

روابط بین دوام‌های مؤثر، بازه‌ی و یکنواخت با شاخص‌های زلزله و شرایط ساختگاه با استفاده از داده‌های لرزه‌ی ایران

منصوره رضائی‌منش (کارشناس ارشد)

حمید صفاری* (استادیار)

دانشکده‌ی مهندسی عمران، آب و محیط زیست، دانشگاه شهیدبهشتی

مهندسی عمران شریف، بهار (۱۴۰۰)
دوره‌ی ۲ - ۳۷، شماره‌ی ۱/۱، ص. ۹۵-۱۰۳

در مطالعه‌ی حاضر، ارتباط بین تعاریف مختلف دوام با بیشینه‌ی شتاب سطح زمین، عمق کانونی و شرایط خاک ساختگاه با استفاده از رکوردهای شتاب‌نگاشت در ایران، محاسبه و ارائه شده است. در این راستا، از ۱۰۵۴ رکورد سه مؤلفه‌ی مربوط به ۱۹۷ رویداد لرزه‌ی ثبت شده با بزرگای گشتاور بزرگ‌تر یا مساوی ۵/۰ استفاده شده است. نتایج نشان می‌دهند که با افزایش شتاب اوج زمین، دوام بازه‌ی و یکنواخت افزایش می‌یابند؛ در حالی که در مورد دوام مؤثر، عمده‌ی رکوردهای با دوام مؤثر طولانی، عمدتاً شتاب اوج زمین کمی داشته‌اند. همچنین روابط ریاضی تغییرات هرگونه دوام با شتاب اوج زمین و عمق کانونی و تغییرات نوع خاک نشان داده شده است. رابطه‌ی بین مدت دوام و بیشینه‌ی دامنه‌ی حرکات قوی زلزله برای حرکت ورودی در طراحی لرزه‌ی سازه‌ها به‌خصوص سازه‌های بتن مسلح که در سیکل‌های پیاپی زلزله دچار افت سختی و کاهش مقاومت می‌شوند، اهمیت زیادی دارد.

واژگان کلیدی: دوام معنی دار، دوام بازه‌ی، دوام یکنواخت، بیشینه‌ی شتاب سطح زمین، شرایط خاک ساختگاه.

mrezaemanesh@yahoo.com
h_saffari@sbu.ac.ir

۱. مقدمه

زمین‌لرزه از خانواده‌ی پدیده‌های طبیعی است که اغلب آسیب‌ها و خسارت‌های زیادی وارد می‌کند. در مهندسی عمران، زمین‌لرزه با مکانیسم وقوع، بزرگی، عمق، مسیر انتقال به سایت و تأثیر شرایط محلی خاک در ارتباط خواهد بود. با رسیدن به محل، رکورد زمین‌لرزه به‌صورت فیزیکی در قالب تاریخچه‌ی زمانی ارائه می‌شود و شامل دامنه، محتوای بسامدی و مدت زمان آن است.^[۱] اهمیت بیشینه‌ی دامنه و محتوای بسامد تشخیص داده شده است. شاخص‌های مختلف، به‌عنوان مثال، شتاب اوج زمین و سرعت اوج زمین به شدت تحت تأثیر شرایط سایت محلی، مانند: زمین‌شناسی سطح پیچیده و توپوگرافی نامنظم است. از سوی دیگر، تجربیات تعدادی از زمین‌لرزه‌ها نشان داده است که به دلیل دوام کوتاه، حتی اگر شتاب‌ها و دامنه‌های طیفی بزرگ باشند، صدمات اندکی به سازه‌ها تحمیل می‌شود.^[۲] خصوصیات حرکت زمین، تأثیر مهمی در رفتار لرزه‌ی ساختمان‌ها، از جمله: شدت حرکت زمین، مدت دوام و محتوای بسامدی دارد.^[۳]

تجربه‌ی زمین‌لرزه‌های بیشمار نشان داد که حرکت زمین با اوج متوسط و دوام حرکت قوی طولانی‌تر ممکن است باعث خسارت شدیدتری نسبت به اوج بزرگ‌تر اما با دوام کوتاه‌تر شود.^[۴] علاوه بر این، مطالعات بی‌شمار حاکی

* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۳۹۹/۲/۲۷، اصلاحیه ۱۳۹۹/۵/۱۱، پذیرش ۱۳۹۹/۵/۱۹

DOI:10.24200/J30.2020.55728.2769

از همبستگی احتمالی بین مدت دوام حرکت قوی و پاسخ‌های لرزه‌ی سازه‌ی است.^[۹-۵]

کامیاما^۱ (۱۹۸۴) تجزیه و تحلیل رگرسیون چندگانه‌ی را انجام داد که نه فقط عوامل زلزله، بلکه شامل شرایط سایت محلی به‌عنوان متغیرهای مستقل بود و به مدت دوام و پارامترهای مرتبط با آن اعمال می‌شد.^[۱۰] شوجی و همکارانش (۲۰۰۴)، ویژگی‌های مدت دوام و دامنه‌ی حرکات قوی زمین را با در نظر گرفتن آثار سایت محلی مطالعه و بررسی کرده‌اند که مدت دوام چگونه تحت تأثیر بزرگای زلزله، فاصله‌ی دورانی، و عمق کانونی قرار گرفته است. همچنین روند میانگین و روند کلی مدت دوام و پارامترهای مرتبط با آن را ارائه دادند. علاوه بر این، ذکر کرده‌اند که مدت دوام و ویژگی‌های دامنه‌ی حرکات زمین زلزله به دلیل بزرگای زلزله، فاصله‌ی رومرکزی، عمق کانونی و شرایط سایت محلی، اثر متقابلی را متحمل می‌شوند.^[۱۱] چاندارموهان^۲ و همکارانش (۲۰۱۶)، تأثیر مدت دوام حرکت زمین در ظرفیت‌های واژگونی یک قاب خمشی فولادی ۵ طبقه و یک پایه‌ی پل بتن مسلح را بررسی کرده‌اند. آن‌ها تأثیر مدت دوام را از آثار دامنه‌ی حرکت زمین و شکل طیفی پاسخ، رکوردهای دارای دوام کوتاه‌مدت و طولانی‌مدت و به‌کارگیری آن‌ها در تجزیه و تحلیل دینامیکی غیرخطی جدا کرده‌اند. برای قاب خمشی فولادی، تخمین ظرفیت واژگونی متوسط، زمانی که مجموعه‌ی دوام طولانی‌مدت به کار گرفته شد، در مقایسه با به‌کارگیری مجموعه‌ی دوام کوتاه‌مدت، ۲۹٪ کمتر بوده است. برای پایه‌ی پل بتنی، ظرفیت واژگونی ۱۷٪

کمتر است. تجزیه و تحلیل حساسیت به پارامترهای مدل سازه‌ی نشان می‌دهد که سازه‌هایی با ظرفیت تغییرشکل بالا و سرعت سریع زوال چرخه‌ی، به مدت دوام حساس‌تر هستند.^[۱۲]

امروزه روش‌های مختلفی برای لحاظ کاهش سختی و مقاومت در سیکل‌های پیاپی زلزله به منظور لحاظ دوام زلزله ارائه شده است. به عنوان مثال، چاندارموهان (۲۰۱۶) مطالعه‌ی پیرامون ارزیابی تأثیر مدت دوام حرکت زمین در خطر واژگونی سازه‌ی انجام داد و روش‌هایی را برای در نظر گرفتن آن در ارزیابی عملکرد سازه‌ی و طراحی مطرح کرد.^[۱۳] کاپارو^۳ (۲۰۱۸) به بررسی دقیق تأثیر حرکات فرورانش در طراحی، به ویژه تأثیر مدت دوام و ارزیابی پتانسیل خسارت حرکات فرورانش پرداخته است.^[۱۴] همچنین فیرهارست^۴ و همکارانش (۲۰۱۹) به بررسی تأثیر مدت دوام حرکت زمین در طراحی و خطر واژگونی ساختمان‌های دیوار برشی بتنی از ۶ تا ۳۰ طبقه پرداختند و طراحی و واژگونی سطوح لرزش را از طریق تجزیه و تحلیل دینامیکی افزایشی غیرخطی در نظر گرفتند.^[۱۵]

همچنین، بسیاری از پژوهشگران متوجه این واقعیت شده‌اند که دوام حرکت قوی زمین‌لرزه از سائیتی به سایت دیگر حتی طی زمین‌لرزه‌ی مشابه، متفاوت است. بنابراین، بدون درک ویژگی‌های مدت دوام نمی‌توان پیش‌بینی دقیق و کمی از حرکات قوی زمین‌لرزه به دست آورد.^[۱۶] مدت دوام حرکت قوی زمین، در کدهای طراحی لرزه‌نگاری در سراسر جهان به عنوان یکی از پارامترهای اصلی حرکت قوی زمین در نظر گرفته نشده است.^[۱۷]

خسارت‌های ناشی از زلزله‌های فرورانش بزرگ تا حدودی از تعداد زیاد چرخه‌ی معکوس بار ناشی می‌شود. مطالعات تجربی و تحلیلی نشان می‌دهند که مشارکت مدت دوام تکان و تعداد چرخه‌ها به آسیب منجر می‌شود. ونتورا^۵ و همکارانش (۲۰۱۹) به بررسی چگونگی تأثیر مدت دوام تکان در پاسخ ساختمان‌های بلند و دیوار برشی در بریتیش کلمبیا که در منطقه‌ی فرورانش کاسکادا واقع شده است، پرداخته و همچنین یک مطالعه‌ی موردی از یک قاب بتن مسلح ارائه داده‌اند، تا نشان دهند که تکان با مدت دوام طولانی نیز می‌تواند به‌طور قابل توجهی در پاسخ لرزه‌ی آن‌ها تأثیر بگذارد. نتایج ذکر شده برای تدوین مفاد طراحی مفید بوده است، که مدت دوام تکان را به حساب می‌آورد.^[۱۸] مطالعات اخیر تأثیر مدت دوام حرکت زمین در ظرفیت واژگونی سازه را نشان می‌دهد.^[۱۹]

ملازاده و صفاری (۲۰۱۸)، آثار مدت دوام حرکت قوی زمین در پاسخ لرزه‌ی سیستم یک درجه آزادی را بررسی کرده‌اند.^[۲۰] بیشتر مطالعات در گذشته بر روی مدت دوام با یک آنالیز رگرسیون با استفاده از بزرگای زلزله و فاصله‌ی رومرکزی به عنوان متغیرهای مستقل به دلیل راحتی و سادگی آن‌ها صورت گرفته است (به عنوان مثال، نوشتار تریفوناک و بردی^۶ (۱۹۷۵)).^[۲۱] به رغم بسیاری از نشانه‌های مربوط به مدت دوام، مطالعات کمی در مورد رابطه‌ی بین دوام و شرایط سایت محلی وجود دارد. متأسفانه، بیشتر آن‌ها به صورت کیفی با شرایط سایت محلی سروکار داشته‌اند (به عنوان مثال، نوشتار دوربی^۷ و همکارانش^[۲۲] (۱۹۷۸) یک روش آماری مؤثر نشان داد که دوام نه فقط با بزرگای زلزله و فاصله‌ی رومرکزی، بلکه با شرایط سایت محلی نیز ارتباط دارد).^[۲۰]

در مطالعه‌ی حاضر، رکوردهای حرکت قوی زمین‌لرزه‌های ایران از مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی (BHRC)،^[۲۳] به کار گرفته شده است، تا رابطه‌ی بین تعاریف مختلف دوام با بیشینه‌ی شتاب سطح زمین، فاصله‌ی عمق کانونی و شرایط ساختگاه مشخص شود. هدف از این کار، آشکار ساختن دوام و دامنه‌ی ویژگی‌های حرکات قوی زمین‌لرزه و به دست آوردن اطلاعات معنی‌دار از حرکات ورودی در دسترس برای طراحی مقاوم در برابر زلزله براساس سوابق مشاهده شده است. در

این راستا، مدت دوام و شتاب اوج زمین (PGA)^۸ به عنوان پارامتر نماینده‌ی مدت دوام و ویژگی‌های دامنه‌ی حرکات زمین‌لرزه‌ی انتخاب شد. علاوه بر این، میانگین سرعت موج برشی در ۳۰ متر فوقانی (V_{S30}) به عنوان پارامتر کمی از شرایط سایت محلی در نظر گرفته شد. همچنین علاوه بر مطالعه‌ی ویژگی‌های شتاب اوج زمین و سرعت موج برشی و دوام زلزله، تأثیر عمق کانونی نیز بررسی شده است. رابطه‌ی بین دوام و بیشینه‌ی دامنه‌ی حرکات قوی زلزله ممکن است برای حرکت ورودی در طراحی مقاوم سازه‌ها در برابر زلزله اهمیت بیشتری پیدا کند.

۲. پایگاه داده

تمام داده‌های مطالعه‌ی حاضر از مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی (BHRC)،^[۲۳] در ایران تهیه شده است. پایگاه داده‌ی استفاده شده در مطالعه‌ی حاضر شامل ۱۰۵۴ رکورد سه مؤلفه‌ی مربوط به ۱۹۷ رویداد لرزه‌ی ثبت شده در ایران با بزرگای گشتاور بزرگ‌تر یا مساوی ۵/۰ بوده است. کلیه‌ی رکوردها مربوط به ساختگاه‌هایی هستند که عمق کانونی و سرعت موج برشی در ۳۰ متر اول عمق برای آن‌ها موجود است. پس از تهیه‌ی رکوردها، تصحیح خط مبنا بر روی آن‌ها انجام شد و با برنامه‌نویسی فترن، دوام بازه‌ی با آستانه‌ی شتاب $0.5g$ ، دوام یکنواخت با آستانه‌ی شتاب $0.5g$ و دوام مؤثر (۵-۹۵ درصد) محاسبه شد. سپس با توجه به آیین‌نامه‌ی زلزله‌ی ۲۸۰۰ ایران^[۲۴] مطابق جدول ۱، گروه‌بندی نوع خاک انجام شد و داده‌ها بر حسب نوع خاک در ۳ دسته قرار گرفتند. داده‌های گروه خاک ۴، بسیار کم و غیرقابل استناد بودند.

۳. تعریف انواع مدت دوام

بیش از ۳۰ نوع تعریف برای مدت دوام حرکت قوی وجود دارد.^[۲] تعاریف مختلف ممکن است کم و بیش مناسب برای برنامه‌های مختلف باشند. اگرچه تعداد زیادی از تعاریف از دوام حرکت قوی در ادبیات ارائه شده است، تعاریف موجود می‌توانند به ۴ دسته‌ی مختلف طبقه‌بندی شوند:

(الف) دوام بازه‌ی^[۲۵]

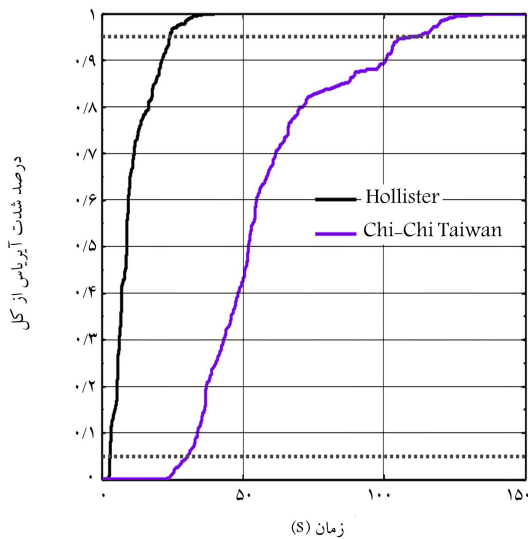
(ب) دوام یکنواخت^[۲۷]

(ج) دوام مؤثر^[۲۸]

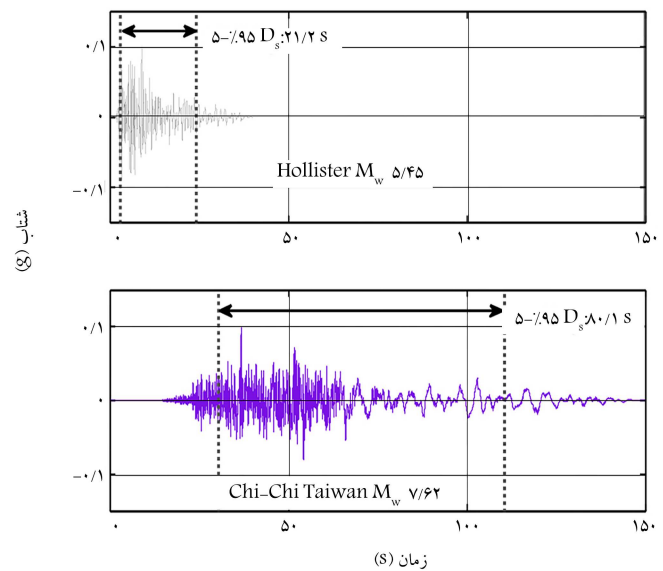
مشکل اصلی در مطالعه‌ی ویژگی‌های مدت دوام، چگونگی تعریف آن است که چندین پیشنهاد ارائه شده است.^[۲۹] با این حال، هدف نوشتار حاضر، بررسی برتری هر تعریف نسبت به بقیه‌ی تعاریف نیست، بلکه به بررسی ویژگی‌های مدت دوام تحت تأثیر عوامل مختلف پرداخته است. تعاریف مدت دوام استفاده شده در نوشتار حاضر، مدت دوام بازه‌ی در آستانه‌ی شتاب $0.5g$ ، مدت دوام یکنواخت

جدول ۱. طبقه‌بندی نوع خاک با توجه به آیین‌نامه‌ی زلزله‌ی ۲۸۰۰ ایران.

نوع خاک	محدوده‌ی سرعت موج برشی m/s	تعداد داده‌ها
۱	$V_S < 75$	۳۴۱
۲	$75 < V_S < 275$	۵۳۶
۳	$175 < V_S < 275$	۱۷۵
۴	$V_S < 175$	۴

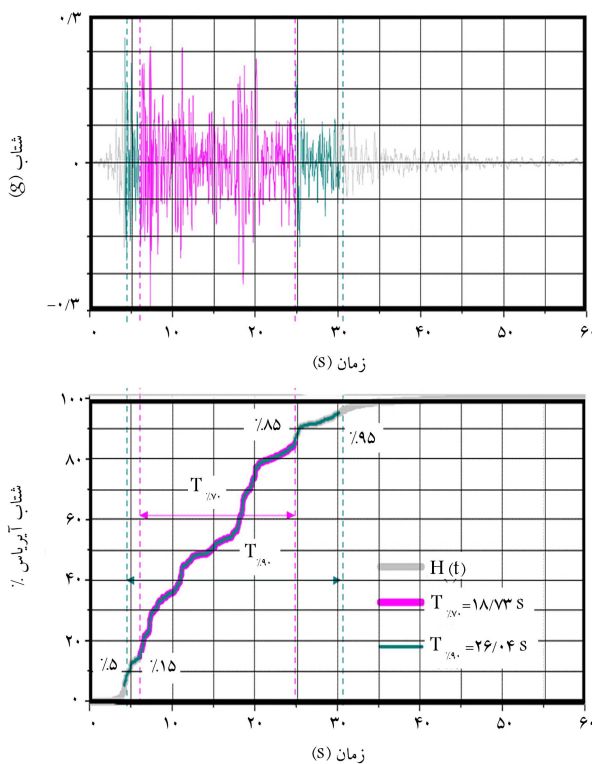


ب) نمودار درصد شدت آریاس از کل - زمان.



الف) نمودار شتاب - زمان؛

شکل ۱. الف) تاریخچه شتاب - زمان زمین و ب) شدت آریاس برای رکوردهای حرکت زمین با بیشینه شتاب حرکت زمین یکسان اما دوم های متفاوت. [۳۲]



شکل ۲. نمودار هیوسید یک شتاب نگاشت واقعی. [۳۳]

در نظر گرفته شده است. متداول ترین آن ها، $D_{S(5-95)\%}$ و $D_{S(5-75)\%}$ است که به این صورت تعریف می شوند:

-- $D_{S(5-95)\%}$ دوام مؤثر ۵-۹۵٪: فاصله زمانی که در آن ۵ تا ۹۵ درصد انتگرال $\int_0^{t_{max}} a(t)^2 dt$ جمع می شود. [۳۲]

-- $D_{S(5-75)\%}$ دوام مؤثر ۵-۷۵٪: فاصله زمانی که در آن ۵ تا ۷۵ درصد انتگرال $\int_0^{t_{max}} a(t)^2 dt$ جمع می شود. [۳۵]

در آستانه‌ی شتاب $0.5g$ ، و مدت دوام مؤثر (۵-۹۵ درصد) بوده است که در ادامه توضیح هر یک ارائه شده است.

۱.۳. مدت دوام مؤثر

شدت آریاس، شدتی است که برای اندازه‌گیری غیرمخرب، توسعه یافته و مجموع تمام انرژی‌های در واحد وزن است که در نوسان‌گرهای یک مجموعه‌ی نوسان‌کننده‌ی خطی نامیرا با توزیع یکنواخت بسامد در لحظه‌ی انتهایی زلزله (یا در هر لحظه بعد از پایان حرکت) ذخیره شده است. [۳۰] اساس این دسته از دوام‌ها، توزیع تجمعی انرژی زلزله است که با استفاده از شتاب‌نگاشت تعیین می‌شود. مدت زمان مؤثر براساس انتگرال مربع شتاب زمین محاسبه می‌شود. مدت دوام مؤثر، اولین بار توسط بومر و پریرا^۹ (۱۹۹۹) تعریف شده است. [۳۱] در بیشتر تعریف‌های ذکر شده، از شدت آریاس استفاده شده است (رابطه‌ی ۳۱):

$$I_a = \frac{\pi}{2g} \int_0^{t_{max}} a(t)^2 dt \quad (1)$$

که در آن، $a(t)$ شتاب در زمان t است که توسط رکورد شتاب‌نگاشت مشخص می‌شود. t_{max} طول رکورد و I_a نشان‌دهنده‌ی میزان انرژی وارد بر سازه است. شکل ۱، دو حرکت زمین ضبط شده با بیشینه‌ی شتاب زمین (PGA) یکسان، اما مدت دوام متفاوت را نشان می‌دهد. نمودار تغییرات شدت آریاس بر حسب زمان را نمودار هیوسید^{۱۰} می‌نامند. شکل ۲، نمودار هیوسید یک شتاب‌نگاشت واقعی را نشان می‌دهد. [۳۲]

نمودار هیوسید U معمولاً از یک قسمت با شیب کم تشکیل می‌شود که مربوط به رسیدن امواج P است. قسمت میانی نمودار، شیب تندی دارد و مربوط به انرژی ورودی اصلی در اثر امواج S است. در قسمت انتهایی نمودار، شیب نسبتاً کم است و به امواج حجمی و سطحی که به طور غیرمستقیم به سیستم می‌رسند، مربوط می‌شود. شیب هر قسمت از نمودار هیوسید، در حقیقت میانگین مربع شتاب است. مدت دوام مؤثر به صورت فاصله‌ی زمانی، که شامل درصد معینی از شدت آریاس است، تعریف می‌شود. این درصد توسط پژوهشگران مختلف به صورت‌های متفاوتی

زرگریان و انصاری (۲۰۱۲) روابط پیش‌بینی برای مدت دوام مؤثر داده‌های ایران را به دست آوردند و به این نتیجه دست یافتند که دوام بازه‌ی و یکنواخت نسبت به دوام مؤثر، تأثیر بیشتری در سازه‌های بتن مسلح و ایجاد خرابی سازه‌ی دارند.^[۳۶]

۲.۳. مدت دوام بازه‌ی

فاصله‌ی زمانی بین اولین و آخرین تجاوز شتاب زمین از حد معینی از شتاب را مدت دوام بازه‌ی می‌نامند. حد شتاب می‌تواند ضابطه‌ی مطلق یا ضابطه‌ی نسبی داشته باشد. حد شتاب با ضابطه‌ی نسبی، نسبتی یا درصدی از اوج شتاب زمین است. در حد شتاب با ضابطه‌ی مطلق، مقدار ثابتی از شتاب به عنوان حد شتاب در نظر گرفته می‌شود.

دوام بازه‌ی $0.05g$: زمان سپری شده بین اولین و آخرین تجاوز شتاب از آستانه‌ی $0.05g$ است.^[۳۷] ممکن است از آستانه‌های بالاتر یا پایین‌تر استفاده شود. با این حال، مقدار $0.05g$ به عنوان یک مقدار معقول برای ارزیابی حرکات زمینی که باعث آسیب به سازه‌های مهندسی می‌شود، در نظر گرفته می‌شود.^[۳۵]

۳.۳. مدت دوام یکنواخت

مجموع فواصل زمانی که طی آن شتاب زمین از حد معینی تجاوز می‌کند، را مدت دوام یکنواخت می‌نامند. حد شتاب، می‌تواند ضابطه‌ی مطلق یا نسبی داشته باشد. حد شتاب با ضابطه‌ی نسبی، نسبتی یا درصدی از اوج شتاب زمین است. در حد شتاب با ضابطه‌ی مطلق، مقدار ثابتی از شتاب به عنوان حد شتاب در نظر گرفته می‌شود. برای مثال بولت (۱۹۷۳)، معمولاً حد شتاب را با ضابطه‌ی مطلق و برابر $0.05g$ و $0.1g$ در نظر گرفته است.^[۳۷] شکل ۳ نمودار مدت دوام بازه‌ی و یکنواخت یک شتاب‌نگاشت طبیعی: الف) یک شتاب‌نگاشت واقعی ب) نمودار دوام بازه‌ی ج) نمودار دوام یکنواخت را نشان می‌دهد.^[۳۳]

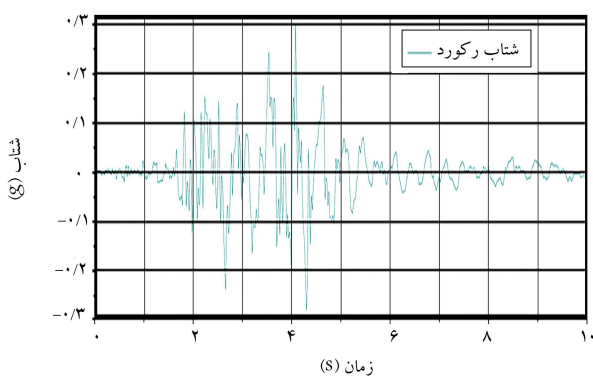
طبق مطالعات انجام شده و محاسبه‌ی دوام‌های بازه‌ی و یکنواخت برای داده‌های ایران به عنوان یک نتیجه‌ی کلی می‌توان گفت هر چقدر آستانه‌ی شتاب مورد مطالعه بالاتر رود، مقادیر دوام کاهش خواهند یافت. همچنین براساس نمودار پراکنش داده‌ها، بیشینه‌ی دوام یکنواخت همواره کمتر از دوام بازه‌ی بوده و تقریباً به دوام بازه‌ی متناظر، محدود شده است.^[۳۸]

۴. روابط بین دوام‌های مختلف با شاخص‌های زلزله و انواع مختلف خاک

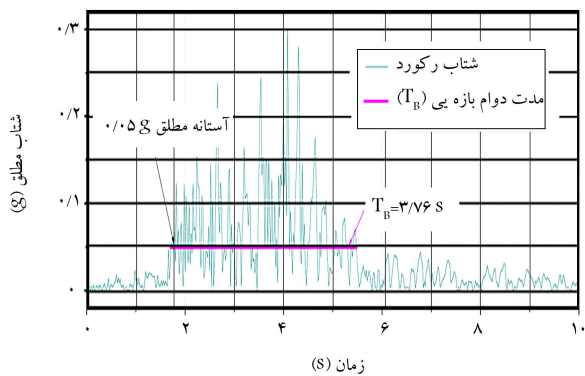
انواع مختلف خاک

در پژوهش حاضر، ویژگی‌های مدت دوام بازه‌ی در آستانه‌ی شتاب $0.05g$ ، مدت دوام یکنواخت در آستانه‌ی شتاب $0.05g$ و مدت دوام مؤثر (۵-۹۵٪) درصد در برابر بیشینه‌ی شتاب سطح زمین با استفاده از داده‌های مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی با در نظر گرفتن شرایط سایت محلی خاک‌های نوع (۱، ۲ و ۳) بررسی شده است. در شکل‌های ۴ الی ۶، روابط بین بیشینه‌ی شتاب سطح زمین و مدت دوام بازه‌ی در آستانه‌ی شتاب $0.05g$ به ترتیب در خاک‌های نوع ۱، ۲ و ۳ ارائه شده است. ارتباط بین دوام‌ها و بیشینه‌ی شتاب سطح زمین توسط رگرسیون نیز بر روی نمودارها مشاهده می‌شود.

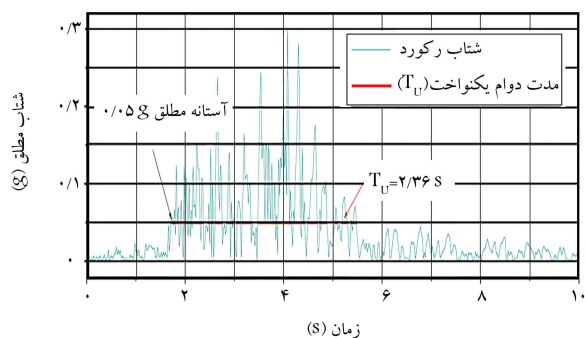
از شکل‌های ۴ الی ۶ نتیجه می‌شود که با افزایش بیشینه‌ی شتاب سطح زمین، دوام بازه‌ی در هر سه نوع خاک افزایش یافته است. همچنین هر چه خاک نرم‌تر شده است، شیب تغییرات دوام بازه‌ی با بیشینه‌ی شتاب سطح زمین افزایش یافته



الف) شتاب نگاشت واقعی؛

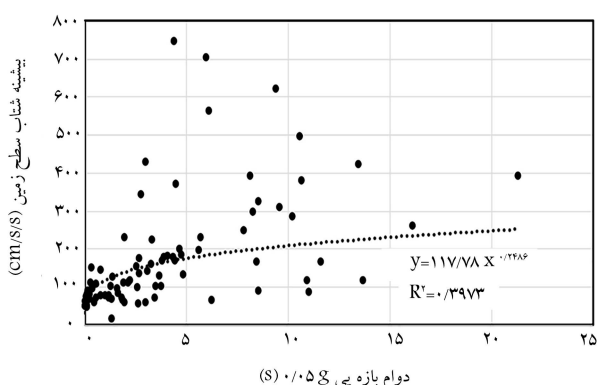


ب) نمودار دوام بازه‌ی؛

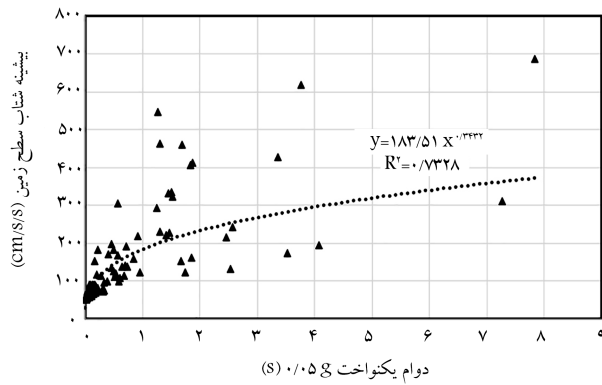


ج) نمودار دوام یکنواخت.

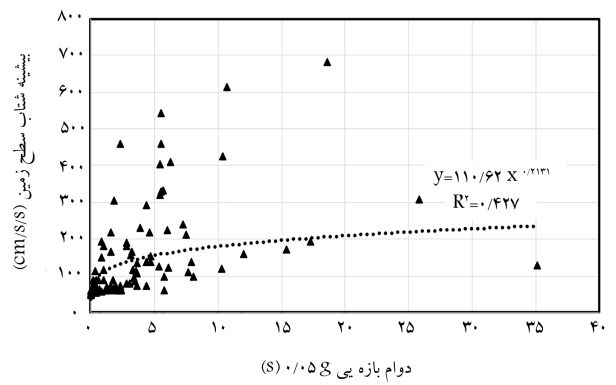
شکل ۳. نمودار مدت دوام بازه‌ی و یکنواخت یک شتاب‌نگاشت طبیعی.^[۳۳]



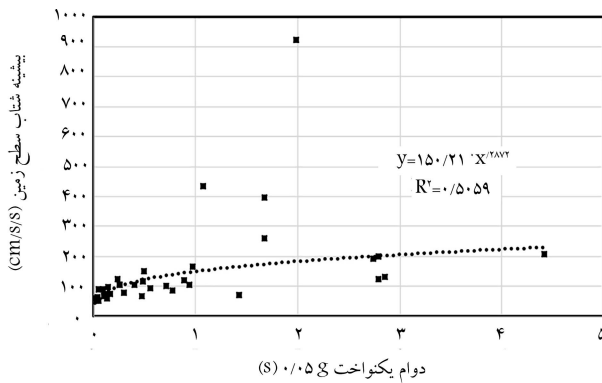
شکل ۴. رابطه‌ی بین دوام بازه‌ی در آستانه‌ی شتاب $0.05g$ و بیشینه‌ی شتاب سطح زمین در خاک نوع ۱.



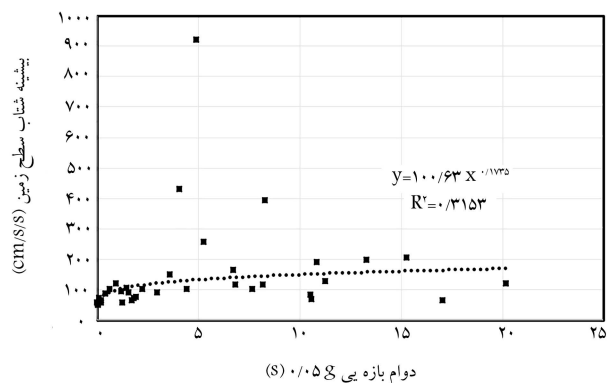
شکل ۸. رابطه‌ی بین دوام یکنواخت در آستانه‌ی شتاب $g/°۰۵$ و بیشینه‌ی شتاب سطح زمین در خاک نوع ۲.



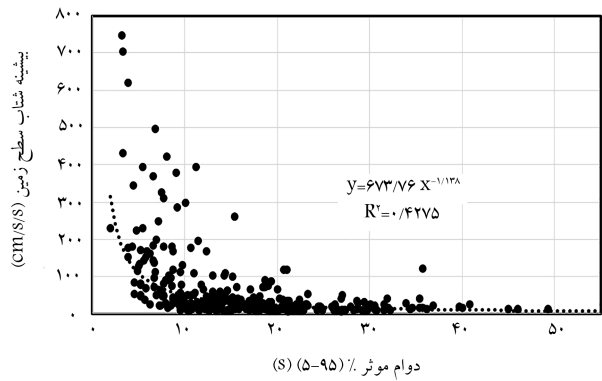
شکل ۵. رابطه‌ی بین دوام بازه‌ی در آستانه‌ی شتاب $g/°۰۵$ و بیشینه‌ی شتاب سطح زمین در خاک نوع ۲.



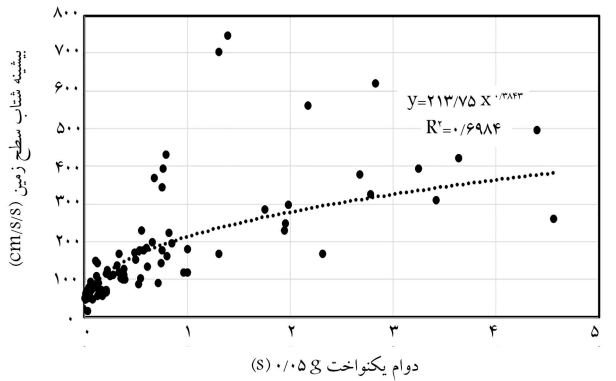
شکل ۹. رابطه‌ی بین دوام یکنواخت در آستانه‌ی شتاب $g/°۰۵$ و بیشینه‌ی شتاب سطح زمین در خاک نوع ۳.



شکل ۶. رابطه‌ی بین دوام بازه‌ی در آستانه‌ی شتاب $g/°۰۵$ و بیشینه‌ی شتاب سطح زمین در خاک نوع ۳.



شکل ۱۰. شکل رابطه بین دوام مؤثر (۵-۹۵ درصد) و بیشینه‌ی شتاب سطح زمین در خاک نوع ۱.



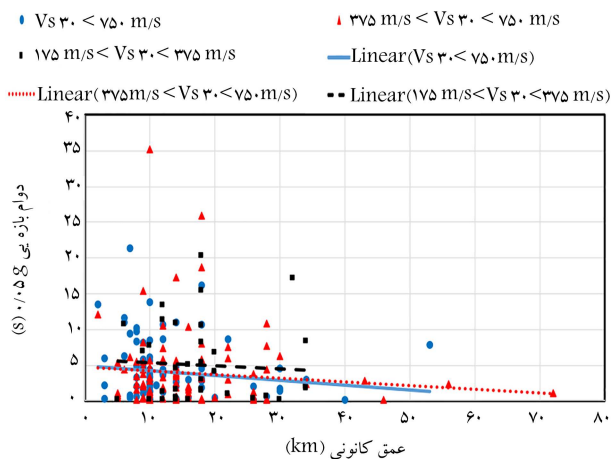
شکل ۷. رابطه‌ی بین دوام یکنواخت در آستانه‌ی شتاب $g/°۰۵$ و بیشینه‌ی شتاب سطح زمین در خاک نوع ۱.

و مدت دوام مؤثر (۵-۹۵ درصد) به ترتیب در خاک‌های نوع ۱، ۲ و ۳ بیان شده است. ارتباط بین دوام‌ها و بیشینه‌ی شتاب سطح زمین توسط رگرسیون نیز بر روی نمودارها مشاهده می‌شود.

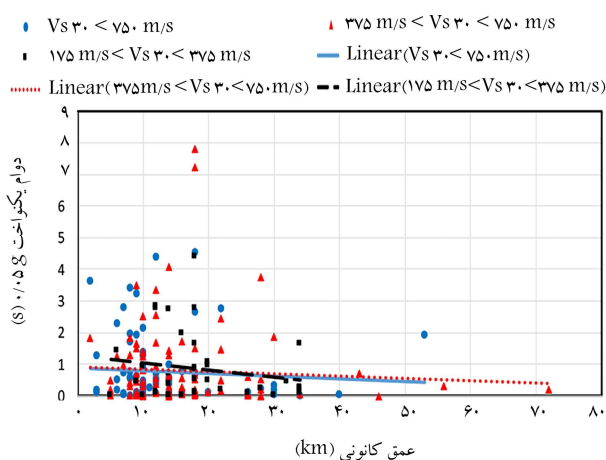
همچنین نتیجه می‌شود که برخلاف دوام بازه‌ی و دوام یکنواخت، رابطه‌ی مشابهی برای دوام مؤثر وجود ندارد. می‌توان گفت عمده‌ی رکوردهای با دوام مؤثر (۵-۹۵ درصد) طولانی (بالای ۲۰ ثانیه) شتاب اوج زمین کم‌تر از $g/°۱$ داشته‌اند. در اینجا ویژگی‌های مدت دوام بازه‌ی در آستانه‌ی شتاب $g/°۰۵$ ، مدت دوام یکنواخت در آستانه‌ی شتاب $g/°۰۵$ ، مدت دوام مؤثر (۵-۹۵ درصد)، عمق

است. در شکل‌های ۷ الی ۹، روابط بین بیشینه‌ی شتاب سطح زمین و مدت دوام یکنواخت در آستانه‌ی شتاب $g/°۰۵$ به ترتیب در خاک‌های نوع ۱، ۲ و ۳ بیان شده است. ارتباط بین دوام‌ها و بیشینه‌ی شتاب سطح زمین توسط رگرسیون نیز بر روی نمودارها مشاهده می‌شود.

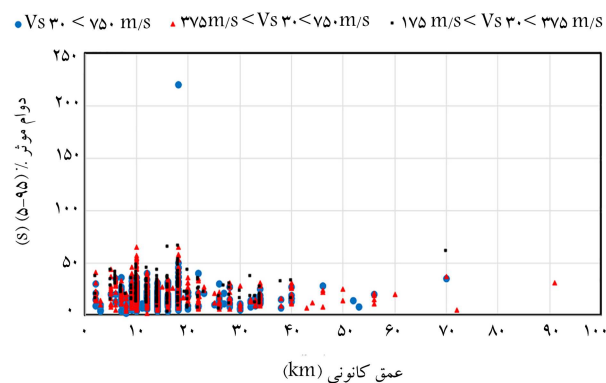
نتیجه‌ی دیگر آن است که با افزایش بیشینه‌ی شتاب سطح زمین، دوام یکنواخت در هر سه نوع خاک افزایش یافته است. همچنین هر چه خاک نرم‌تر شده است، شیب تغییرات دوام یکنواخت تا اندازه‌ی با بیشینه‌ی شتاب سطح زمین افزایش یافته است. همچنین در شکل‌های ۱۰ الی ۱۲، روابط بین بیشینه‌ی شتاب سطح زمین



شکل ۱۴. رابطه‌ی بین دوام بازه‌ی در آستانه‌ی $0.5g$ و عمق کانونی.



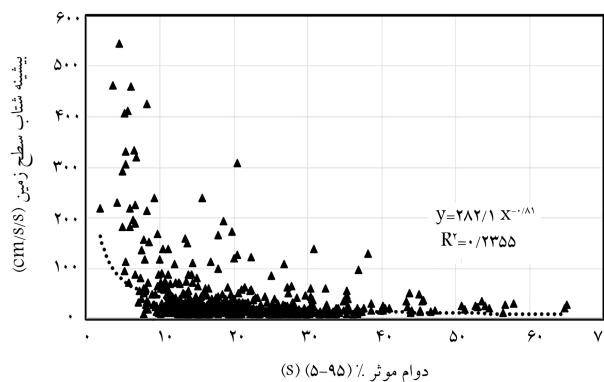
شکل ۱۵. رابطه‌ی بین دوام یکنواختی در آستانه‌ی $0.5g$ و عمق کانونی.



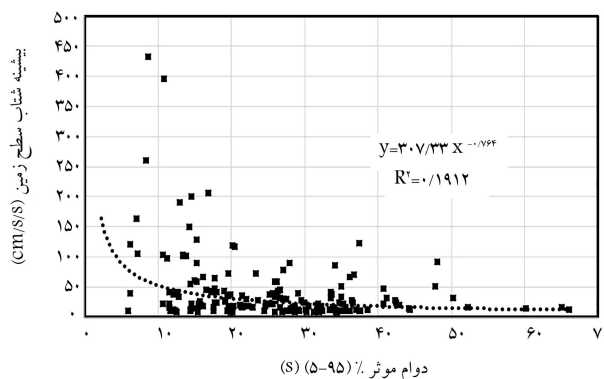
شکل ۱۶. رابطه‌ی بین دوام موثر (۵-۹۵ درصد) و عمق کانونی.

می‌شود که مطابق آن‌ها، با افزایش عمق کانونی مقدار دوام با تعاریف مختلف کاهش می‌یابد. به خصوص بعد از عمق کانونی 2° کیلومتر، دوام بازه‌ی با آستانه‌ی $0.5g$ عمدتاً کمتر از 1° ثانیه است.

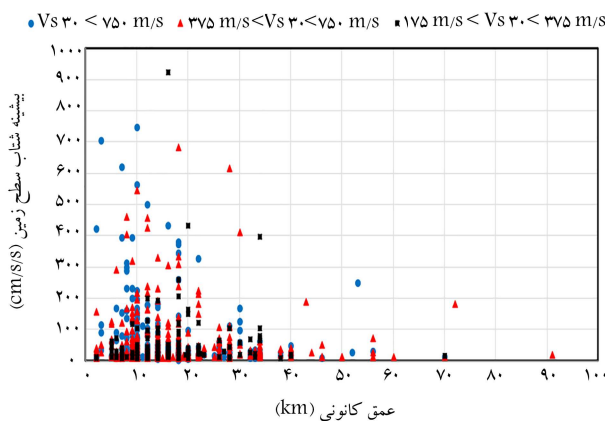
شرایط خاک محلی سایت‌های مشاهداتی، آثار چشمگیری در حرکات زمین‌لرزه‌ی می‌گذارد. بنابراین، برای آشکار کردن آثار شرایط سایت محلی در بیشینه‌ی شتاب سطح زمین و دوام حرکت زمین‌لرزه در مطالعه‌ی حاضر، میانگین سرعت موج برشی در 3° متر فوقانی (V_{S30}) به عنوان پارامتر کمی از شرایط سایت محلی



شکل ۱۱. شکل رابطه بین دوام موثر (۵-۹۵ درصد) و بیشینه‌ی شتاب سطح زمین در خاک نوع ۲.



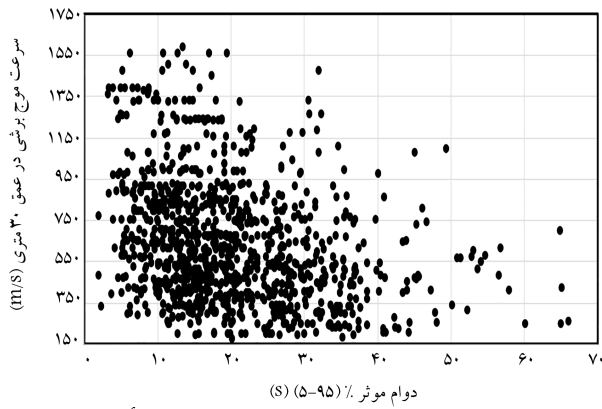
شکل ۱۲. شکل رابطه بین دوام موثر (۵-۹۵ درصد) و بیشینه‌ی شتاب سطح زمین در خاک نوع ۳.



شکل ۱۳. پراکنش بین بیشینه‌ی شتاب سطح زمین و عمق کانونی.

کانونی، سرعت موج برشی در عمق 3° متری و بیشینه‌ی شتاب سطح زمین با استفاده از داده‌های ایران بررسی شده است. در شکل ۱۳، پراکنش بیشینه‌ی شتاب سطح زمین در مقابل عمق کانونی مشاهده می‌شود که مطابق آن با کاهش عمق کانونی، همبستگی مستقیم تدریجی با بیشینه‌ی شتاب سطح زمین وجود دارد. به عبارت دیگر، با افزایش عمق کانونی از شدت بیشینه‌ی شتاب سطح زمین کاسته می‌شود.

در شکل‌های ۱۴ الی ۱۶، به ترتیب دوام بازه‌ی در آستانه‌ی $0.5g$ دوام یکنواختی در آستانه‌ی $0.5g$ و دوام موثر (۵-۹۵٪) در مقابل عمق کانونی مشاهده



شکل ۲۰. پراکنش سرعت موج برشی در عمق ۳۰ متری و دوام مؤثر (۵-۹۵) درصد.

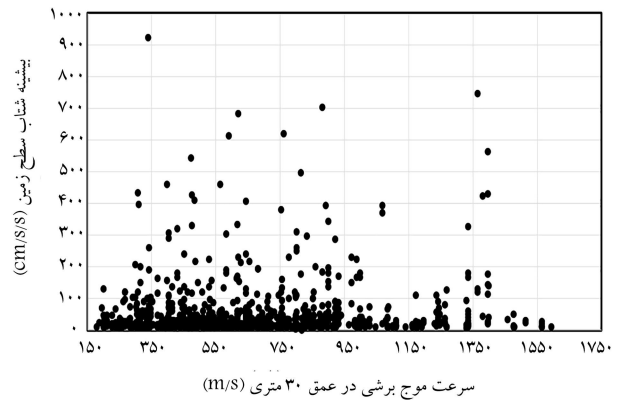
و یکنواخت مختلفی را در شکل‌های ۱۸ و ۱۹ نمایش داده‌اند. برای نتیجه‌گیری دقیق‌تر باید دوام و شرایط ساختگاه در گروه‌های مختلف خاک با دسته‌بندی بزرگ‌ها همچون شکل‌های ۴ الی ۱۲ تفکیک شود. به عنوان یک نتیجه‌ی کلی می‌توان گفت هر چه خاک سخت‌تر شود، دوام بازه‌ی و یکنواخت کاهش خواهد یافت.

نمودار پراکنش سرعت موج برشی در عمق ۳۰ متری و دوام مؤثر در شکل ۲۰، اگر چه پراکنندگی نسبتاً زیادی دارد، اما نشان می‌دهد که با افزایش سرعت موج برشی از دوام مؤثر کاسته شده است. به عنوان مثال، به طور تقریبی رکوردهایی که دوام مؤثر بالای ۵۰ ثانیه داشته‌اند، عموماً در ساختگاه‌های با سرعت موج برشی زیر 600 m/s ثبت شده‌اند.

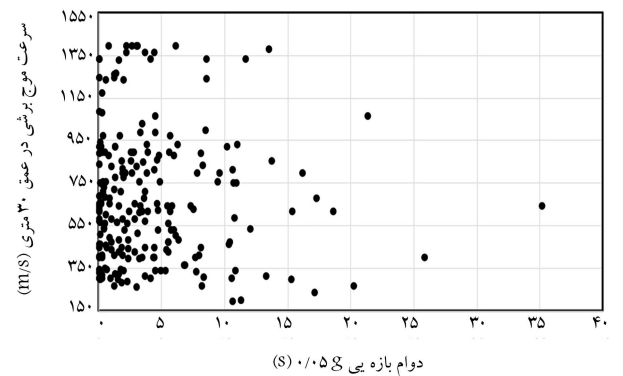
۵. نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر، از ۱۰۵۴ رکورد سه مؤلفه‌ی مربوط به ۱۹۷ رویداد لرزه‌ی ثبت شده در ایران با بزرگای گشتاور بزرگ‌تر یا مساوی 5×10^{19} تا سال ۲۰۱۹ از مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی در ایران استفاده شده است. تمامی رکوردها مربوط به ساختگاه‌هایی هستند که عمق کانونی و سرعت موج برشی در ۳۰ متر اول عمق برای آن‌ها موجود است. پس از تهیه‌ی رکوردها، تصحیح خط مبنا بر روی آن‌ها انجام شد و با برنامه‌نویسی، دوام بازه‌ی با آستانه‌ی شتاب $0.05g$ ، دوام یکنواخت با آستانه‌ی شتاب $0.05g$ و دوام مؤثر (۵-۹۵ درصد) نیز محاسبه شد. سپس با توجه به آیین‌نامه‌ی لرزه‌ی ۲۸۰ ایران، گروه‌بندی نوع خاک صورت گرفت و داده‌ها بر حسب نوع خاک در سه دسته قرار گرفتند. مدت دوام و شتاب اوج زمین به عنوان پارامتر نماینده‌ی مدت دوام و ویژگی‌های دامنه‌ی حرکات زمین لرزه‌ی انتخاب شدند. علاوه بر این، میانگین سرعت موج برشی در ۳۰ متر فوقانی (V_{30}) به عنوان پارامتر کمی از شرایط سایت محلی در نظر گرفته شد. همچنین علاوه بر مطالعه‌ی ویژگی‌های شتاب اوج زمین و سرعت موج برشی و دوام زلزله، عمق کانونی نیز بررسی شده است. خلاصه‌ی نتایج تحلیل‌های صورت گرفته به این شرح هستند:

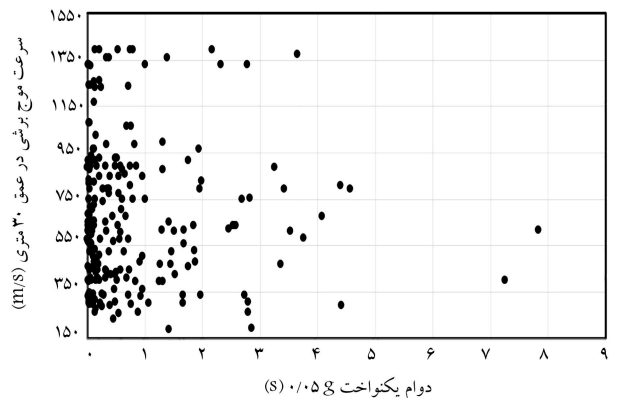
- با افزایش شتاب اوج زمین، دوام بازه‌ی و یکنواخت افزایش می‌یابد؛ در حالی که رابطه‌ی مذکور در مورد دوام مؤثر این‌گونه نیست. در ارتباط با دوام مؤثر، عمده‌ی رکوردهای با دوام مؤثر (۵-۹۵ درصد) طولانی (بالای ۲۰ ثانیه)، شتاب اوج زمین کمتر از $1g$ داشته‌اند.



شکل ۱۷. پراکنش بیشینه‌ی شتاب سطح زمین و سرعت موج برشی در عمق ۳۰ متری.



شکل ۱۸. پراکنش سرعت موج برشی در عمق ۳۰ متری و دوام بازه‌ی در آستانه‌ی $0.05g$.



شکل ۱۹. پراکنش سرعت موج برشی در عمق ۳۰ متری و دوام یکنواخت در آستانه‌ی $0.05g$.

همان‌طور که پیشتر ذکر شد، در نظر گرفته شده است. در شکل ۱۷، پراکنش بیشینه‌ی شتاب سطح زمین و سرعت موج برشی در عمق ۳۰ متری مشاهده می‌شود. در شکل‌های ۱۸ الی ۲۰، به ترتیب پراکنش سرعت موج برشی در عمق ۳۰ متری در برابر دوام بازه‌ی در آستانه‌ی $0.05g$ ، دوام یکنواخت در آستانه‌ی $0.05g$ و دوام مؤثر (۵-۹۵ درصد) مشاهده می‌شود.

از آنجا که زلزله‌های قوی ایران (با بزرگای گشتاور بیش از ۵) در مطالعه‌ی حاضر روی ساختگاه‌های متفاوت و ناشی از بزرگای مختلف بوده‌اند، دوام‌های بازه‌ی

- همچنین هر چه خاک نرم‌تر شده است، شیب رابطه‌ی دوام بازه‌ی و یکپارچگی با بیشینه‌ی شتاب سطح زمین افزایش یافته است.
- رابطه‌ی بین سرعت موج برشی در عمق 3° متری و دوام مؤثر نشان می‌دهد که با افزایش سرعت موج برشی، از دوام مؤثر کاسته شده است.
- در خاتمه باید افزود رابطه‌ی بین مدت دوام و بیشینه‌ی دامنه‌ی حرکات قوی زلزله برای حرکت ورودی در دسترس برای طراحی مقاوم سازه‌ها در برابر زلزله، به خصوص سازه‌های بتن مسلح که در سیکل‌های پیاپی زلزله دچار افت سختی و کاهش مقاومت می‌شوند، اهمیت زیادی دارد.
- با افزایش عمق کانونی، مقدار دوام با تعاریف مختلف کاهش یافته است. به خصوص بعد از عمق کانونی 2° کیلومتر، دوام بازه‌ی با آستانه‌ی $0.5g$ / $^\circ$ عمدتاً کمتر از 1° ثانیه بوده است.

پانوشتها

1. Kamiyama
2. Chandramohan
3. Capraro
4. Fairhurst
5. Ventura
6. Trifunac & Brady
7. Dobry
8. peak ground acceleration
9. Bommer & Pereira
10. Husid

منابع (References)

1. Pawirodikromo, W. "The Effects of earthquake significant duration D595 to the earthquake intensity measures and the inelastic response of SDOF reinforced concrete structure", *In MATEC Web of Conferences*, **280**, 18 p., EDP Sciences (2019).
2. Kanai, K. and Sakai, Y. "Some studies on the correlation between strong motions of SMAC's records at Kushiro distinct meteorological observatory and damages of structures in Kushiro city by the Hiroooki earthquake", *Proceedings of the 3rd Japan Earthquake Engineering Symposium*, pp. 771-778 (1970).
3. Sofiane, H., Bourahla, N. and Nasser, L. "Significant duration prediction and evaluation of the effects of seismological parameters using neural networks", *Structural Engineering and Mechanics*, IIsan (Seoul), Korea (2017).
4. Bommer JJ, Martinez-Pereira, A. "The effective duration of earthquake strong motion", *J Earthq Eng*, **3**(2), pp. 127-72 (1999).
5. Chandramohan, R., Baker, J.W. and Deierlein, G.G. "Quantifying the influence of ground motion duration on structural collapse capacity using spectrally equivalent records", *Earthq. Spectra*, **32**(2), pp. 927-950 (2015).
6. Hou, H. and Qu, B. "Duration effect of spectrally matched ground motions on seismic demands of elastic perfectly plastic SDOFs", *Eng. Struct.*, **90**, pp. 48-60 (2015).
7. Song, R., Li, Y. and vande Lindt, J.W. "Impact of earthquake ground motion characteristics on collapse risk of post-main shock buildings considering after-shocks", *Eng. Struct.*, **81**, pp. 349-361 (2014).
8. Raghunandan, M. and Liel, A.B. "Effect of ground motion duration on earthquake-induced structural collapse", *Struct. Saf*, **41**, pp. 119-133 (2013).
9. Ou, Y.-Ch., Song, J., Wang, P.-H. and et al. "Ground motion duration effects on hysteretic behavior of reinforced concrete bridge columns", *J. Struct. Eng*, **140**(3), 04013065 (2014).
10. Kamiyama, M. "A statistical analysis of duration and its related parameters with emphasis on local soil conditions", *JSCCE*, **350/I-2**, pp. 271-280 (1984).
11. Shoji, Y., Tanii, K. and Kamiyama, M. "The duration and amplitude characteristics of earthquake ground motions with emphasis on local site effects", *In 13th World Conf. Earthq. Eng*, **436** (Aug., 2004).
12. Chandramohan, R., Baker, J.W. and Deierlein, G.G. "Quantifying the influence of ground motion duration on structural collapse capacity using spectrally equivalent records", *Earthquake Spectra*, **32**(2), pp. 927-950 (2016).
13. Chandramohan, R. "Duration of earthquake ground motion: Influence on structural collapse risk and integration in design and assessment practice", Stanford University, Stanford, CA, USA (2016).
14. Capraro, I. "Damage, collapse potential and long duration effects of subduction ground motions on structural systems", University of British Columbia (2018).
15. Fairhurst, M., Bebamzadeh, A. and Ventura, C.E. "Effect of ground motion duration on reinforced concrete shear wall buildings", *Earthq. Spectra*, **35**(1), pp. 311-331 (2019).
16. Shoji, Y., Tanii, K. and Kamiyama, M. "A study on the duration and amplitude characteristics of earthquake ground motions", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, **25**(7-10), pp. 505-512 (2005).
17. Lingfeng, K., Maosheng, G. and Zhanxuan, Z. "The effect of duration of strong ground motion on the ductility demand of SDOF structure", *In IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, **304**(3), 032079 (Sep., 2019).
18. Ventura, C.E., Fairhurst, M., Bebamzadeh, A. and et al. "Seismic response and collapse risk of shearwall buildings subjected to long duration ground motion", *In Concrete Structures in Earthquake*, Springer, Singapore, pp. 167-184 (2019).

19. Bhanu, V., Chandramohan, R. and Sullivan, T.J. "Investigating the influence of ground motion duration on the dynamic deformation capacity of reinforced concrete framed structures", Pacific Conference on Earthquake Engineering, SkyCity, Auckland, New Zealand (4-6 Apr., 2019).
20. Molazadeh, M. and Saffari, H. "The effects of ground motion duration and pinching-degrading behavior on seismic response of SDOF systems", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, **114**, pp. 333-347 (2018).
21. Trifunac, M.D. and Brady, A.G. "A study on the duration of strong earthquake ground motion", *Bull. Seis. Soc. Am.*, **65**(3), pp. 581-626 (1975).
22. Dobry, R., Idriss, I.M. and Ng, E. "Duration characteristics of horizontal components of strong-motion earthquake records", *Bull. Seis. Soc. Am.*, **68**(5), pp. 1487-1520 (1978).
23. BHRC, <http://smd.bhrc.ac.ir/Portal/en/Search/Waveforms> (last accessed: Feb., 2019).
24. Earthquake Design Building Regulations (Standard 2800), 3ed Edition, Road, Housing & Urban Development Research Center (1385).
25. Ambraseys, N.N. and Sarma, S.K. "The response of earth dams to strong earthquakes", *Geotechnique*, **17**(3), pp. 181-213 (1967).
26. Bolt, B.A. "Duration of strong ground motion", *In: Proceedings 5th World Conference on Earthquake Engineering*, Rome, pp. 1304-1313 (1973).
27. Bommer, J.J., Stafford, P.J. and et al. "Empirical equations for the prediction of the significant, bracketed, and uniform duration of earthquake ground motion", *Bull. Seismol. Soc. Am.*, **99**(6), pp. 3217- 3233 (2009).
28. Trifunac, M.D. and Brady, A.G. "A study on the duration of strong earthquake ground motion", *Bull. Seismol. Soc. Am.*, **65**(3), pp. 581-626 (1975).
29. Shoji, Y., Tanii, K. and Kamiyama, M. "A study on the duration and amplitude characteristics of earthquake ground motions", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, **25**(2005), pp. 505-512 (2005).
30. Arias, A. "Measure of earthquake intensity", Massachusetts Inst. of Tech., Cambridge, Univ. of Chile, Santiago de Chile (1970).
31. Bommer, J.J. and Martinez-Pereira, A. "The effective duration of earthquake strong motion", *J. Earthq. Eng.*, **3**, pp. 127-172 (1999).
32. Raghunandan, M. and Liel, A.B.. "Effect of ground motion duration on earthquake-induced structural collapse", *Struct. Saf*, **41**, pp. 119-133 (2013).
33. Wang, G., Zhang, S. and Zhou, C. "Correlation between strong motion durations and damage measures of concrete gravity dams", *Soil Dynamics and Earthquake*, **69**, pp. 148-162 (2015).
34. Trifunac, M.D. and Brady, A.G. "A study on the duration of raghunandan M, Liel AB. effect of ground motion duration on earthquake-induced structural collapse", *Struct. Saf*, **41**, pp. 119-133 (2013).
35. Chandramohan, R., Baker, J.W. and Deierlein, G.G. "Quantifying the influence of ground motion duration on structural collapse capacity using spectrally equivalent records", *Earthq. Spectra*, **32**(2), pp. 927-950 (2016).
36. Zargarani, M. and Ansari, A. "Empirical equations for the predicting duration of earthquake ground motion in iranian plateau", International Institute of Earthquake Engineering and Seismology (IIEES), Iran (2012).
37. Bolt, B.A. "Duration of strong ground motion", *Proc. 5th World Conf. Earthq. Eng.*, **1**, pp. 1304-1313 (1973).
38. Rezaee Manesh, M. and Saffari, H. "A review on seismic durability and its effects on vulnerability of concrete structures", *Disaster Prevention and Management Knowledge*, **9**(3), pp.253-266 (in Persian) (2019).