داده است. این تکیه‌گاه از سطح لغزان کروی و یک گوی لغزان^{۱۶} و از ماده‌ی با مقاومت فشاری بالا تشکیل شده است. سطح قابل لغزش مذکور، از آلیاژ آهن با سطح جلا داده شده، فولاد غیر قابل زنگ نوع ۳۱۶ تشکیل شده است. [۱۵]

۱.۲.۴. محاسبه‌ی پاسخ حرکت گهواره‌ی بلوک صلب واقع بر کف جداسازی شده

چنان که پیش‌تر گفته شد، رابطه‌ی ۵ برای محاسبه‌ی پاسخ دوران بلوک مورد استفاده قرار خواهد گرفت. با توجه به شکل ۷ که نیروهای وارده بر کف جداسازی شده و بلوک روی آن را تحت اثر شتاب ناشی از زلزله نشان می‌دهد، معادلات دینامیکی حاکم بر ارتعاش سیستم طبقه، کف جداسازی شده و تجهیزات بالای آن عبارت است از: [۱۵]

$$m_1 (\ddot{U}_{block} + \ddot{U}_{is} + \ddot{U}_f) + F_{block} = 0 \quad (8)$$

$$m_2 (\ddot{U}_{is} + \ddot{U}_f) + F_{is} - F_{block} = 0 \quad (9)$$

که در آنها m_1 جرم بلوک مورد نظر، m_2 جرم کف جداسازی شده، \ddot{U}_{block} شتاب مرکز ثقل بلوک صلب نسبت به کف جداسازی شده، \ddot{U}_{is} شتاب مرکز کف جداسازی شده نسبت به سطح طبقه‌ی مربوطه، \ddot{U}_f شتاب مطلق طبقه، و F_{is} نیروی افقی به‌وجود آمده در سیستم FPS و میراگر گرانروی است که به‌صورت معادله‌ی ۱۰ است. [۱۵]

$$F_{is} = \frac{W^*}{R} U_{is} + \mu W^* \text{sgn}(\dot{U}_{is}) + C \cdot \dot{U}_{is} \quad (10)$$

که در آن C ضریب میرایی در میراگر گرانروی مورد استفاده، و μ ضریب اصطکاک بین بلوک و کف جداسازی شده است. چنان که پیش‌تر نیز اشاره شد، W^* برابر وزن قائم موجود در بالای سطح جداسازی است که در صورت وجود مؤلفه‌ی قائم تحریک (y_g) ، $W^* = Mg(1 + y_g/g)$ خواهد بود. با توجه به روابط ۸ و ۹، معادله‌ی حاکم بر ارتعاش کف جداسازی شده چنین نوشته می‌شود: [۱۵]

$$m_2 \ddot{U}_{is} - F_{is} = F_{block} - m_2 \ddot{U}_f \quad (11)$$

$$m_2 \ddot{U}_{is} - C \cdot \dot{U}_{is} - \left(\frac{W^*}{R} U_{is} + \mu W^* \text{sgn}(\dot{U}_{is}) \right) = F_{block} - m_2 \ddot{U}_f \quad (12)$$

در رابطه‌ی ۱۱ و ۱۲، F_{block} نیروی عکس‌العمل افقی موجود بین بلوک و کف جداسازی شده است که نحوه محاسبه آن در ادامه این مطلب ارائه می‌شود.

جدول ۱. مشخصات جرم، سختی و فرکانس ساختمان مورد استفاده در این مطالعه.

$K = \begin{bmatrix} 1062 & -531 & 0 & 0 & 0 \\ -531 & 852 & -321 & 0 & 0 \\ 0 & -321 & 642 & -321 & 0 \\ 0 & 0 & -321 & 432 & -111 \\ 0 & 0 & 0 & -111 & 111 \end{bmatrix} \times 10^5 (kg/cm^2)$
$M = \begin{bmatrix} 36 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 36 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 36 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 36 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 36 \end{bmatrix} \times 10^3 (kg)$
$\omega = 9/41, 21/29, 34/83, 50/41, 65/67 \text{ Rad/sec}$

معادله‌ی ۵ که بیانگر پاسخ حرکت گهواره‌ی تجهیزات بلوکی تحت تحریک افقی حاصل از زمین‌لرزه است، هنگامی که واقع بر طبقات ساختمان باشد، به معادله‌ی ۷ تبدیل می‌شود:

$$\ddot{\theta}(t) = -p^2 [\text{Sin}(\alpha \cdot \text{sgn}(\theta(t)) - \theta(t)) + \frac{\ddot{u}_f + \ddot{x}_g}{g} \text{Cos}(\alpha \cdot \text{sgn}(\theta(t)) - \theta(t))] \quad (7)$$

که در آن \ddot{u}_f پاسخ شتاب نسبی طبقه، و $(\ddot{u}_f + \ddot{x}_g)$ برابر پاسخ شتاب مطلق طبقه‌ی است که تجهیزات در آن واقع است.

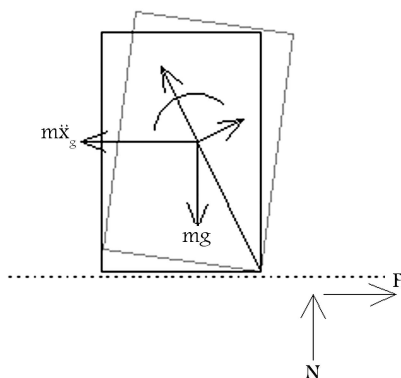
۴. کنترل پاسخ لرزه‌ی تجهیزات بلوکی به‌کمک جداسازی کف طبقات

۱.۴. جداسازی لرزه‌ی کف^{۱۴}

علاوه بر تدابیر به‌عمل آمده برای کنترل لرزه‌ی سیستم‌های سازه‌ی، در امر کنترل پاسخ لرزه‌ی سیستم‌های غیرسازه‌ی نیز از تجهیزات جداسازی لرزه‌ی و استهلاک انرژی استفاده می‌شود. در یکی از تحقیقات گسترده‌ی که در زمینه جداسازی لرزه‌ی طبقه صورت گرفته است [۱۵] محققین به مطالعات آزمایشگاهی و تحلیلی جداسازی لرزه‌ی طبقاتی پرداخته‌اند که مراکز رایانه‌ی بوده و حاوی کابینت‌های بلوکی‌اند. در مطالعه‌ی یادشده، در حالت بدون جداسازی و حالات جداسازی شده با سه نوع ترکیب تجهیزات جداساز لرزه‌ی و استهلاک انرژی مطالعات تجربی و تحلیلی صورت گرفته و میزان پاسخ‌ها در حالات مختلف با یکدیگر مقایسه شده‌اند.

۲.۴. معرفی اجزای سیستم جداساز لرزه‌ی کف مطالعه‌شده

در این مطالعه، برای جداسازی کف طبقه‌ی که تجهیزات مورد نظر روی آنها واقع شده‌اند از تکیه‌گاه لغزشی اصطکاکی پاندولی (FPS)^{۱۵} یا سیستم گوی و قوس، به‌عنوان سیستم جداساز لرزه‌ی استفاده شده است. اصول کلی عملکرد سیستم FPS به این صورت است که تکیه‌گاه مذکور، سازوکار جداسازی را با ایجاد نرمی به‌همراه قابلیت جذب انرژی در سطوح تماس بین کف جداسازی شده و سطح زمین



شکل ۸. نمودار آزاد نیروهای وارده بر بلوک در حال دوران تحت اثر زلزله.

افقی برابر \ddot{x}_g قرار گرفته است، مطابق رابطه‌ی ۵ (که در بخش سوم به دست آمد) خواهد بود. لذا در حالت جلدسازی شده به دلیل این که شتاب مطلق رسیده به بلوک بر اثر ارتعاش پایه، برابر با $(\ddot{U}_{is} + \ddot{U}_f)$ است، معادله‌ی حاکم بر حرکت گهواره‌یی بلوک، عبارت خواهد بود از:

$$\ddot{\theta}(t) = -p^\nu [\text{Sin}[\alpha \cdot \text{sgn}(\theta(t)) - \theta(t)] + \frac{(\ddot{U}_{is} + \ddot{U}_f)}{g} \text{Cos}[\alpha \cdot \text{sgn}(\theta(t)) - \theta(t)]] \quad (15)$$

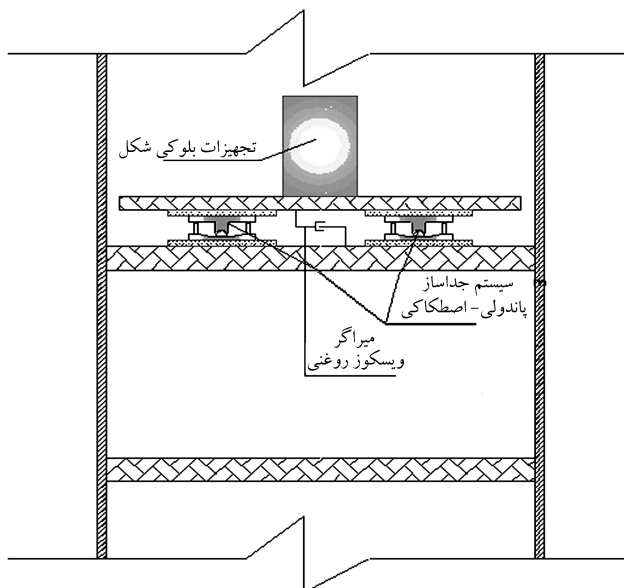
۳.۴. نتایج حاصل از تحلیل پاسخ بلوک‌های صلب بر روی کف جلدسازی شده

باتوجه به روابط حاصله، پاسخ بلوک واقع بر کف جلدسازی شده در نمونه‌هایی محاسبه می‌شود.

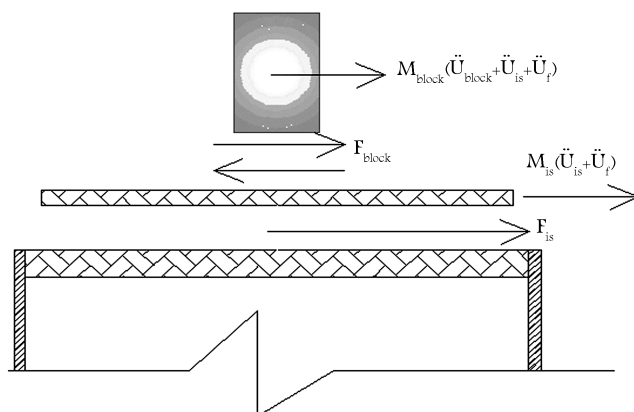
براساس روابط بالا، در شکل ۹ پاسخ دورانی بلوکی با نسبت ابعادی $b/h = 0.25$ در طبقه‌ی چهارم و در حالت بدون جداساز و با جداسازی کف نشان داده شده است. بمنظور انجام تحلیل‌های دینامیکی تاریخچه زمانی از رکورد زلزله ال‌سنسترو استفاده شده است. حداکثر شتاب PGA این رکورد به دو مقدار مختلف مقیاس شد. پاسخ بلوک صلب در دو حالت بدون جداساز لرزه‌یی و با جداسازی لرزه‌یی تحت رکورد زلزله با دو مقدار مختلف PGA در طبقه چهارم ساختمان فرضی محاسبه و نتایج حاصل در شکل ۹ ارائه شده است. بر اساس این نتایج، بلوک در حالت بدون جداسازی لرزه‌یی طی بارگذاری تحت هر دو شتاب‌نگاشت واژگون شده است، در حالی‌که در حالت دارای جداسازی، بلوک با نسبت ابعادی $\frac{b}{h} = 0.25$ بعد از حرکت گهواره‌یی به حالت سکون و پایداری خود برگشته است. در نسبت ابعادی $\frac{b}{h} = 0.15$ نیز اگرچه بلوک واژگون شده اما این پاسخ نسبت به حالت قبل با تاخیر زمانی قابل توجهی همراه بوده است.

۵. تحلیل شکنندگی لرزه‌یی تجهیزات^{۱۷}

شکنندگی لرزه‌یی بیان‌گر احتمال شرطی^{۱۸} شکست یا خرابی سیستم مورد نظر به‌ازای شدت زمین‌لرزه است.^[۱۶، ۱۷، ۱۸] در طراحی لرزه‌یی براساس عملکرد، شکست یا خرابی به حالتی گفته می‌شود که سازه یا سیستم مورد نظر قادر نباشد ملزومات تعریف شده در سطح عملکرد مورد نظر را ارضاء کند. چنانچه شدت زمین‌لرزه به‌عنوان تنها متغیر موجود مد نظر باشد (مثلاً شدت شتاب بیشینه در رکورد زلزله یا شتاب بیشینه‌ی طیفی آن در تناوب‌های کوچک‌تر...)، احتمال شرطی شکست به‌صورت



الف) نمای شماتیک از کف جلدسازی شده در طبقات ساختمان؛



ب) نیروهای وارد بر کف جلدسازی شده و بلوک روی آن.

شکل ۷. نمایی از کف جلدسازی شده و نیروهای وارده بر آن.

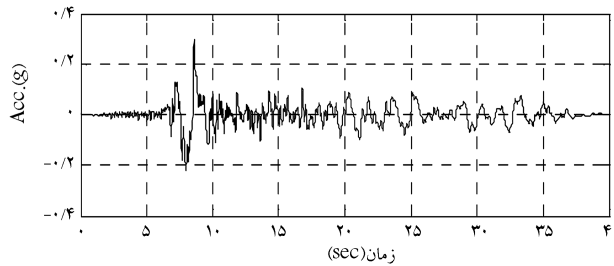
مطابق شکل ۸، چنانچه به بلوکی به جرم m واقع در سطح زمین، شتاب افقی \ddot{x}_g وارد شود آنگاه نیروهای وارده بر بلوک (f) را می‌توان چنین محاسبه کرد:^[۷]

$$f = m [\ddot{x}_g - \text{sgn}(\theta) m R \dot{\theta}^\nu \text{Sin}(\alpha - |\theta|) - m R \dot{\theta} \text{Cos}(\alpha - |\theta|)] \quad (13)$$

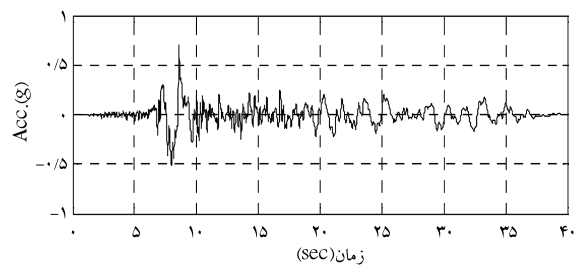
در رابطه‌ی ۱۳، f میزان نیرویی است که بلوک در حال دوران، به سطح زیرین خود وارد می‌کند. با توجه به رابطه‌ی ۹، در حالتی که بلوک بر روی کف جلدسازی شده قرار داشته باشد شتاب وارده به بلوک در قالب $\ddot{U}_{is} + \ddot{U}_f$ بیان می‌شود و f نیروی وارد از طرف بلوک در حال دوران، بر کف جلدسازی شده (F_{block}) خواهد بود که طبق معادله‌ی ۱۴ محاسبه می‌شود.

$$F_{block} = m_\nu [(\ddot{U}_{is} + \ddot{U}_f) - \text{sgn}(\theta) R \dot{\theta}^\nu \text{Sin}(\alpha - |\theta|) - R \dot{\theta} \text{Cos}(\alpha - |\theta|)] \quad (14)$$

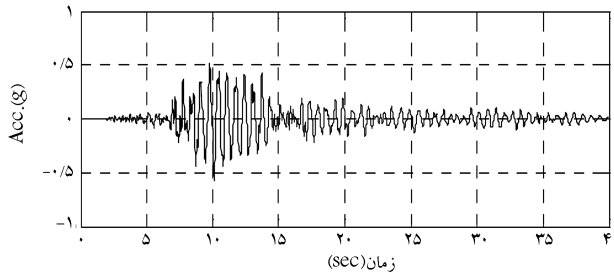
بنابراین، در هر لحظه نیرویی برابر F_{block} از سوی بلوک به‌عنوان عکس‌العمل، به سطح زیرین آن وارد می‌شود. از سوی دیگر، پاسخ دورانی بلوکی که تحت شتاب



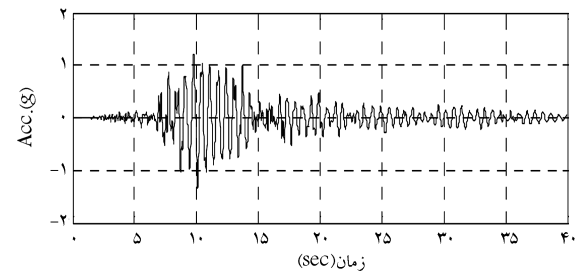
ه) تاریخچه زمانی شتاب زلزله ال سنتر و $PGA=0.3$



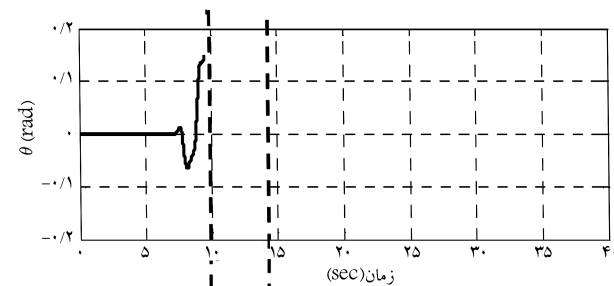
الف) تاریخچه زمانی شتاب زلزله ال سنتر و $PGA=0.7$



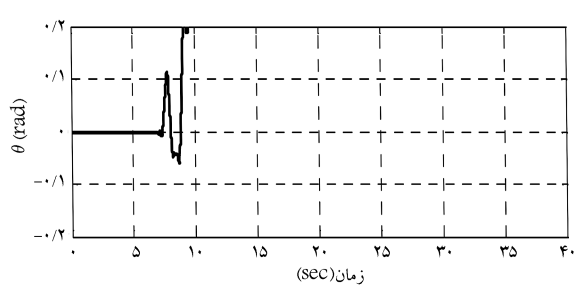
و) تاریخچه زمانی شتاب طبقه 4 تحت زلزله ال سنتر و $PGA=0.3$



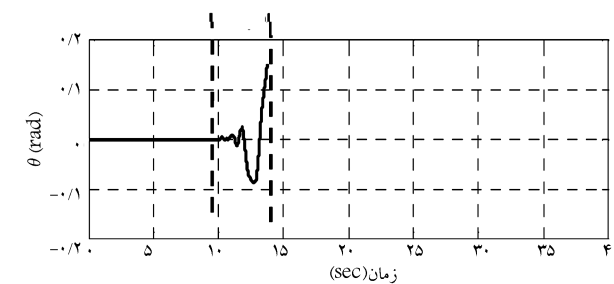
ب) تاریخچه زمانی شتاب طبقه 4 تحت زلزله ال سنتر و $PGA=0.7$



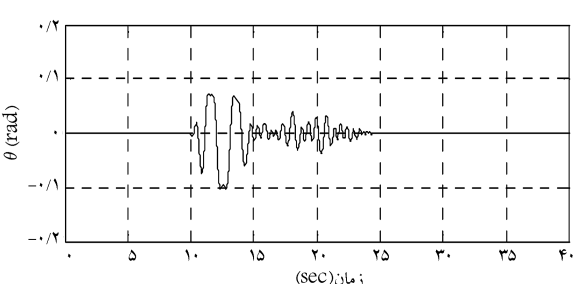
ح) تاریخچه زمانی پاسخ دورانی بلوک صلب در طبقه 4، $b/h=0.15$ ، $PGA=0.3$ g



ج) تاریخچه زمانی پاسخ دورانی بلوک صلب در طبقه 4، $b/h=0.25$ ، $PGA=0.7$ g



ی) تاریخچه زمانی پاسخ دورانی بلوک صلب بر روی کف جداسازی شده در طبقه 4 و $b/h=0.15$ ، $PGA=0.3$ g



د) تاریخچه زمانی پاسخ دورانی بلوک صلب بر روی کف جداسازی شده در طبقه 4 و $b/h=0.25$ ، $PGA=0.7$ g

شکل ۹. بررسی تاثیر جداسازی لرزه‌یی کف در پاسخ دورانی بلوک صلب.

لرزه‌یی کف برای کاهش پاسخ دینامیکی تجهیزات در حالت عمومی استنتاج شده است.

۱.۵. سطوح خسارت و معیارهای خرابی برای تجهیزات بلوکی

برای به دست آوردن منحنی‌های شکنندگی، لازم است ابتدا حالت‌های شکست معین شود. معمولاً برای تجهیزات، با این حالت‌های شکست مواجه خواهیم بود: «واژگونی تجهیزات بلوکی بر اثر دوران بیش از حد به هنگام زلزله»، «خسارت وارده

تابعی از شدت زمین‌لرزه خواهد بود که به آن «شکنندگی لرزه‌یی» گفته می‌شود. در این مطالعه، شکنندگی لرزه‌یی و آسیب‌پذیری تجهیزات غیرسازه‌یی بلوکی و صلب را در قالب منحنی‌های شکنندگی برای حالات مختلف قرارگیری تجهیزات محاسبه کرده‌ایم. بدین صورت که بعد از تعریف سطح خسارت برای این تجهیزات، به تحلیل احتمالاتی روی پاسخ لرزه‌یی بلوک‌های صلب پرداخته‌ایم و احتمال رسیدن یا تجاوز پاسخ بلوک از سطح خسارت تعریف شده، به‌ازای سطوح مختلف شدت زمین‌لرزه، را محاسبه کرده‌ایم. سپس با مقایسه‌ی این نمودارها، قابلیت روش‌های جداسازی

انتخابی، با مقدار PGA به دست آمده مقایسه خواهند شد و در مجموع تعداد ۴۰۰۰ رکورد ($4000 = 50 \times 80$)، برای انجام تحلیل‌ها مورد استفاده قرار خواهد گرفت. با تأمین مجموعه رکوردهای ورودی، به تحلیل پاسخ دورانی تجهیزات بلوکی صلب، با نسبت ابعاد مختلف خواهیم پرداخت. پاسخ بلوک با توجه به روابط ۷ و ۱۵ محاسبه خواهد شد و تاریخچه‌ی زمانی مقادیر θ در حین ارتعاش بلوک، به دست خواهند آمد. طی محاسبه‌ی پاسخ بلوک برای هر زلزله، به هنگام تجاوز مقدار پاسخ بلوک از حد مجاز ($\theta = \alpha = tg^{-1} \frac{b}{h}$)، فرایند تحلیل برای رکورد مربوطه، متوقف می‌شود. در پایان تحلیل هر 80 رکورد به‌ازای هر PGA، احتمال واژگونی برای هر PGA از رابطه‌ی ۱۷ به دست می‌آید:

$$P_{fi} = \frac{N_i(\theta > \theta_c)}{N} = \frac{N_i}{4000} \quad (17)$$

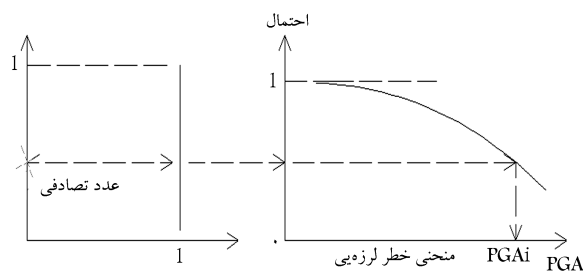
که در آن P_{Fi} احتمال خرابی بلوک به‌ازای PGA_i ، $N_i(\theta > \theta_c)$ تعداد پاسخ‌هایی که مقدار آنها به‌ازای PGA_i انتخاب شده، از مقدار $\theta = \theta_c = tg^{-1} \frac{b}{h}$ بیشتر شده است. بعد از محاسبه‌ی همه مقادیر P_{Fi} به‌ازای مقیاس‌های PGA_i ، تابع چگالی $F(PGA_i)$ محاسبه شده و توزیع تجمعی احتمال^{۱۱}، برای بلوکی با نسبت ابعاد معین مطابق رابطه‌ی ۱۸ محاسبه می‌شود:^[۱۱]

$$F_Y(y) = P(Y \leq y | IM = PGA_i) = \int_{-\infty}^y f_Y(y) dy = \int_{-\infty}^y \frac{1}{y \cdot \sigma \sqrt{2\pi}} \cdot e^{\left[\frac{1}{2\sigma^2} \cdot Ln\left(\frac{y}{\mu_y}\right) \right]} dy \quad (18)$$

رابطه‌ی ۱۸ را می‌توان چنین خلاصه کرد:

$$F_Y(y) = \phi \left[\frac{Ln(y/\mu_y)}{\sigma} \right] \quad (19)$$

در این روابط ϕ تابع توزیع نرمال استاندارد تجمعی، μ_y میانگین از توزیع داده‌ها، σ انحراف معیار استاندارد لگاریتمی و $P(Y \leq y | IM = PGA_i)$ احتمال خرابی بلوک (واژگونی بلوک) به‌ازای رکوردی با بیشینه شتاب PGA_i است. در پایان، با رسم مقادیر احتمال به دست آمده برحسب بیشینه شتاب وارده، برای هر بلوک با نسبت ابعاد مختلف، منحنی‌های شکنندگی حاصل خواهد شد. شکل ۱۱ روش گام‌به‌گام این محاسبات را خلاصه‌وار نشان می‌دهد.



شکل ۱۰. نحوه‌ی تولید مقادیر بیشینه‌ی شتاب (PGA_i)، به روش تبدیل معکوس.

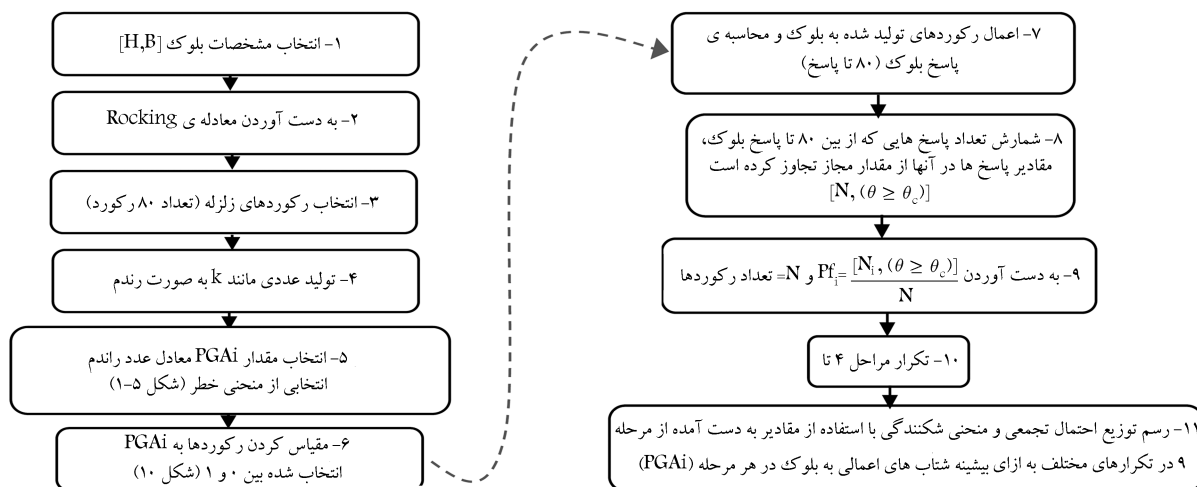
به تجهیزات بر اثر ضربه‌ی وارده‌ی بیش از حد به سطح زیرین آنها بر اثر برخورد با پایه، «جابه‌جایی و لغزش بیش از حد تجهیزات در بستر خود و تحمل شتاب بالا به هنگام زلزله». در این مطالعه، آسیب «واژگونی تجهیزات بلوکی بر اثر دوران بیش از حد و یا تجاوز از آن» به هنگام زمین لرزه، به عنوان معیاری برای خرابی و شکست در تجهیزات تعریف شده است. مقدار دوران حدی برای وقوع حالت خرابی به شکل معادله‌ی ۱۶ ارائه می‌شود:

$$\left(\theta = \theta_{cr} \geq \alpha = tg^{-1} \frac{b}{h} \right) \quad (16)$$

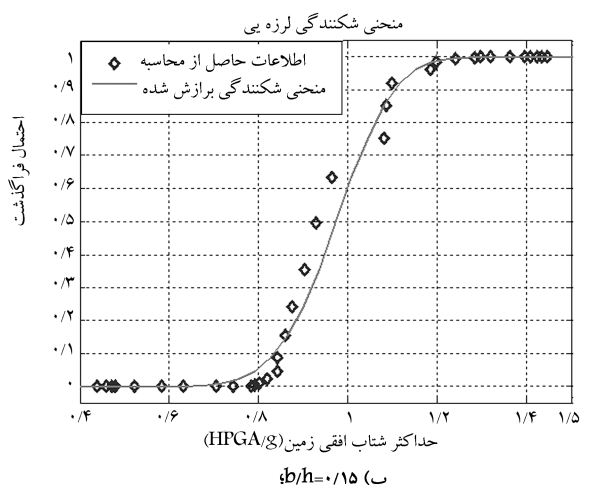
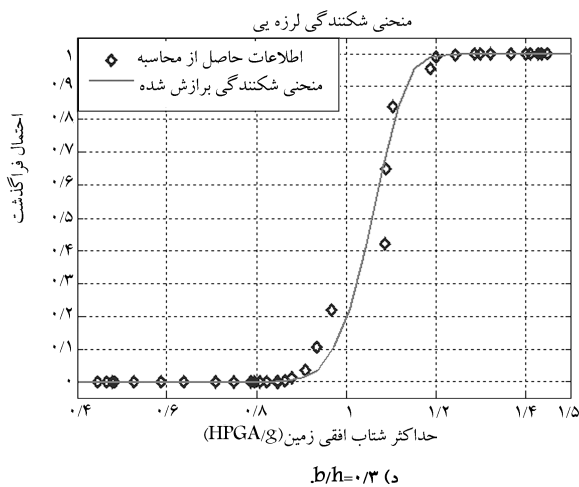
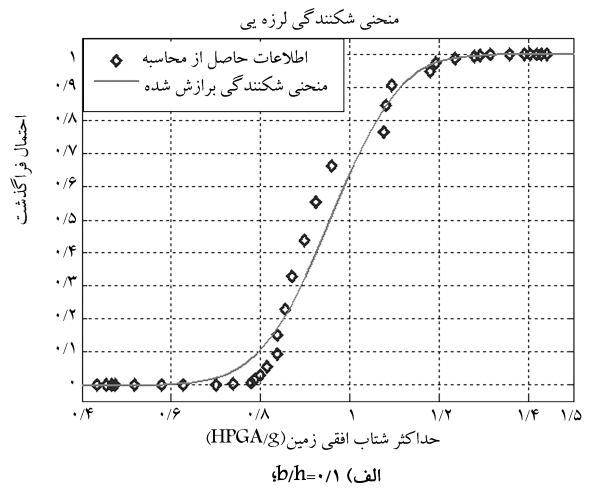
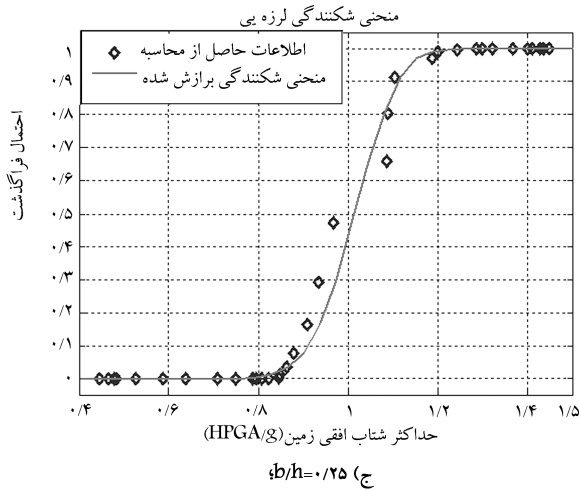
در این رابطه θ زاویه‌ی دوران بلوک صلب در هر لحظه، θ_{cr} زاویه‌ی دوران بحرانی بلوک صلب و b, h ابعاد بلوک صلب انتخابی است.

۲.۵. تعیین زلزله ورودی برای مطالعه‌ی شکنندگی لرزه‌یی

در این مطالعه 80 رکورد شتاب مربوط به زمین‌لرزه‌های مختلف از سایت مرکز تحقیقات مهندسی زلزله‌ی پاسیفیک^{۱۹}، به عنوان زلزله‌های ورودی انتخاب شده‌اند. به منظور توسعه‌ی خواص رکوردهای زلزله‌های انتخابی از روش شبیه‌سازی مونت‌کارلو استفاده شده است. بدین ترتیب که تعداد 50 عدد تصادفی بین 0 و 1 با توزیع یکنواخت انتخاب شده است. سپس اعداد تصادفی انتخابی، در مقدار $1/5$ ضرب شده و به عنوان PGA انتخابی در واحد g ($9.81 m/sec^2$) انتخاب شده‌اند. در حالتی دیگر می‌توان مطابق شکل ۱۰، مقدار شتاب PGA متناظر با اعداد تصادفی انتخابی را با استفاده از روش تبدیل معکوس^{۲۰} از روی منحنی خطر زلزله برای منطقه‌ی مورد نظر، تعیین کرد. در مرحله‌ی بعد بیشینه شتاب هر 80 رکورد زلزله



شکل ۱۱. الگوریتم به دست آوردن منحنی‌های شکنندگی برای بلوک.



شکل ۱۲. منحنی شکنندگی برای بلوک صلب واقع بر روی زمین، با نسبت ابعاد گوناگون.

در کنار هم رسم شده‌اند. (در همه‌ی شکل‌ها، محور افقی معرف بیشینه شتاب افقی وارده به بلوک در هر رکورد زلزله، و محور قائم بیان‌گر احتمال رسیدن یا فراروی از حد خسارت تعریف شده برای تجهیزات بلوکی است).

در شکل ۱۲ الف مقادیر شکنندگی بین دو مقدار ۰ و ۱ قرار گرفته است و شیب منحنی با افزایش نسبت b/h افزایش مختصری نشان می‌دهد. مطابق شکل ۱۴، افزایش b/h و همچنین افزایش R موجب کاهش آسیب‌پذیری شده است. منحنی‌ها در شکل ۱۵ نشان می‌دهند که ایجاد جداسازی در طبقات پایین امکان وقوع آسیب را بسیار کاهش داده و آسیب‌پذیری با افزایش طبقات افزایش یافته است.

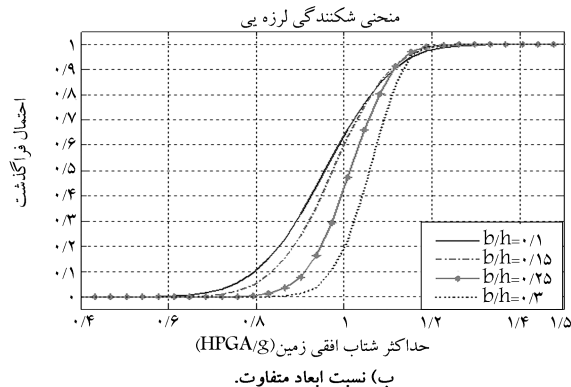
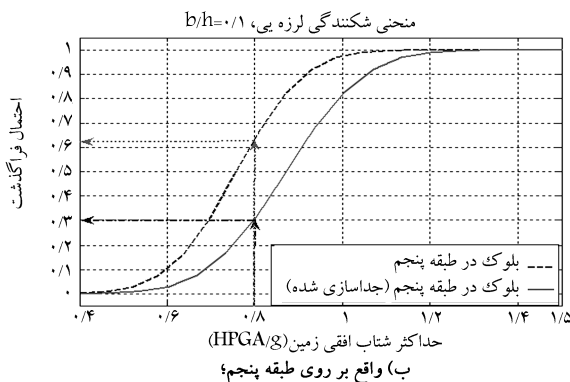
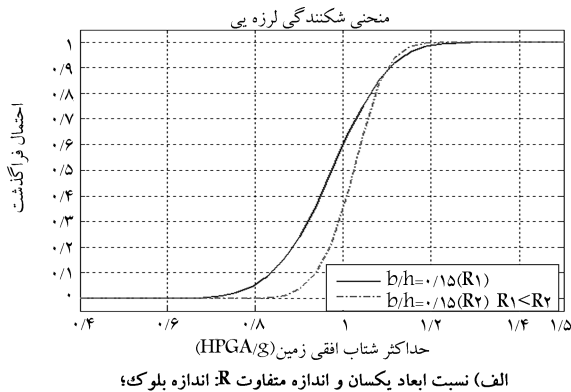
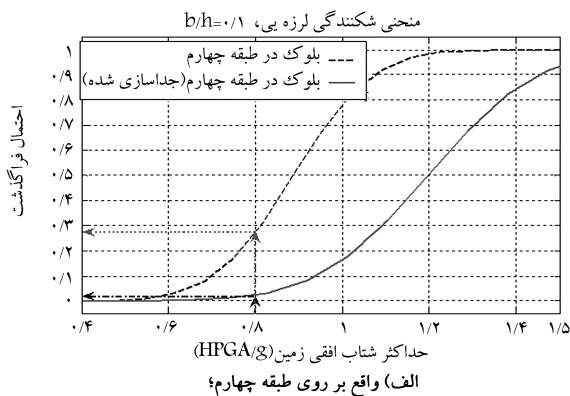
شکل‌های ۱۴ و ۱۵ نشان می‌دهند که احتمال شکنندگی بلوک‌های مشابه در طبقات ساختمان، در حالتی که کف طبقات جداسازی شده‌اند، در مقایسه با حالت بدون جداسازی کف کم‌تر است. دلیل این امر را می‌توان در کاهش شدت تحریک ورودی به بلوک، توسط سیستم‌های جداساز لرزه‌یی و تغییر محتوای فرکانسی تحریک لرزه‌یی ورودی دانست. لذا مشاهده می‌شود که استفاده از روش جداسازی لرزه‌یی کف، برای تجهیزاتی که دارای اهمیت‌اند، می‌تواند به‌عنوان یک روش کاهش پاسخ لرزه‌یی در دوران آنها در حین تحریکات حاصل از زمین‌لرزه مورد استفاده قرار گیرد.

۳.۵. نتایج محاسبه‌ی مقادیر منحنی‌های شکنندگی برای تجهیزات بلوکی

با توجه به روشی که پیش‌تر، به‌منظور به دست آوردن منحنی‌های شکنندگی برای تجهیزات بلوکی شرح داده شد، در این مرحله برای انواع بلوک‌ها با نسبت ابعاد مختلف و با توجه به موقعیت قرارگیری آنها، منحنی‌های شکنندگی توسعه خواهد یافت. در به دست آوردن منحنی‌های شکنندگی برای حالتی که بلوک بر کف جداسازی شده‌ی طبقات قرار دارد از سیستم جداساز FPS استفاده می‌شود.

۱.۳.۵. منحنی‌های شکنندگی برای تجهیزات بلوکی شکل واقع بر بستر صلب زمین و مقایسه‌ی نتایج

برای تجهیزات بلوکی با نسبت ابعاد مختلف، که بر بستر صلب زمین قرار دارند، بعد از تحلیل پاسخ دورانی آنها تحت اثر تحریکات لرزه‌یی، منحنی‌های شکنندگی مطابق شکل ۱۲ به‌دست آمده است. این نتایج برای مقادیر مختلف نسبت ابعاد با هم مقایسه و در قالب شکل ۱۳ ارائه شده‌اند. منحنی‌های شکنندگی به دست آمده برای بلوک‌های صلب با نسبت ابعاد مختلف، در سه حالت: ۱. بلوک واقع بر بستر صلب زمین؛ ۲. بلوک واقع بر سطح طبقات ساختمان؛ ۳. بلوک واقع بر کف جداسازی شده‌ی طبقات ساختمان، در شکل‌های ۱۴ تا ۱۶، به‌صورت مقایسه‌یی



شکل ۱۵. مقایسه‌ی منحنی‌های شکنندگی برای بلوک‌های صلب، با نسبت ابعاد $b/h = 0.1$ خط پر: کف جداسازی شده، نقطه چین: جداسازی نشد.

شکل ۱۳. مقایسه‌ی منحنی‌های شکنندگی برای بلوک‌های صلب، واقع بر روی بستر صلب زمین.

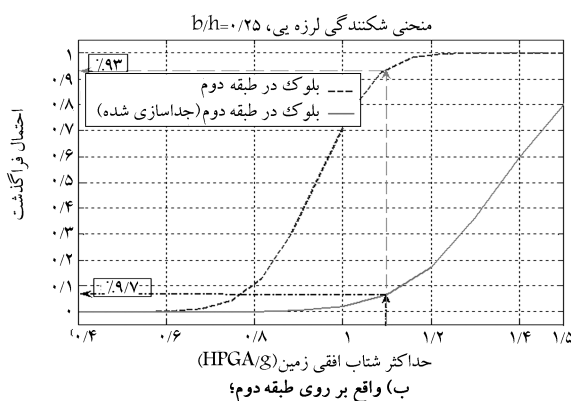
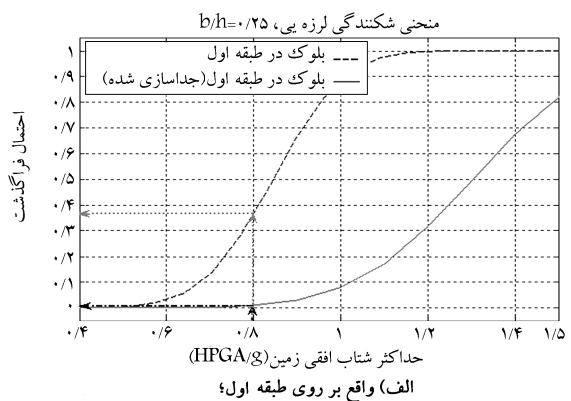
۶. نتیجه‌گیری

در این پژوهش، نسبت به یافتن پاسخ حرکت گهواره‌یی بلوک صلب واقع بر بستر زمین و نیز در سطح طبقات اقدام شد. جداسازی لرزه‌یی کف و تأثیر آن در رفتار بلوک‌های صلب مورد مطالعه قرار گرفت و نهایتاً منحنی‌های شکنندگی برای آنها در سه حالت: «بلوک واقع بر بستر صلب زمین»، «بلوک واقع بر سطح طبقات ساختمان» و «بلوک واقع بر کف جداسازی شده‌ی طبقات ساختمان» رسم شد.

با توجه به مطالعات انجام‌شده، می‌توان نتیجه گرفت مقدار نسبت ابعاد بلوک‌ها (b/h)، پارامتر مشخصه‌ی دینامیکی بلوک (P) و همچنین R (فاصله‌ی مرکز ثقل یا هندسی بلوک) در پاسخ حرکت گهواره‌یی و همچنین در آسیب‌پذیری آنها تحت تحریک ورودی، تأثیر به‌سزایی دارند.

ضربه‌ی حاصل از برخورد بلوک به سطح زیرین در هر چرخه (ضرب بازگردانی)، باعث افت سرعت و در نتیجه افت سطح انرژی جنبشی در بلوک در حال دوران شده و نقشی مانند میرایی در سازه‌ها را ایفا می‌کند. لذا انتخاب سطحی با خاصیت استهلاکی بیشتر یا تعبیه‌ی سیستم استهلاک انرژی در زیر بلوک، می‌تواند در کاهش پاسخ بلوک مؤثر باشد.

سیستم جداساز به‌کاررفته در این مطالعه، در کاهش پاسخ دورانی بلوک صلب، تأثیر قابل ملاحظه‌یی داشته است. انتخاب نوع سیستم جداساز لرزه‌یی به‌منظور تأمین میزان جابه‌جایی و پررود ارتعاشی لازم با توجه به وزن کم تجهیزات جداسازی شده، مشکلات طراحی به‌خصوصی دارند. از بلوک‌های مشابه، آنها که در طبقاتی با کف جداسازی شده قرار دارند، نسبت به بلوک‌هایی که در سطح طبقات و بدون جداسازی هستند، از سطح آسیب‌پذیری پایین‌تری برخوردارند.



شکل ۱۴. مقایسه‌ی منحنی‌های شکنندگی برای بلوک‌های صلب، با نسبت ابعاد $b/h = 0.25$ خط پر: کف جداسازی شده، نقطه چین: جداسازی نشد.

از آنجا که در مسائل واقعی، صلبیت اجزاء مطلق نبوده و از اجزای مختلف نرمی نسبی برخوردارند، لذا فرض گوشه‌های نرم برای بلوک‌های در حال دوران و مدل‌سازی آن به هنگام برخورد به سطح زیرین، می‌تواند از ارزش تحقیقی بالایی برخوردار باشد.

با توجه به نتایجی که از این مطالعه به دست آمد، برای ارتقاء ارزش تحقیقات بعدی پیشنهاد می‌شود: در زمینه‌ی حل عددی معادلات حاکم بر ارتعاش تجهیزات بلوکی، از روش‌های مختلف استفاده شود و میزان دقت روش‌های مختلف بررسی شود.

پانوشت

1. life-safety
2. bayesian parameter estimation
3. minor damage
4. mderate damage
5. major damage
6. grid damage
7. freestanding equipments
8. free standing equipments
9. restrained equipments
10. unrestrained equipments
11. sliding
12. rocking
13. restitution coefficient
14. seismic floor isolation
15. friction pendulum system bearings (FPS)
16. articulated slider
17. seismic fragility of equipments
18. conditional probability
19. pacific earthquake engineering research center (PEER)
20. inverse transform
21. comulative distribution function (CDF)

منابع

۱. غفوری آشتیانی، م.؛ فیوض، ع. «تحلیل سیستم‌های ثانویه تحت اثر همزمان مؤلفه‌های شتاب زلزله و ساده‌سازی روش تحلیل»، رساله‌ی دکتری عمران (سازه)، دانشگاه تربیت مدرس (پاییز ۱۳۸۱).
2. Soong, T.T. and Lopez Garcia, D. "Seismic vulnerability and protection of nonstructural components", Joint NCREE/JRC Workshop International Collaboration on Earthquake Disaster Mitigation Research, pp. 73-82, National Center for Research on Earthquake Engineering, Taipei, Taiwan (2003).
3. Long, T. Phan and Andrew, W. Taylor "State of the art report on seismic design requirements for non-structural building components", NISTIR, National Institute of Standards and Technology (June 1996).
4. Giorgio Lupoi, P. and Pinto, G.M. Calvi. "Fragility analysis on the seismic response of freestanding equipments", A Individual Study Submitted in Partial Fulfilment of the Requirements for the PhD Degree in Earthquake Engineering, Rose School (2005).

5. George W. Housner "The behavior of inverted pendulum structures during earthquakes", *Bolletín of the Seismological Society of America*, **53**(2), pp. 403-417 (1963).
6. Nicos Makris and Yiannis Roussos. "Rocking response and overturning of equipments under horizontal excitation", *Report PEER-1998/05 University of Berkeley* (1998).
7. Yeong-Bin, Y.; Hsiao-Hui H. and Meng-Ju H. "Sliding and rocking response of rigid blocks due to horizontal excitations", *Structural Engineering and Mechanics*, **9**(1), pp. 1-16 (2000).
8. Badillo-Almaraz, H.; Whittaker, A.S.; Reinhorn, A.M. and Cimellaro, G.P. "Seismic fragility of suspended ceiling systems", MCEER-06-0001 (2006).
9. Bryant G. Nielson "Analytical fragility curves for highway bridges in moderate seismic zones", A Thesis for the Degree of Philosophy, School of Civil and Environmental Engineering, Georgia Institute of Technology (December 2005).
10. Jamie Ellen Padgett "Seismic vulnerability assessment of retrofitted bridges using probabilistic methods", School of Civil and Environmental Engineering Georgia Institute of Technology, (May 2007).
11. Cimellaro, G.P.; Reinhorn, A.M.; Bruneau, M. and Rutenberg, A. "Multidimensional fragility of structures: Formulation and evaluation", MCEER-06-0002, (2006).
12. Sathish, K.; Ramamoorthy, Paolo Gardoni and Joseph, M. Bracci "Seismic fragility estimates for reinforced concrete buildings", Texas A&M University Zachry Department of Civil Engineering College Station, Texas 77843-3136, Technical Report CDCI-06-01, November 28 (2006).
13. Zhu, Z.Y. and Soong, MEERI, T.T. "Toppling fragility of unrestrained equipment", *Earthquake Spectra*, **14**(4) (November 1998).
14. Lopez Garcia, D. and Soong, T.T. "Sliding fragility of block-type non-structural components, Part-1: Unrestrained components", *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, **32**, pp. 111-129 (2003).
15. Lambrou, V. and Constantinou, M.C. "Study of seismic isolation systems for computer floors", NCEER-94-0020 (1994).
16. Berahman, F. "Seismic fragility curves for un-anchored on-grade steel storage tanks: Bayesian approach", *Journal of Earthquake Engineering*, **11**, pp. 166-192 (2007).

