

بررسی حداکثر حرکات زمین، مدت دوام حرکات شدید و محتوای فرکانسی زلزله های ایران

دکتر محسن تهرانی زاده
استاد

فرزانه حامدی
دانشجوی دکترای

دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی امیرکبیر

چکیده

خصوصیات و ویژگی های زمین لرزه بر رفتار سازه ها در مقابل زلزله تأثیر بسزایی دارد. حداکثر حرکات زمین، مدت دوام حرکات شدید و محتوای فرکانسی از مهمترین خصوصیات زمین لرزه ها است که در این مقاله مورد بررسی قرار می گیرد. در مطالعه مدت دوام حرکات شدید زلزله با مروری بر تعریف های مختلف مدت دوام، تعریفی که در مطالعات اخیر مورد استفاده قرار گرفته و مبتنی بر میزان انرژی ورودی به سازه است انتخاب گردید و براین اساس مدت دوام ۱۰۶ شتابنگاشت ثبت شده در ایران بدست آمده. سپس اثر پارامترهای مختلف زمین لرزه یعنی بزرگا، فاصله تا مرکز زلزله، حداکثر شتاب زمین و مدت کل ثبت شتابنگاشت بر مدت دوام با توجه به مطرح شدن آن در بند (۲-۲) = ۱ - ۵ - ۱ از آیین نامه ۲۸۰۰، مورد بررسی قرار گرفت. در این مقاله سعی شده است رابطه ای نیز میان مدت زمان حرکات شدید و مدت کل ثبت شتابنگاشت ارائه گردد که بتواند راهنمایی برای تعیین شتابنگاشت های بند مذکور در آیین نامه ۲۸۰۰ باشد. برای بررسی محتوای فرکانسی، چگالی طیفی توان ۱۰۶ زلزله تعیین و به منظور مقایسه چگالی طیفی توان زلزله های مختلف، طیف توان کلیه رکوردها نرمالیزه شده است. در این تحقیق با بررسی های انجام شده بر روی چگالی توانی زلزله های ایران، مدل چگالی توزیع احتمال مقادیر حدی (extreme value) برای آنها انتخاب گردیده و بر این اساس مقادیر طیف توان محاسباتی میانگین، طیف توان میانگین و پربود غالب زلزله های مختلف برای انواع خاک ها با توجه به مشخصات ایستگاه های گوناگون شتابنگاشتی محاسبه شده است.

کلمات کلیدی

حداکثر حرکات زمین، مدت دوام حرکات شدید، محتوای فرکانسی، چگالی طیفی توان، مدل مقادیر حدی، طیف توان میانگین، شتابنگاشت های ایران میانگین مربع شتاب، فرکانس مرکزی، ضریب شکل

Peak Ground Motions, Effective Duration of Strong Motions and Frequency Content of Iranian Earthquakes

M. Tehranizadeh
Professor

F. Hamedi
Ph. D. Student

Civil Engineering Department,
Amirkabir University of Technology

Abstract

The characteristics of earthquake ground motion have great influences on the response of structures to the earthquakes. Peak ground motions, duration of strong motions and frequency content are important characteristics of earthquakes, which are studied in this paper. The relation between peak ground acceleration, velocity and displacement have been taken into account and the effects of magnitude, epicentral distance and recorded duration of earthquakes on peak ground acceleration have been presented as graphs.

The frequency content of ground motion can be examined by power spectral density of accelerograms. In this study the power spectral density of the records have been determined and normalized power spectral densities are compared. There are different formulas for the smoothed power spectral density function such as Kanai-Tajimi's model. In this study, comparing with Kanai-Tajimi's formula, the extreme value model is suggested for the spectral density function. This model is evaluated for accelerograms on different soil conditions and the smoothed mean power spectral density function are determined for each soil groups. The central frequency and predominant period of earthquakes are also estimated.

Keywords

Peak ground acceleration, Duration of strong ground motions, frequency content, Power spectral density, extreme value model, Iran accelerograms, Central frequency, mean power spectra.

نشده و تنها مقدار بزرگای موج حجمی m_b آورده شده است. بزرگای موج سطحی M_s سایر زلزله‌ها از رابطه خطی زیر که با استفاده از رگرسیون خطی توسط نگارندگان بدست آمده تعیین گردیده است.

$$M_s = -4.976 + 1.904m_b \quad (1)$$

این رابطه برای ۱۰۶ زلزله مورد بررسی، تعریف شده و با مقادیر بدست آمده در بررسی‌های دیگر کمی تفاوت دارد (بعنوان مثال مرجع ۱۲).

۲- تغییرات حداکثر حرکات زمین

بیشترین مقدار شتاب در زلزله‌های مورد بررسی مربوط به زلزله زنجیران با $1018 \text{ cm/s}^2 = \text{pga}$ است، این در حالی است که بیشترین مقدار سرعت مربوط به طیس با 107 cm/s و بیشترین مقدار تغییر مکان نیز مربوط به همین زلزله با 75.3 cm می‌باشد.

شکل (۱- الف) ارتباط بین بزرگای حداکثر شتاب زمین را نشان می‌دهد. همانطور که از شکل مشاهده می‌شود با افزایش بزرگای حداکثر شتاب زمین نیز افزایش یافته و حدوداً با افزایش هر واحد ریشتر به بزرگای زلزله، حداکثر شتاب تقریباً ۵۰ گال اضافه می‌گردد. با توجه به اینکه طبق تعریف، بزرگای مقدار انرژی آزاد شده در منبع مرتبط بوده و از طرفی انرژی زلزله به شتاب زمین مربوط می‌شود، انتظار چنین افزایشی در حداکثر شتاب می‌رود. شکل (۱- ب) تغییرات حداکثر شتاب زمین را با تغییر فاصله تا مرکز زلزله مشخص می‌سازد. با افزایش فاصله تا مرکز زلزله، حداکثر شتاب زمین کاهش می‌یابد. وابستگی حداکثر شتاب زمین به فاصله تا مرکز زمین لرزه و بزرگای توسط محققین بصورت رابطه کاهندگی (attenuation) تعریف شده است. همانطور که از شکل‌های (۱- الف و ب) مشاهده می‌شود این سه پارامتر با هم رابطه لگاریتمی دارند.

شکل (۱- ج) تغییرات حداکثر شتاب زمین را با تغییر مدت زمان ثبت شتابنگاشت نشان می‌دهد. رابطه بهترین تابعی که می‌توان بر این نقاط برازش داد نشان می‌دهد که با افزایش مدت زمان زلزله حداکثر شتاب زمین نیز افزایش می‌یابد. در واقع زلزله زنجیران که حداکثر بیشینه شتاب (1018 cm/sec^2) در بین شتابنگاشت‌های مورد بررسی را دارد، دارای حداکثر زمان کل ثبت زلزله (63.98 sec) نیز می‌باشد.

شکل (۲) تغییرات حداکثر سرعت و حداکثر تغییر مکان زمین را با حداکثر شتاب حرکات نشان می‌دهد. همانطور که

برخی از خصوصیات حرکات زمین شامل:
الف- حداکثر حرکات زمین (حداکثر شتاب، حداکثر سرعت و حداکثر تغییر مکان زمین)
ب- مدت دوام حرکات شدید
ج- محتوای فرکانسی

تأثیر عمده‌ای بر پاسخ سازه در زمین لرزه دارند، بطوریکه حداکثر حرکات زمین عمدتاً روی دامنه ارتعاشات اثر می‌گذارد. مدت دوام حرکات شدید تأثیر قابل توجهی بر شدت جنبش و تکان سازه دارد، بنحوی که زمین لرزه‌ای که دارای حداکثر شتاب متوسط و مدت طولانی باشد خسارات بیشتری از زمین لرزه‌ای با شتاب بزرگتر اما مدت دوام کوتاه‌تر بر جای می‌گذارد. محتوای فرکانسی و شکل طیفی به پیوند ارتعاش سازه مربوط می‌شوند. در صورتیکه محتوای فرکانسی حرکات و فرکانس‌های ارتعاشی سازه نزدیک به هم باشند، حرکات زمین موجب ایجاد بیشترین تشدید در سازه خواهد شد.

۱- تعیین ویژگی‌های حرکات زمین برای شتابنگاشت‌های ثبت شده در ایران

در این بررسی تعداد ۱۰۶ مورد از رکوردهای ثبت شده در ایران مورد استفاده قرار گرفته است. این شتابنگاشت‌ها از رکوردهای ذکر شده در کتاب «داده‌های پایه شتابنگاشت‌های شبکه شتابنگاری کشور» (رمضی ۱۳۷۶) انتخاب شده‌اند. در این انتخاب فقط از رکوردهایی استفاده شده که شرایط زمین شناختی ساختگاهی آنها براساس برداشت‌های ژئوفیزیکی (ژئوسیسیمیک و ژئوالکتریک) تعیین گردیده است (نوع A) اطلاعات این رکوردها تصحیح شده است و از مؤلفه‌های طولی (L) و عرضی (T) رکوردهایی که دارای حداکثر شتاب بیشتر از ۵۰ گال هستند استفاده شده است. با در نظر گرفتن معیارهای فوق، تعداد ۴۹ مؤلفه شتابنگاشت ثبت شده مربوط به ایستگاه‌های دارای خاک نوع I، ۳۶ مؤلفه مربوط به خاک نوع II، ۱۰ مؤلفه مربوط به خاک نوع III و ۱۱ مؤلفه مربوط به خاک نوع IV می‌باشد. این رکوردها مربوط به ۴۹ زلزله مختلف است که بین سال‌های ۱۳۵۵ و ۱۳۷۳ به ثبت رسیده‌اند.

در محدوده بیشینه شتاب‌های بین 51 cm/sec^2 تا 1018 ، فاصله تا مرکز زلزله از ۵ تا ۱۳۴ کیلومتر، بزرگای (mb) بین ۳.۸ تا ۶.۷ ($M_s = 7.7$) و مدت ثبت شتابنگاشت از $1/96$ تا $63/98$ ثانیه را دربر می‌گیرند.

شایان ذکر است که برای تعدادی از این زمین لرزه‌ها بزرگای موج سطحی (M_s) در مرجع مذکور [۲۶] مشخص

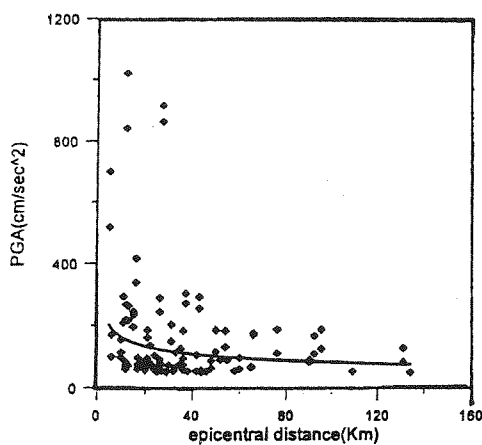
مشاهده می شود با افزایش شتاب زلزله، حداکثر سرعت زلزله نیز افزایش یافته؛ اما حداکثر تغییر مکان زلزله همبستگی مشخصی با حداکثر شتاب زلزله نداشته و نمی توان رابطه ای بین آنها تعریف نمود.

۳- تغییرات مدت دوام شتابنگاشت ها

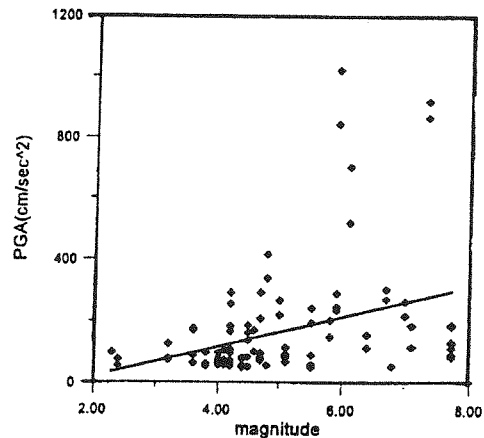
تعریف های مختلفی برای مدت دوام حرکات شدید زلزله از سوی محققان مطرح گردیده است. بومرو و مارتینزپرا (۱۹۹۹) تعریف های مختلف مربوط به زمان دوام را به چهار دسته کلی تقسیم نموده اند. یکی از تعریف های معتبر که در مقالات متعددی از جمله در رینسو و همکاران (۲۰۰۰)، هراندز و کتان (۲۰۰۰)، پاپازاگوس و همکاران (۱۹۹۲)، آتکینسون و سیلوا (۲۰۰۰)، تریفناک و نوپکوا (۱۹۹۵) به آن اشاره شده است تعریف مدت دوام براساس شدت شتابنگاشت است که فاصله زمانی که در آن ۹۰٪ انرژی شتابنگاشت اعمال می شود را بعنوان مدت دوام حرکات شدید در نظر می گیرد. طبق این تعریف زمانی که ۵٪ از انرژی کل شتابنگاشت حادث می شود زمان شروع حرکات شدید و

زمانی که ۹۵٪ از انرژی کل شتابنگاشت اعمال می شود زمان پایان حرکات شدید در نظر گرفته می شود. در این تحقیق برای ۱۰۶ شتابنگاشت مورد بررسی، شدت شتابنگاشت و زمان مربوط به مقدار ۵٪ از کل انرژی و ۹۵٪ آن محاسبه شده و بعنوان زمان شروع و پایان حرکات شدید در نظر گرفته شده اند [۲۱ و ۱۴]. تفاوت بین این دو زمان، مدت دوام حرکات شدید بوده این مقدار نیز برای تمامی رکوردهای مورد بررسی محاسبه شده است. در ستون سوم تا پنجم از جدول (۱) مقادیر مربوط به زمان شروع، پایان و مدت دوام حرکات شدید برای دوازده نمونه از رکوردهای مورد بررسی درج شده است. [۲۴] آورده شده است. شایان ذکر است که مدت دوام حرکات شدید زلزله ها در هنگام استفاده از بند (۲- پ) - ۲ - ۵ - ۱ آیین نامه ۲۸۰۰ مورد نیاز می باشند.

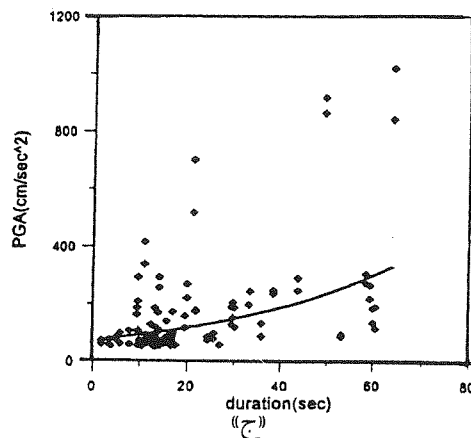
در جدول (۲) میانگین بزرگا، فاصله تا مرکز زمین لرزه، بیشینه شتاب حرکات زمین، مدت ثبت شتابنگاشت و مدت دوام حرکات شدید برای چهار نوع خاک مختلف آورده شده است.



«ب»



«الف»

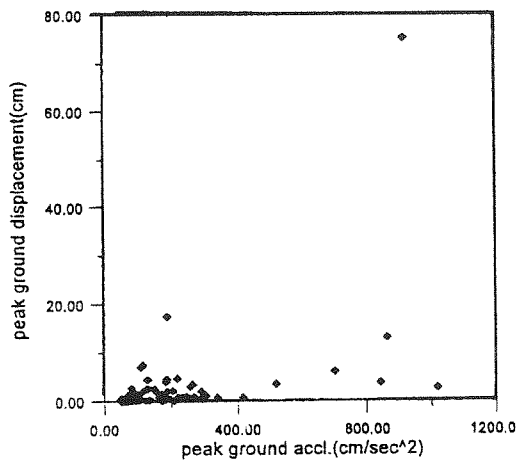


«ج»

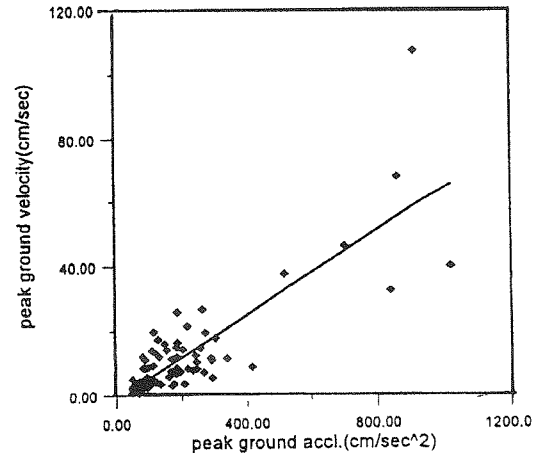
شکل (۱) نمودار تغییرات حداکثر شتاب بر حسب دیگر خصوصیات زمین لرزه.

جدول (۱) خصوصیات شتابنگاشت های زلزله های ایران.

نام ایستگاه	شماره ثبت شتابنگاشت	مدت دوام حرکات شدید (sec)	شروع حرکت شدید (sec)	پایان حرکت شدید (sec)	میانگین مربع شتاب (cm/s ²)	فرکانس مرکزی (rad/sec)	ضریب شکل δ	پارامترهای مدل مقادیر حدی	
								α	β
ناغان	1054-1.L02	3.2	1.3	4.5	92	46.5	0.55	0.05	27.44
ناغان	1054-1.T02	3.06	1.38	4.44	63	46.1	0.55	0.05	26.99
دیپوک	1082-1.L02	33.92	4.5	37.92	36	36.3	0.53	0.07	22.22
دیپوک	1082-1.T02	35.0	3.34	38.34	37	35.6	0.50	0.07	23.02
طیس	1084-1.L01	18.38	6.48	24.86	125	40.5	0.65	0.05	19.01
طیس	1089-1.T01	18.40	5.26	23.66	115	42.8	0.66	0.05	19.70
گیلاف	1176-5.L025	39.24	4.52	43.76	46	23.0	0.57	0.10	12.98
گیلاف	1176-S.T02	37.86	4.28	42.14	43	25.0	0.63	0.08	12.34
رودسر	1355.L02	30.02	7.6	37.62	20	23.2	0.57	0.10	13.20
رودسر	1355.T02	27.24	10.66	37.90	17	22.2	0.67	0.09	9.75
زنجیران	1502-9.L02	5.78	4.58	10.36	71	53.7	0.43	0.06	38.20
زنجیران	1502-9.T02	5.68	4.66	10.34	79	51.2	0.51	0.05	32.23



«ب»



«الف»

شکل (۲) تغییرات حداکثر سرعت و حداکثر تغییر مکان زمین بر حسب حداکثر شتاب.

جدول (۲) میانگین مقادیر پارامترهای زلزله برای انواع خاک.

میانگین TT	میانگین T	میانگین M _g	میانگین ED	میانگین PGA	نوع خاک
5.51	18.46	4.78	36.84	154.41	I
6.04	20.27	4.81	26.36	214.39	II
10.26	22.37	4.36	24.60	119.80	III
18.31	34.55	6.44	65.91	98.18	IV

این نتایج را ارائه نموده اند.

آنچه در این بررسی بدست آمده و در شکل (۴) مشاهده می شود افزایش $1/656$ ثانیه را به ازای هر 10 کیلومتر دور شدن از مرکز زلزله نشان می دهد. اما نتیجه ای که پیچ و همکاران (Page et al, 1972) و همچنین چانگ و کرنیسکی (Chang and Krinitzsky, 1977) بدست آورده اند کاملاً متفاوت است بطوریکه این محققین کاهش در زمان دوام را در اثر افزایش تا مرکز زلزله عنوان کرده اند. البته باید به تعریف زمان دوامی که پیچ و همکاران بکار برده اند توجه داشت، در این تعریف زمان دوام بصورت «مدت دوام برابر» است اما زمان دوام تریفناک - برادی منطبق بر تعریف «زمان دوام معنی دار» می باشد. هر چه فاصله تا مرکز زلزله بیشتر شود شتاب های اوج کوچکتر شده و زمان دوام کوتاهتری انتظار می رود. اما در تعریف زمان دوام با توجه به شدت شتابنگاشت، میزان مشارکت نسبی شتاب در نظر گرفته می شود. بنابراین یک حرکت شدید در یک زمان کوتاه، زمان دوام کوچک تری را نسبت به یک حرکت با شدت کمتر در زمان طولانی تر ارائه می کند. با توجه به آنچه هاوژنر توصیه می کند در فواصل دورتر ازگسل زمان دوام حرکات شدید طولانی تر است اما نسبت به نقاط نزدیک به گسل شدت حرکات کمتر می باشد.

تغییرات مدت دوام بر حسب بیشینه شتاب زمین در شکل (۵) نشان داده شده است. بطور کلی همبستگی خوبی بین اطلاعات در این مورد مشاهده می شود بطوریکه خاک های نوع I و IV منحنی های توانی و خاک های نوع II و III منحنی های نمایی را بصورت بهترین منحنی می پذیرد. در این مورد نیز با توجه به تعداد کم اطلاعات در مورد خاک نوع III و همبستگی کم اطلاعات در مورد خاک نوع II، می توان فرض نمود که منحنی توانی بصورت بهتری تغییرات مدت دوام را براساس بیشینه شتاب بیان می نماید. اطلاعات مربوط به خاک نوع III و IV شتاب های بزرگ را شامل نمی شود و در نتیجه منحنی های این دو نوع خاک دارای شیب بیشتری می باشند.

به منظور تعیین رابطه ای بین زمان دوام حرکات شدید با زمان ثبت رکوردهای شتابنگاشت، نمودار تغییرات زمان دوام TT برحسب زمان ثبت T در شکل (۶) رسم شده و رابطه زیر توسط نگارندگان پیشنهاد شده است.

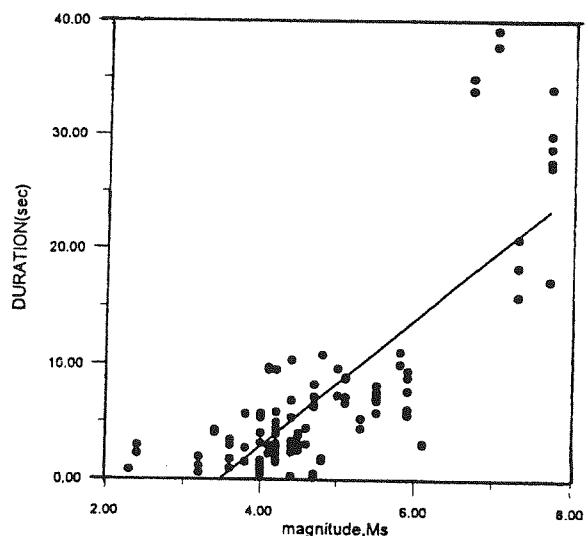
$$TT = 0.388 T \quad (3)$$

مشاهده می گردد که مدت دوام یا مدت زمان حرکات شدید حدود $0/4$ کل مدت ثبت شتابنگاشت ها می باشد، بنابراین

در این جدول PGA بیشینه شتاب برحسب گال، ED، فاصله تا مرکز زمین لرزه برحسب کیلومتر، M_p بزرگا در مقیاس امواج سطحی، T مدت ثبت شتابنگاشت و TT مدت دوام حرکات شدید زلزله برحسب ثانیه است. همانطور که از جدول (۲) مشاهده می شود در خاک های سست زمان دوام حرکات شدید بیشتر از خاک های سخت است و این نسبت افزایش، سریعتر از افزایش مدت ثبت شتابنگاشت می باشد. زلزله هایی که در خاک سخت ثبت شده اند عمدتاً دارای بزرگای کمتر بوده و حداکثر شتاب زمین در آنها بزرگتر است.

شکل (۳) نمودار تغییرات زمان دوام برحسب M_p را مشخص می سازد. بهترین خط برازش شونده به اطلاعات مذکور که توسط نگارندگان پیشنهاد شده بصورت زیر است:

$$TT = 5.548 M_p - 19.327 \quad (2)$$

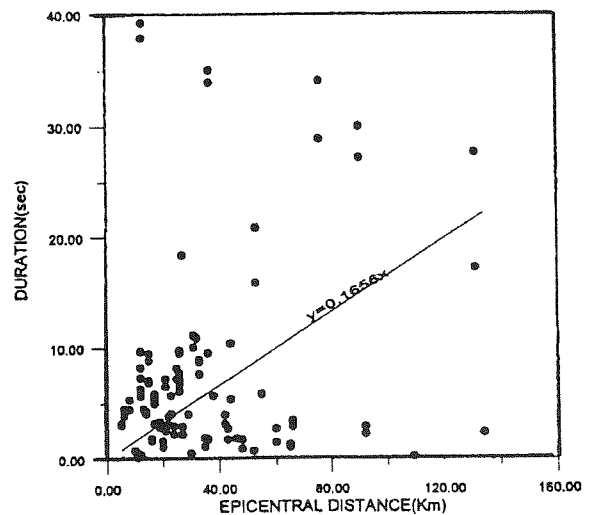


شکل (۳) نمودار تغییرات مدت دوام زلزله برحسب M_p برای تمام رکوردها.

شکل (۴) نمودار تغییرات زمان دوام مؤثر برحسب فاصله تا مرکز زلزله را نشان می دهد و نقاط مشخص شده در شکل مربوط به 106 رکورد مورد بررسی و بدون توجه به نوع خاک می باشد. $TT = 0.1656 R$ برای این اطلاعات بطور مناسبی برازش می شود.

مطالعات محققان مختلف در این زمینه ها حاکی از وجود تفاوت میان نتایج حاصل است. تریفناک و برادی (Trifunac and Brady, 1975) به این نتیجه رسیده اند که با افزایش هر 10 کیلومتر در فاصله تا مرکز زلزله، زمان دوام 1 تا $1/5$ ثانیه افزایش می یابد. هراندز و کتان (2000) نیز افزایش مدت دوام را با افزایش فاصله تا مرکز زلزله بصورت نمودارهایی نشان داده و رینسو و همکاران (2000) نیز مشابه

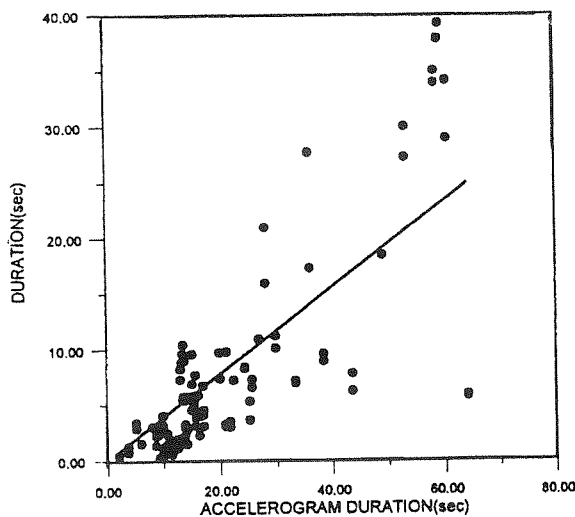
توصیه می شود هنگام استفاده از بند پ - ۲ - ۵ - ۱ - آیین نامه ۲۸۰۰ در رابطه فوق از شتابنگاشت هایی که مدت زمان حرکات شدید آنها بیشتر از ۱۰ ثانیه است، زلزله هایی در نظر گرفته شود که مدت کل ثبت شتابنگاشت آنها بیشتر از حدود ۲۵ ثانیه باشد. از ۱۰۶ رکورد در نظر گرفته شده در این مقاله، از ۲۰ مورد آن می توان در طراحی دینامیکی استفاده نمود که بترتیب ۵ رکورد آن مربوط به خاک نوع I، ۷ رکورد مربوط به خاک نوع II، ۲ مورد مربوط به خاک نوع III و ۶ مورد مربوط به خاک نوع IV است.



شکل (۴) نمودار تغییرات مدت دوام برحسب فاصله تا مرکز زمین لرزه.

در ایران و با استفاده از روابط موجود، طیف دامنه فوریه و چگالی توان رکوردهای مورد بررسی بدست آمده اند. ابتدا برای هر شتابنگاشت طیف دامنه فوریه برای کل مدت ثبت شتابنگاشت بدست آمده است، سپس با استفاده از این طیف چگالی طیفی توان زلزله ها $G(\omega)$ بدست آمده اند.

در تعیین فرکانس نیکویست (ω_p) یعنی حداکثر فرکانسی که در یک ارتعاش مورد بررسی قرار می گیرد از نمودار طیف فوریه استفاده می شود. مقدار فرکانس نیکویست که در حقیقت حد بالای انتگرال گیری از $G(\omega)$ است، تأثیر عمده ای روی مقادیر گشتاورهای طیفی و در نتیجه مقادیر جذر میانگین مربع شتاب \sqrt{a} ، فرکانس مرکزی ω_p و ضریب شکل δ دارد. به منظور تعیین فرکانس نیکویست برای هر شتابنگاشت، ابتدا طیف دامنه فوریه برای شتابنگاشت مورد نظر ترسیم می شود. این طیف متناوب بوده و بعد از یک فرکانس معین مجدداً دامنه طیف بصورت متقارن تکرار می گردد. مقدار فرکانس بدست آمده از برنامه کامپیوتری بعنوان فرکانس نیکویست در نظر گرفته می شود.



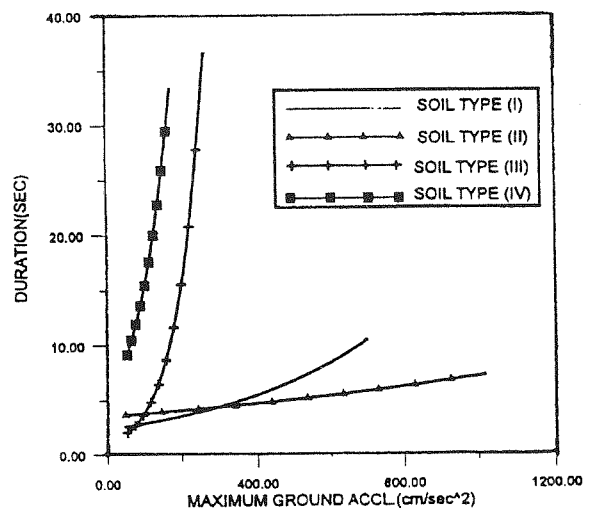
شکل (۶) نمودار رابطه میان مدت دوام حرکات شدید برحسب مدت ثبت شتابنگاشت.

۱.۵ تعیین پارامترهای مدل کانای - تاجیمی

کانای [۷] و تاجیمی [۱۳] مدل ریاضی ای بصورت رابطه زیر را برای چگالی طیفی توان صاف شده زلزله ها پیشنهاد کرده اند.

$$G(\omega) = \frac{1 + 4 \xi (\omega/\omega_g)^2}{[1 - (\omega/\omega_g)^2]^2 + (2\xi_g \omega/\omega_g)^2} G_0 \quad (4)$$

این مدل بطور گسترده ای در مهندسی زلزله مورد استفاده قرار می گیرد. در این تحقیق با تهیه یک برنامه کامپیوتری



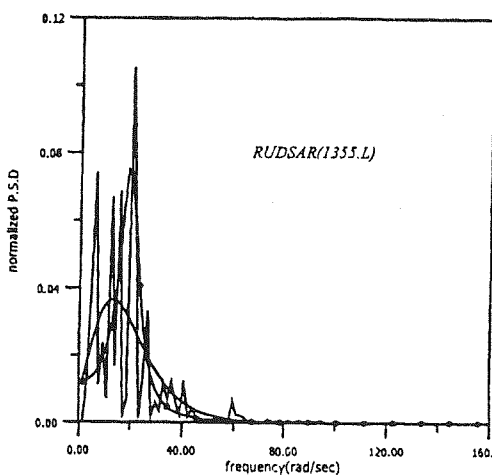
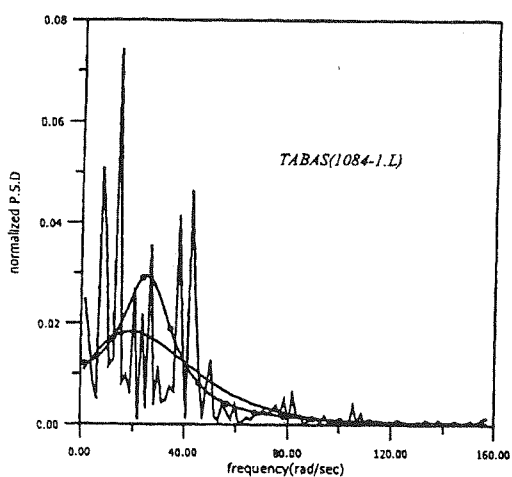
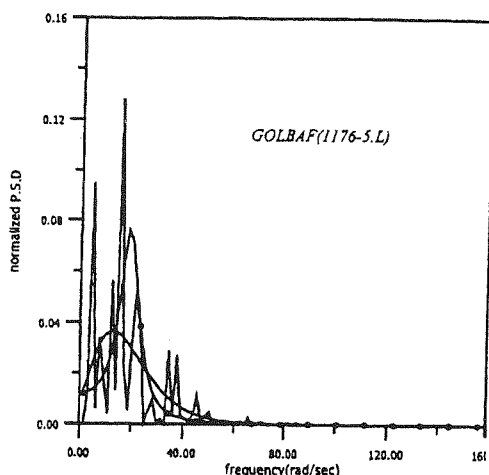
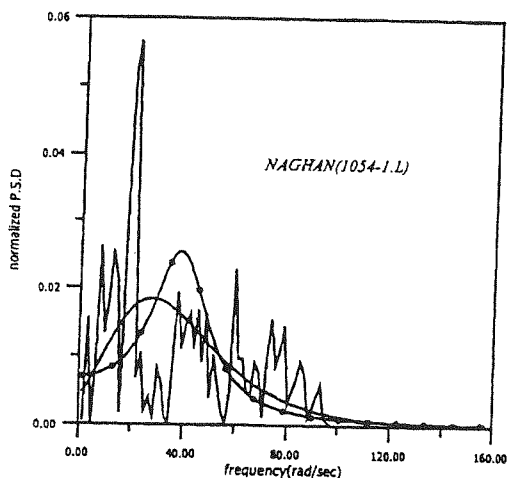
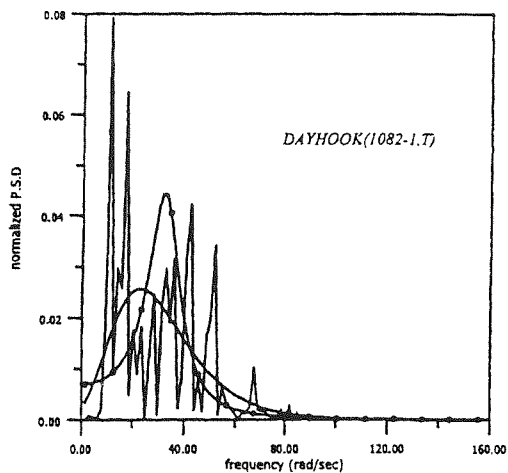
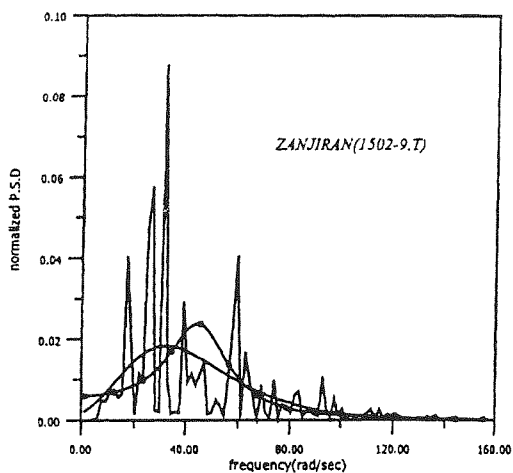
شکل (۵) نمودار تغییرات مدت دوام برحسب بیشینه شتاب برای خاله های مختلف.

۵- تغییرات چگالی طیفی توان

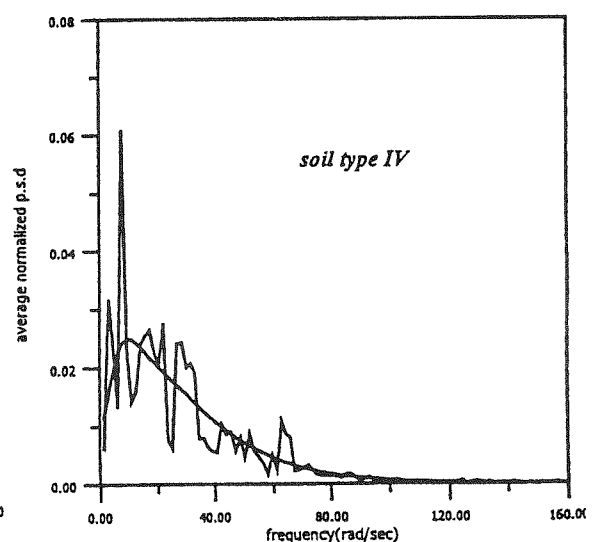
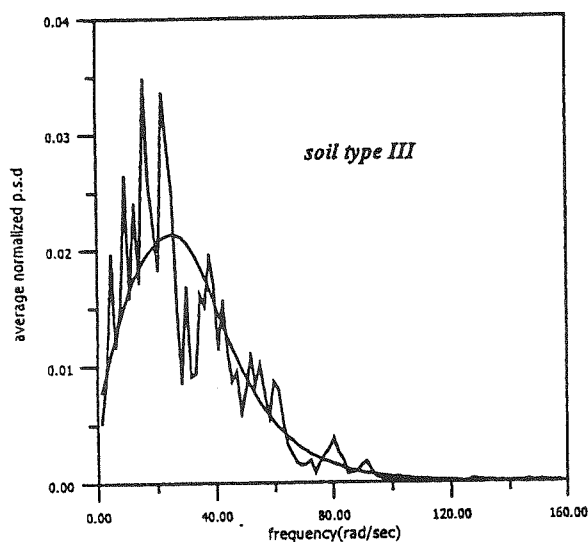
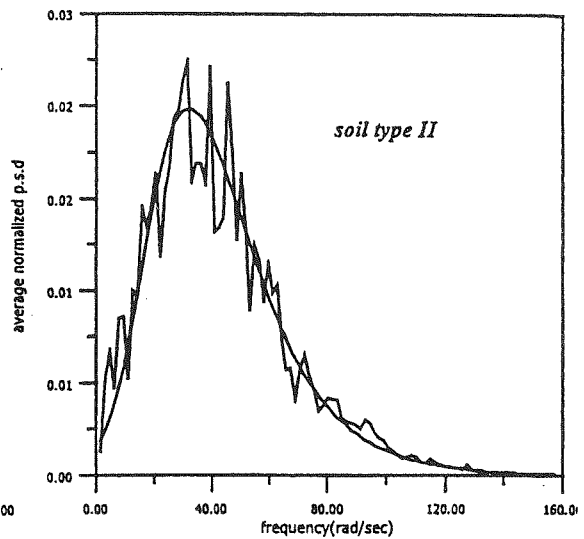
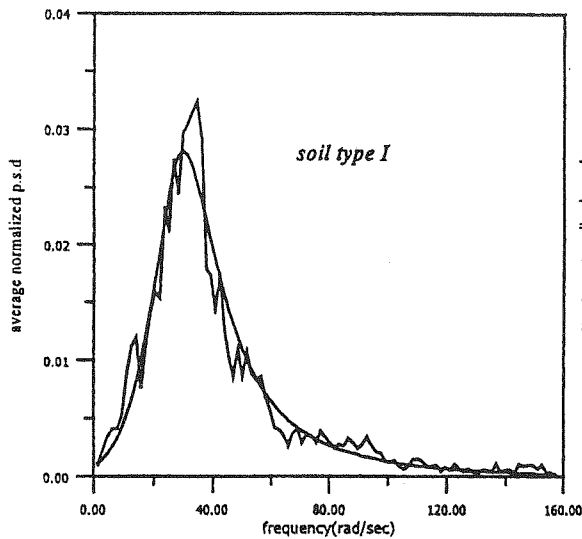
به منظور بررسی محتوای فرکانسی زلزله های ثبت شده

مقادیر پارامترهای کانای تاجیمی محاسبه شده است. در شکل (۷) نمودارهای چگالی طیفی توان نرمالیزه شده شش زمین لرزه ایران همراه با نمودار تابع کانای - تاجیمی نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می شود این مدل هماهنگی خوبی با چگالی طیفی توان زلزله ها ندارد و بخصوص در فرکانس های بالا مقادیر را بزرگتر از چگالی توان واقعی برآورد می کند.

نمودار صاف شده با علامت (■) مربوط به مدل کانای - تاجیمی و نمودار بدون نشانه مربوط به مدل مقادیر حدی است.



شکل (۷) توابع چگالی طیفی توان برای شش رکورد زلزله چگالی توان صاف شده آنها.



شکل (۸) میانگین چگالی طیفی توان و چگالی طیفی توان صاف شده برای انواع مختلف خاک‌ها.

۲.۵- ارائه مدل مقادیر حدی

با توجه به شکل کلی چگالی طیفی توان زمین لرزه‌های مختلف ایران، ارائه مدل مناسب تری برای تعریف چگالی طیفی توان زلزله‌های ایران ضروری است. بدین منظور نظر به شباهت تابع چگالی طیفی توان نرمالیزه شده زلزله‌ها با تابع توزیع احتمال مقادیر حدی، نگارندگان مدل مناسبی را برای چگالی طیفی توان زلزله‌های ایران بصورت رابطه زیر پیشنهاد کرده‌اند [۲۳]:

$$G(\omega) = \alpha e^{-\alpha(\omega-\beta)} e^{-\alpha(\omega-\beta)} \quad (۵)$$

مقادیر میانگین و واریانس این تابع برابر است با

$$\mu = \beta + \frac{0.5772}{\alpha} \quad (۶)$$

$$\sigma^2 = \frac{1}{6} \frac{\pi^2}{\alpha^2} \quad (۷)$$

در این بررسی پارامترهای مدل مقادیر حدی برای زلزله‌های مختلف بدست آمده و نمودار این توزیع در حالات مختلف در شکل (۷) نشان داده شده است. با توجه به شکل، مشاهده می‌شود که مدل مقادیر حدی نسبت به مدل کانای - تاجیمی بطور مناسب تری خصوصیات چگالی طیفی توان را مشخص می‌سازد.

پارامترهای مدل مقادیر حدی برای ۱۰۶ زلزله مورد

بررسی محاسبه گردیده و سپس برای چهار دسته خاک مختلف، میانگین چگالی طیفی توان و میانگین پارامترهای مدل مقادیر حدی بدست آمد. در شکل (۸) طیف توان و طیف توان صاف شده میانگین برای چهار نوع خاک نشان داده شده است. همانطور که از حالات مختلف در شکل مشاهده می شود چگالی طیف توان صاف شده که از مدل مقادیر حدی بدست آمده است. مطابقت خوبی با طیف توان واقعی دارد. پارامترهای مدل مقادیر حدی α و β برای دوازده نمونه از شتابنگاشت های مورد بررسی در ستون های نهم و دهم جدول (۱) درج شده است.

۳-۵- تعیین میانگین مربع شتاب

با استفاده از چگالی طیفی توان زلزله ها می توان خصوصیات آماری آن را بدست آورد. یکی از این خصوصیات میانگین مربع شتاب زلزله ها است که معیار مناسبی برای سنجش میزان حرکات زلزله می باشد. در این تحقیق میانگین مربع شتاب با استفاده از چگالی طیفی توان محاسبه شده و در ستون ششم از جدول (۱) درج شده است.

۴-۵- تعیین فرکانس مرکزی

مقدار فرکانس مرکزی برای زلزله های ایران بین $11/23$ تا $100/24$ رادیان بر ثانیه برابر $1/79$ تا $15/95$ هرتز می باشد. در نتیجه پریود غالب زلزله های ایران بین $0/06$ تا $0/56$ ثانیه است. برای مطالعه اثر عوامل مختلف بر روی فرکانس مرکزی بررسی های زیر انجام شده و مقادیر فرکانس مرکزی برای تعدادی از شتابنگاشت های مورد بررسی در ستون هفتم از جدول (۱) آورده شده است.

۱-۴-۵- اثر نوع خاک

مقدار متوسط فرکانس مرکزی برای خاک های مختلف در جدول (۲) مشاهده می شود

جدول (۳) مقادیر فرکانس مرکزی برای انواع خاک محل ایستگاه.

نوع خاک	حد اقل ω_c (red/sec)	حداکثر ω_c (red/sec)	میانگین ω_c (red/sec)
خاک نوع I	26.22	100.24	46.0
خاک نوع II	28.09	89.45	47.33
خاک نوع III	22.97	49.25	36.49
خاک نوع IV	11.23	56.21	33.81
برای تمام خاکها	11.23	100.24	44.25

مقادیر جدول فوق نشان می دهد که با سخت تر شدن نوع خاک مقدار پریود غالب زلزله کاهش می یابد. در واقع در صورتیکه نوع خاک ساختگاه، سنگ و یا خاک سخت و متراکم باشد ساختمان های کوتاه تر آسیب بیشتری می بینند. میانگین پریود غالب زلزله های ایران مقدار $0/14$ ثانیه است. این مقدار در مقایسه با مقادیر بدست آمده برای دیگر مناطق مورد بررسی جهان، از جمله برای 161 رکورد مربوط به ایالات آمریکا که مقدار آن $0/21$ ثانیه بدست آمده است (محرز و الگادامسی ۱۹۸۹)، نشان می دهد که پریود غالب زلزله های ایران کوتاه تر است و با ساختمان های کوتاه پدیده تشدید را بوجود می آورد.

۲-۴-۵- اثر زمان دوام مؤثر

شکل (۹) ارتباط بین فرکانس مرکزی و زمان دوام مؤثر را نشان می دهد. در این نمودار نقاط مربوط به خاک های متفاوت با علامت های مختلف مشخص شده است. همانطور که مشاهده می شود با افزایش مدت دوام حرکات شدید، فرکانس مرکزی زلزله کاهش یافته است. البته این تغییرات آهسته بوده و تقریباً با افزایش هر 15 ثانیه به مدت دوام حرکات شدید زلزله، فرکانس مرکزی به میزان 6.2 rad/sec کاهش یافته است. بنابراین زمین لرزه هایی که در آنها مدت دوام حرکات شدید طولانی تر است بر ساختمان های بلند آسیب بیشتری وارد می سازد.

۳-۴-۵- اثر بزرگای زلزله

با افزایش بزرگای زلزله، فرکانس مرکزی کاهش می یابد. زلزله های در نظر گرفته شده در این بررسی دارای بزرگای متفاوت بین $2/3$ تا $7/7$ در مقیاس ریشتر است. در شکل (۱۰) رابطه بین بزرگای زلزله و فرکانس مرکزی نشان داده شده است. در این مقاله رابطه ای بصورت زیر برای برازش این نقاط توسط نگارندگان پیشنهاد شده است:

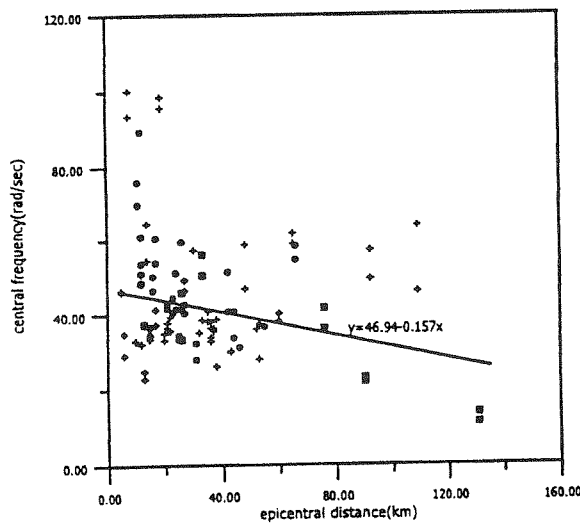
$$\omega_c = 66.9 - 4.962 m \quad (8)$$

در حقیقت با افزایش یک واحد در بزرگای زلزله، فرکانس مرکزی حدود 5 rad/sec کاهش یافته است. بنابراین هر چه بزرگای زلزله بیشتر باشد، ساختمان های بلند بیشتر تحت تأثیر قرار می گیرند. لای (Lai, 1982) این رابطه را بصورت $\omega_c = 70.15 - 7.5m$ ارائه کرده است. مقایسه این دو رابطه نشان می دهد که در شتابنگاشت هایی که لای مورد بررسی قرار داده است اثر بزرگای فرکانس مرکزی بیشتر است.

از مرکز زلزله ثبت شده اند. همانطور که از شکل (۱۱) مشخص است فاصله تا مرکز زلزله اثر چندانی بر فرکانس غالب ندارد. شتابنگاشت های بررسی شده در فاصله ای بین ۵ تا ۱۳۴ کیلومتر از مرکز زلزله ثبت شده اند و مقدار فرکانس مرکزی برای این زلزله ها تفاوت کمی با هم دارند. نگارندگان رابطه خطی زیر را برای این تغییرات پیشنهاد کرده اند.

$$\omega_c = 46.944 - 0.157 R \quad (9)$$

لای (1982) رابطه $\omega_c = 32.15 - 0.09 R$ را مطرح نموده است. براساس این رابطه هم مقادیر فرکانس مرکزی وهم تغییرات آن نسبت به R مقادیر کمتری از مقادیر مربوط به زلزله های ایران را ارائه می نماید.



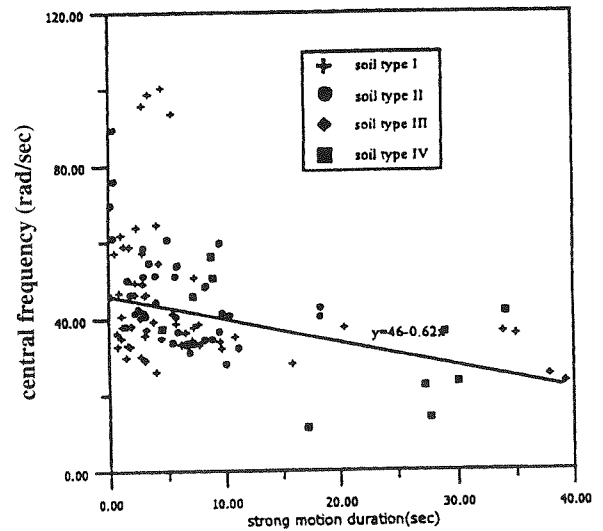
شکل (۱۱) نمودار تغییرات فرکانس مرکزی برحسب فاصله تا مرکز زلزله.

۴-۵-۵- اثرات حداکثر شتاب زمین لرزه

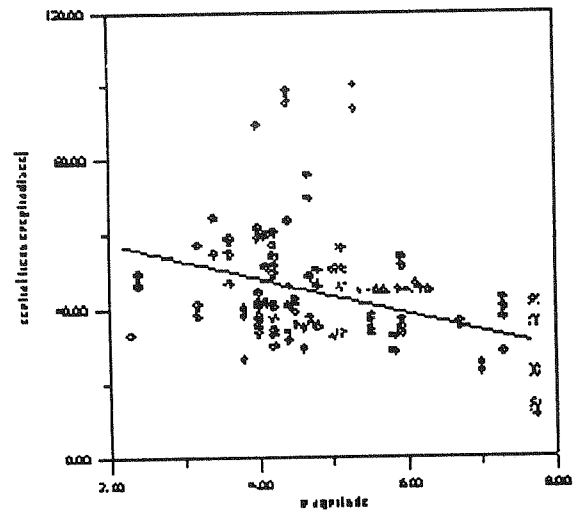
در این بررسی از رکوردهایی استفاده شده است که شتاب اوج زمین (PGA) در آنها بزرگتر از ۵۰ گال بوده و حداکثر شتاب اوج این رکوردها ۱۰۱۸ گال است. با بررسی نمودار تغییرات فرکانس مرکزی برحسب حداکثر شتاب زمین مشاهده می گردد که هیچ نوع وابستگی مشخص بین این دو کمیت نمی توان بدست آورد.

۵-۵-۵- ضریب شکل

کمیت دیگری که در این مقاله مورد بررسی قرار گرفته است ضریب شکل بوده که برای هر یک از رکوردها براساس تعریفی که برای ضریب شکل می شود مقادیر آنها بدست آمده و در ستون هشتم از جدول (۱) آورده شده است. ضریب



شکل (۹) نمودار تغییرات فرکانس مرکزی نسبت به زمان دوام حرکات شدید زلزله.



شکل (۱۰) نمودار تغییرات فرکانس مرکزی نسبت به بزرگای زلزله.

۴-۵-۴- اثر فاصله تا مرکز زلزله

شتابنگاشت های مورد بررسی، در فواصل مختلف

جدول (۴) مقادیر ضریب شکل برای انواع خاک محل ایستگاه.

نوع خاک	حداقل δ	حداکثر δ	میانگین δ
خاک نوع I	0.20	0.60	0.39
خاک نوع II	0.26	0.66	0.43
خاک نوع III	0.31	0.64	0.53
خاک نوع IV	0.46	0.67	0.55
برای تمام خاکها	0.20	0.67	0.44

۳- زمان دوام حرکات شدید کسر کوچکی (حدود ۳۰ تا ۵۰٪) از کل زمان ثبت حرکات توسط شتابنگاشت است ولی پیشنهاد می شود برای تحلیل رفتار سازه در زمان زلزله باید از تعریفی دقیق تر که براساس انرژی شتابنگاشت استوار است، استفاده شود.

۴- با افزایش بزرگای زلزله به میزان ۱ واحد، مدت دوام حرکات شدید حدود ۵/۶ ثانیه افزایش می یابد.

۵- مدل توزیع مقادیر حدی، تابع مناسبی برای توصیف چگالی توان نرمالیزه شده زلزله های ایران است.

۶- میانگین پریود غالب زلزله های ایران ۱۴/۰ ثانیه است که در مقایسه با نتایج بدست آمده از زلزله های مناطق دیگر مشاهده می گردد که پریود غالب زلزله های ایران کمی کمتر است.

۷- هر چه مدت دوام حرکات شدید یک زلزله بزرگتر باشد، فرکانس مرکزی آن کمتر خواهد بود. در واقع چنین زلزله هایی روی ساختمان های بلند با پریود بزرگتر بیشتر از ساختمان های کوتاه، تأثیر خواهند داشت.

۸- برای خاک های سخت پریود غالب کمتر از مقدار آن در خاک های سست می باشد.

۹- با افزایش بزرگای زلزله پریود غالب آن افزایش می یابد.

۱۰- هر چه فاصله ساختگاه مورد نظر تا مرکز زلزله بیشتر باشد، فرکانس مرکزی زلزله کاهش بیشتری خواهد داشت.

۱۱- با سخت تر شدن نوع خاک ضریب شکل شتابنگاشت کاهش می یابد یعنی فرکانس ها نزدیک به فرکانس مرکزی مشارکت عمده ای در پاسخ داشته و مشارکت فرکانس های بالاتر سریعاً کاهش یافته و برای خاک های سست چگالی طیفی توان به چگالی توان طیف سفید نزدیک می شود.

۱۲- برای تمام انواع خاک ها، پریودهای بزرگتر از ۰/۰۶ ثانیه، ۹۰٪ مشارکت را در طیف توان داشته است و پریودهای کمتر از این مقدار اثر چندانی بر طیف ندارند.

شکل نشان دهنده پراکندگی فرکانس های تحریک نسبت به فرکانس مرکزی است. ضرایب شکل بدست آمده برای ۱۰۶ رکورد مورد بررسی بین ۰/۲۰ تا ۰/۶۷ قرار دارد. در جدول (۴) مقادیر حداکثر، حداقل و میانگین δ برای انواع خاک ها مشخص شده است.

همانطور که مشاهده می شود مقادیر ضریب شکل با سخت تر شدن خاک کاهش می یابد. برای سنگ و خاک سخت، ارتعاش زمین مقادیر فرکانس های محدودی را شامل می شود، به همین دلیل محتوای فرکانس باند باریک بوده و در حول فرکانس مرکزی تمرکز دارد. اما برای خاک های سست مقدار δ بزرگ بوده و ارتعاش زمین فرکانس های زیادی را شامل می شود و فرایند تقریباً بصورت باند پهن است. با توجه به رابطه ارائه شده در (VanMarcke 1986) می توان نتیجه گرفت که در خاک های نوع I فرکانس های کوچک تر از $\omega = 2.24\omega_0$ ، $\omega = 90\%$ در انرژی ورودی به سیستم مشارکت دارند. اما برای خاک نوع IV این فرکانس به $\omega = 2.75\omega_0$ محدود می شود که در صورت استفاده از مقادیر $\omega_0 = 102.9$ و $\omega = 92.9 \text{ rad sec}$ و یا $T = 0.061$ برای خاک های نوع I و IV خواهند بود. بنابراین ارتعاشات با زمان تناوب کوتاه عملاً تأثیر عمده ای بر سازه هایی که روی خاک نوع I قرار گرفته اند، ندارد.

نتیجه گیری

- ۱- در رکوردهایی که مدت زمان کل ثبت زمین لرزه بزرگ است، حداکثر شتاب ثبت شده زمین نیز بزرگ می باشد.
- ۲- در اغلب حالات با افزایش شتاب زلزله، سرعت نیز افزایش می یابد اما این امر با حداکثر تغییر مکان زمین ارتباط چندانی ندارد.

مراجع

[1] Atkinson, G.M, Silva W., (2000), "Stochastic Modeling of California Ground Motion",

seismological society of America, Vol. 90, No2.
[2] Bolt, B.A. (1969) "Duration of Strong Motion",

- Proc. 4th World Conf. Earthq Eng., 1304-1315, Santiago, Chile.
- [3] Bommer, J.J., Martinez Pereira, A.(1999) "The Effective Duration of Earthquake Strong Motion", Journal of earthquake Engineering 3, 127-172.
- [4] Chang, F.K and Krinitzsky, E.L. (1977) "Duration, Spectral Content and Predominant Period of Strong Motion Earthquake Records from Western United States", U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station, Miscellaneous Paper 5-73-1, Vicksburg, Ms.
- [5] Donovan, N.C (1973), "Earthquake Hazards for Buildings", Building Practices for Disaster Mitigation, NBS, U.S. Department of Commerce, Building Research Services, 46,82-111.
- [6] Hernandez B., cotton, F., (2000), "Empirical Determination of the Ground Shaking Duration Due to an Earthquake Using Strong Motion Accelerograms for Engineering Applications", preceding 12 WCEE, paper No 2254.
- [7] Kanai, K., (1957), "Semi-Imperial Formula for the Seismic Characteristics of the Ground", Bull. Earthq. Research Inst. 35, University of Tokyo.
- [8] Lai, S.P. (1982). "Statistical Characterization of Strong Motions Using Power Spectral Density Function", Bull. Seism. Soc. Am. 72,259-274.
- [9] Mohraz, B. and Elghadamsi, F.E. (1989), "Earthquake Ground Motion and Response Spectra", Seismic Design Handbook., Eds F.Naeim.
- [10] Page, R.A., Boore, D.M., Joyner, W.B., Caulter, H.W. (1972), "Ground Motion Values for use in the Seismic Design of the Trans-Alaska Pipeline System, USGS Circular 672.
- [11] Papazachos, B.C., papaiannou, CH.A., Margars, VN. and Theodulidis, N.P. (1992) "Seismic hazard Assessment in Greece Based on Strong Motion Duration", proceeding 10 WCEE Vol 2, pp 425-430.
- [12] Reinoso, E., Ordaz, M., Guerrero, R.(2000), "Influence of Strong Motion Duration in Seismic Design of Structures", proceeding 12 WCEE, paper No 1151.
- [13] Tajimi, H.,(1960), "A Statistical Method of Determining the Maximum Response of a Building Structure During an Earthquake", Proc 2nd world Conf. Earthq. Eng. Vol II, 781-797, Tokyo.
- [14] Tehranizadeh, M., Hamed, F. (1999), "Effect of Earthquake Source Parameters on Iran's Earthquakes Duration", Proceeding of 9th International Conference on Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 9-12 Aug, Bergen, Norway.
- [15] Tehranizadeh, M., Hamed, F.(2000), "Influence of Effective Duration of Strong Motion on Elastic Response Spectra", Proceeding of 12 WCEE, paper No 1234.
- [16] Tehranizadeh, M., Hamed, F.(2001), "Influence of Earthquake Source Parameters and Damping on Elastic Response Spectra", Proceeding 4th International Conference on Recent Advances in Geotechnical Earthquake Engineering and soil Dynamics, san Diego, CA, March 26-31.
- [17] Trifunac, M.D. and Brady, A.G. (1975), "A Study of the Duration of Strong Earthquake Ground Motion", Bull. Seism.soc. Am, 65, 581-656.
- [18] Trifunac, M.D. Novikova, E.I., (1995), "Duration of Earthquake fault motion in California", Earthquake Eng and structural Dynamics, 24 (6) 781-799.
- [19] Vanmarcke, E.H.(1986), "Structural Response to Earthquakes", Seismic Risk and Engineering Decision, Eds. C.Lomnitz and E.Rosenblueth, Elsevier Amsterdam.
- [۲۰] «آیین نامه طرح ساختمان ها در برابر زلزله - ویرایش دوم ۱۳۷۶»، مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن نشریه شماره ۲۵۳.
- [۲۱] «تهرانی زاده، محسن و حامدی، فرزانه (۱۳۷۸)، تعیین مدت دوام زلزله های ایران و ارتباط آن با پارامترهای مختلف، سومین کنفرانس بین المللی زلزله شناسی و مهندسی زلزله، تهران، اردیبهشت ۱۳۷۸.
- [۲۲] «تهرانی زاده، محسن و حامدی، فرزانه (۱۳۷۸)، «بررسی اثر نوع خاک، مدت دوام و بزرگی زمین لرزه بر طیف پاسخ»، مجموعه مقالات اولین کنفرانس علمی - تخصصی مهندسی راه و ساختمان ایران، تهران، مهر ماه ۱۳۷۸.
- [۲۳] «تهرانی زاده، محسن و حامدی، فرزانه (۱۳۷۹)، «چگالی طیفی توان و محتوای فرکانسی زلزله های ایر ان»، مجموعه مقالات چهارمین کنفرانس بین المللی مهندسی عمران» اردیبهشت ۱۳۷۹، مشهد.
- [۲۴] «حامدی، فرزانه (۱۳۸۰)، «بررسی شتابنگاشت های زلزله های ایران جهت تعیین طیف طراحی» پایان نامه دوره دکتری عمران، استاد راهنما دکتر محسن تهرانی زاده، دانشکده عمران، دانشگاه صنعتی امیرکبیر.
- [۲۵] «دانشجو، فرهاد، (۱۳۷۸) «مبانی مهندسی زلزله و آنالیزریسک»، انتشارات دانش فردا.
- [۲۶] «رمضی، حمید رضا، (۱۳۷۶)، «داده های پایه شتابنگاشت های شبکه شتابنگاری کشور»، مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن نشریه شماره ۲۵۶.