

## طیف‌های طرح برای ساختگاه‌های سنگی ایران با ملاحظات بزرگی و فاصله و مقایسه با طیف‌های حاصل از تحقیقات منطقه‌ای

حمیدرضا جوان‌امروز<sup>۱\*</sup>، مرتضی اسکندری قادی<sup>۲</sup> و نوربخش میرزائی<sup>۳</sup>

<sup>۱</sup> دانشجوی دکتری زلزله‌شناسی، گروه فیزیک زمین، مؤسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران، ایران

<sup>۲</sup> دانشیار، دانشکده مهندسی عمران، پردیس دانشکده‌های فنی دانشگاه تهران، ایران

<sup>۳</sup> دانشیار، گروه فیزیک زمین، مؤسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران، ایران

(دریافت: ۹۱/۱۱/۱۱، پذیرش نهایی: ۹۳/۲/۳۰)

### چکیده

از آنجا که روش دقیقی برای پیش‌بینی جنبش‌های زلزله‌های آینده در یک منطقه وجود ندارد، منطقی است که از طیف‌های تابع‌های جابه‌جایی، سرعت و شتاب برای برآورد بیشینه مقادیر نیروهای طراحی استفاده شود. در این تحقیق، طیف‌های پاسخ و طرح شتاب برای ساختگاه‌های سنگی در ایران به‌دست می‌آید. بدین‌منظور، داده‌های شتاب‌نگاری ایستگاه‌های مستقر بر ساختگاه‌های سنگی گردآوری، تصحیح خط مبنا و فیلتر شده و با کنترل طیف فوریه هر یک از نگاشت‌ها، صحت حذف نوفه کنترل می‌شود. به‌این‌ترتیب ۱۰۳ نگاشت قائم و ۱۰۹ نگاشت افقی قابل‌قبول فراهم شده است. برای در نظر گرفتن اثر فاصله و بزرگی، داده‌های حاصل برحسب فاصله‌های گوناگون ایستگاه‌ها از رومرکز زمین‌لرزه‌ها، به دسته‌های با فاصله نزدیک (۰-۳۵ km)، فاصله متوسط (۳۵-۶۵ km) و فاصله دور (۶۵-۱۰۰ km) و بزرگی زمین‌لرزه‌ها به بازه‌های با بزرگی کوچک (۵/۵-۴/۵)، متوسط (۵/۵-۶/۵) و بزرگ (۶/۵-۷/۵) تقسیم شده‌اند.

با به‌دست آوردن شتاب طیفی داده‌ها و مقیاس‌کردن آنها به اوج شتاب زمین مربوط به خود، طیف پاسخ در میرایی ۵٪ برای هر یک از نگاشت‌ها، به‌دست می‌آید. با توجه به بازه‌های فاصله و بزرگی مورد اشاره، از طیف‌های پاسخ، میانگین‌گیری می‌شود و پس از هموارسازی، طیف‌های میانگین و میانگین به‌علاوه انحراف معیار شتاب افقی و قائم هموار شده برای میرایی ۵٪ رسم می‌شوند. به‌منظور مقایسه، طیف طرح برای شرایط مشابه با استفاده از روابط تضعیف آمبرسیز و همکاران (۲۰۰۵) تهیه می‌شود. مقایسه طیف‌های حاصل از این تحقیق و تحقیقات منطقه‌ای آمبرسیز نشان می‌دهد که همبستگی به‌نسبت خوبی بین طیف‌ها، در دوره‌های بزرگ‌تر از حدود ۰/۱۹ ثانیه و همبستگی ضعیف در دوره‌های کمتر از آن وجود دارد.

واژه‌های کلیدی: اوج شتاب زمین، میرایی، شتاب طیفی، طیف پاسخ، طیف طرح

## Magnitude and distance dependent design spectra for rock sites based on Iranian acceleration time-histories and comparison with regional design spectra

Javan-emrooz, H. R.<sup>1</sup>, Eskandari Ghadi, M.<sup>2</sup> and Mirzaei, N.<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Ph.D. Student of Seismology, Department of Earth Physics, Institute of Geophysics, University of Tehran, Iran

<sup>2</sup>Associate Professor, School of Civil Engineering, College of Engineering, University of Tehran, Iran

<sup>3</sup>Associate Professor, Department of Earth Physics, Institute of Geophysics, University of Tehran, Iran

(Received: 30 Jan 2013, Accepted: 20 May 2014)

### Summary

Ground vibrations during an earthquake can severely damage structures and equipments housed in them. Many factors including earthquake magnitude, distance from the fault or epicenter, duration of strong shaking, soil condition of the site, and the frequency content of the motion define the properties of ground motion and its amplification. A deep understanding of the effects of these factors on the response of structures and equipments

is essential for a safe and economical design. Some of these effects such as the amplitude of the motion, frequency content, and local soil conditions are best represented through a response spectrum, which describes the maximum response of a damped single-degree-of-freedom (SDOF) oscillator with various frequencies or periods to ground motion.

Earthquake ground motion is usually measured by strong motion instruments, which record the acceleration of the ground. The recorded accelerograms, after corrections for instrument errors and baseline, are integrated to obtain the velocity and displacement time-histories.

The maximum response of a SDOF system excited at its base by a time acceleration function is expressed in terms of only three parameters: (1) the natural frequency of the system, (2) the amount of damping, and (3) the acceleration time-history of the ground motion. Response spectrum analysis is the dominant contemporary method for dynamic analysis of building structures under seismic loading. The main reasons for the widespread use of this method are: its relative simplicity, its inherent conservatism, and its applicability to elastic analysis of complex systems. Since the detailed characteristics of future earthquakes are not known, the majority of earthquake design spectra are obtained by weighted averaging of a set of response spectra from records with similar characteristics such as soil condition, epicentral distance, magnitude and source mechanism.

The design spectrum specifies the design seismic acceleration, velocity or displacement at a given frequency or period if it is derived from ground acceleration, velocity or displacement time histories. For practical applications, design spectra are presented as smooth curves or straight lines. Smoothing is carried out to eliminate the peaks and valleys in the response spectra that are not desirable for design because of the difficulties encountered in determining the exact frequencies and mode shapes of structures during severe earthquakes when the structural behavior is most likely nonlinear. Since the peak ground acceleration, velocity, and displacement for various earthquake records are different, the computed response cannot be averaged on an absolute basis. Thus, normalization is needed to make a standard basis for averaging. Various procedures are used to normalize the response spectra before averaging is carried out. Among these procedures, one has been the most commonly used, which is normalization with respect to peak ground motion to make the same peak ground motion for all ground motion time histories.

Building codes commonly present design spectra in terms of acceleration amplification as a function of period on an arithmetic scale. In this study, the data from Accelerographic network stations are deployed on rock sites of Iran with shear wave velocity larger than 750 m/s, which is equivalent to site Type I in the Iranian seismic building code. The Seismosignal software is used to do both baseline correction and filtering for all the dominant horizontal and vertical components to reduce the inherent error of the motion. Among all the ground motions, only 103 vertical and 109 dominant horizontal time histories are accepted after baseline correction and filtering. The data are classified considering different combinations of the range of magnitude and distance. The epicentral distance is classified as near field (0-35 km), medium distance (35-65 km) and far field (65-100 km), while the earthquake magnitude is classified as small earthquake ( $4.5 < M < 5.5$ ), medium earthquake ( $5.5 < M < 6.5$ ) and large earthquake ( $6.5 < M < 7.5$ ), after which the vertical and the horizontal response spectra are prepared for each time history for %5 damping ratio. Obviously, the result can be generalized to other damping ratios. By averaging the response spectra is obtained an unsmoothed design spectra. A smoothed design spectra is plotted by averaging of acceleration amplification spectra for each frequency. This procedure is repeated for an average plus one standard deviation of both

vertical and horizontal response spectra.

Eventually, the smoothed design spectra determined in this study are compared with that of the regional attenuation relationships obtained based on the data from Europe and the Middle East (Ambraseys et al., 2005). The comparisons show relatively good correlation between the spectrum obtained in this study and the regional attenuation relationships for periods greater than about 0.19s and weak correlation for periods of less than it.

**Keywords:** Peak ground acceleration, Time history, Damping, Response spectra, Design spectra

## ۱ مقدمه

گرفته است، طیف‌ها را می‌توان با استفاده از سه روش متفاوت تهیه کرد:

۱- استفاده از شتاب‌نگاشت‌ها، که از آن جمله می‌توان به طیف‌هایی که هاووزنر (۱۹۷۳) و سید و همکاران (۱۹۷۶) عرضه کرده‌اند، اشاره کرد. قابل ذکر است که اولین طیف‌ها (هاووزنر، ۱۹۵۹) با استفاده از همین روش رسم شده و آئین‌نامه‌های ساختمانی نیز برای رسم طیف‌های بازتاب به‌همین ترتیب عمل کرده‌اند. بهترین توصیف تکان نیرومند زمین ناشی از زمین‌لرزه و عرضه طیف طراحی، بر پایه شتاب‌نگاشت‌ها به‌دست می‌آید. داده‌های تکان نیرومند زمین به‌دست آمده از شتاب‌نگاشت‌ها برای بهینه‌سازی در طراحی سازه‌های مقاوم در برابر زلزله و کاهش خسارات جانی و مالی در برابر زمین‌لرزه‌های آینده دارای اهمیت بسیار زیادی هستند. این داده‌ها، به‌منظور بررسی عملکرد سازه‌ها در برابر زمین‌لرزه و شرایط ساختگاه، جزء داده‌های اولیه برای زلزله‌شناسان و مهندسان زلزله محسوب می‌شوند. به علت نامشخص بودن جزئیات و ویژگی‌های زمین‌لرزه‌های آینده، در ارزیابی پاسخ سازه‌ها در برابر زمین‌لرزه، باید از پاسخ چندین زلزلهٔ محتمل استفاده شود. بنابراین، اگر پاسخ به ثبت‌های واقعی زلزله‌ها ملاک و اساس طراحی باشد، باید تحلیلی با استفاده از شتاب‌نگاشت‌های متعدد که نمایانگر حرکات بحرانی زمین هستند، صورت گیرد. هرچه از تعداد بیشتری شتاب‌نگاشت با ویژگی‌های مشابه زمین‌ساختی در تهیه

طیف پاسخ، بیشینه پاسخ یک نوسانگر میرای یک درجه آزادی با بسامد یا دوره‌های گوناگون به یک تحریک در فضای زمانی را بیان می‌کند. به‌این ترتیب می‌توان مجموعه‌ای از مقادیر بیشینه پاسخ برای یک دستگاه یک درجه آزادی را به‌صورت تابع‌هایی از سه پارامتر: ۱- بسامد طبیعی دستگاه، ۲- مقدار میرایی (Damping)، و ۳- تاریخچهٔ زمانی (Time History) شتاب جنبش زمین تعریف کرد.

استفاده از طیف پاسخ، روش متداول در تحلیل دینامیکی سازه‌ها است (کمبل و بزرگنیا، ۲۰۰۳). سادگی نسبی، محافظه‌کاری ذاتی و شواهد اثبات شده حاکی از کاربری آن در مورد تحلیل دستگاه‌های پیچیدهٔ کشسانی چند درجه آزادی، به‌روش ترکیب مُدها، بخشی از دلایل اقبال گستردهٔ این روش است. چون جزئیات ویژگی‌های زمین‌لرزه‌های آینده معلوم نیست، بیشتر طیف‌های طرح زمین‌لرزه از میانگین‌گیری مجموعه‌ای از طیف‌های پاسخ حاصل از لرزه‌نگاشت‌هایی که دارای ویژگی‌هایی مشابه هستند، تهیه می‌شوند (جوینور و بور، ۱۹۹۶). طیف‌های طرح، تقویت تکان زمین به‌ازای بسامد یا دوره‌های سازه را مشخص می‌کنند. طیف طرح، ممکن است حاوی بیشینه مقدار تغییر مکان سازه تحت تأثیر زلزله (طیف جابه‌جایی)، حاوی بیشینه مقدار سرعت (طیف سرعت) و یا حاوی بیشینه مقدار شتاب (طیف شتاب) باشد. براساس تحقیقاتی که تاکنون از سوی محققان گوناگون صورت

می‌شود. این مقایسه، نشان از همبستگی به نسبت خوب بین طیف‌های به دست آمده از این تحقیق و تحقیقات منطقه‌ای در دوره‌های بزرگ‌تر از حدود ۰/۱۹ ثانیه و همبستگی ضعیف در دوره‌های کمتر از آن دارد.

## ۲ تهیه طیف طرح بر پایه داده‌های ایران

در آئین‌نامه ۲۸۰۰ ایران، ساختگاه‌ها از نظر نوع سنگ و خاک و براساس سرعت موج برشی در چهار دسته طبقه‌بندی می‌شوند (مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن، ۱۳۸۴). زمین نوع I شامل سنگ‌ها یا خاک‌های سخت با ضخامت کمتر از ۳۰ متر روی بستر سنگی (با سرعت موج برشی بیشتر از ۷۵۰ متر بر ثانیه)، زمین نوع II شامل سنگ‌های سست یا خاک‌های سخت با ضخامت بیشتر از ۳۰ متر (با سرعت موج برشی بین ۳۷۵ و ۷۵۰ متر بر ثانیه)، زمین نوع III شامل سنگ‌های هوازده یا خاک‌های با تراکم یا سختی متوسط (با سرعت موج برشی بین ۱۷۵ و ۳۷۵ متر بر ثانیه) و زمین نوع IV شامل خاک‌های نرم یا رُس مرطوب (با سرعت موج برشی کمتر از ۱۷۵ متر بر ثانیه) هستند. در این تحقیق، فقط ساختگاه‌های سنگی مورد بررسی قرار می‌گیرد. واضح است که برای تحلیل آماری مطلوب باید تعداد کافی شتاب‌نگاشت تهیه شود. برای این منظور داده‌های شتاب‌نگاری ایستگاه‌های شبکه شتاب‌نگاری مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن که روی سنگ با سرعت موج برشی بیش از ۷۵۰ m/s (زمین نوع I استاندارد ۲۸۰۰ ایران) به ثبت رسیده‌اند، تهیه شده و شتاب‌نگاشت‌های مؤلفه قائم و مؤلفه افقی غالب آنها (مؤلفه افقی که اوج شتاب آن از مؤلفه افقی دیگر بیشتر است) برای تعیین طیف پاسخ و طیف طرح مورد استفاده قرار گرفته است.

## ۳ پردازش داده‌های شتاب‌نگاری

یکی از مسائل مهم در مهندسی زلزله، تصحیح

طیف طرح استفاده شود، اعتبار نتایج، بیشتر خواهد بود. ۲- روش‌های تجربی که مستقل از منطقه مورد نظر است و در آن طیف طرح با اتکا بر تجربیات مهندسی و با استفاده از روابط تجربی تهیه می‌شود. طیف نیومارک و هال (۱۹۷۳) و نیز طیف محرز (۱۹۷۶) از جمله این طیف‌ها هستند.

۳- راهکار به نسبت جدید در تولید طیف‌های طراحی، روش‌های پیش‌بینی طیف پاسخ مبتنی بر خطر زلزله است که با استفاده از توسعه روابط تضعیف شتاب با فاصله از رومرکز زمین‌لرزه صورت می‌پذیرد؛ که از آن جمله می‌توان به نتایج تحقیقات منطقه‌ای آمبرسیز و همکاران (۲۰۰۵) و همچنین، الگامال و هی (۲۰۰۴) اشاره کرد.

در این تحقیق ابتدا از روش اول رسم طیف طرح شتاب برای ساختگاه‌های سنگی در ایران استفاده می‌شود. لذا، پس از تهیه داده‌های شتاب‌نگاری مربوط به ایستگاه‌های مستقر بر ساختگاه‌های سنگی ایران، با استفاده از نرم‌افزار سائزموسینگنال، داده‌ها پردازش و خط مبنا در آن اصلاح می‌شود. به علاوه، نوفه‌ها با استفاده از فیلتر مناسب حذف و کل داده با بزرگ‌ترین مقدار خود مقیاس می‌شود. سپس با توجه به تأثیر بزرگی و فاصله، مبادرت به تهیه طیف پاسخ و در نهایت طیف طراحی شتاب شده است. برای این منظور از ۱۰۳ شتاب‌نگاشت قائم و ۱۰۹ شتاب‌نگاشت افقی قابل قبول استفاده شده است، به طوری که در آنها، تقسیم‌بندی مربوط به فاصله‌ها و بزرگی‌های متفاوت در میانگین‌گیری آنها مورد توجه قرار گرفته است. نتایج برای طیف‌های میانگین و میانگین به علاوه انحراف معیار برای ۵٪ میرایی داده می‌شود. بدیهی است که می‌توان نتایج را به ضرایب میرایی دیگر نیز تعمیم داد. به منظور مقایسه و کنترل طیف طراحی به دست آمده از داده‌های شتاب‌نگاری، از روش سوم براساس تحقیقات منطقه‌ای آمبرسیز و همکاران (۲۰۰۵)، استفاده شده است و نتایج حاصل از تحقیقات، مقایسه و به بحث گذاشته

شتاب‌نگارها، حرکات دورانی زمین، غیر متعامد بودن حس‌گرهای شتاب‌نگارها، تاثیر اندرکنشی بسامد نمونه‌برداری و روش انتگرال‌گیری عددی، تغییر مکان‌های مخالف صفر در خط پایه شتاب این سیگنال‌ها وجود دارد (بور و بومر، ۲۰۰۵).

یک روش برای تشخیص لزوم استفاده از اصلاح خط مبنا آن است که منحنی سرعت حاصل از انتگرال‌گیری منحنی شتاب رسم شود. در صورتی که سرعت محاسبه شده در انتها صفر نشود، اصلاح خط مبنا لازم است. با اصلاح خط مبنا معمولاً این خطا رفع می‌شود و بعد از پایان یافتن زلزله یعنی زمانی که شتاب صفر شده است، سرعت نیز صفر خواهد شد. البته ممکن است در منحنی جابه‌جایی زمین تغییر شکل‌های ماندگاری باقی بماند. به منظور حذف نوفه‌ها لازم است تا علاوه بر تصحیح خط مبنا، تصحیحات دیگری نیز روی سیگنال شتاب ثبت شده، صورت پذیرد. روش مرسوم برای چنین تصحیحاتی اعمال فیلتر مناسب است. روش نظری قطعی برای فیلتر کردن شتاب‌نگاشت‌ها وجود ندارد و بسته به محل ثبت و منابع خطایی که در محل ثبت وجود دارد، از فیلترهای گوناگونی استفاده می‌شود. در این تحقیق، از مراحل زیر به منظور تصحیح نگاشت‌ها استفاده می‌شود (بور، ۲۰۰۲):

الف) تصحیح مرتبه صفر: محاسبه میانگین بخش قبل از رویداد نگاشت (از ابتدای نگاشت تا حدود یک ثانیه مانده به زمان اولین رسید) و کم کردن آن از کل نگاشت، ب) تعیین سری زمانی سرعت با انتگرال‌گیری از شتاب‌نگاشت، ج) برازش چندجمله‌ای مرتبه دو به خط مبنا سری زمانی سرعت از زمان اولین رسید تا زمانی که سرعت به صفر برسد، د) حذف مشتق چندجمله‌ای فوق از سری زمانی شتاب تصحیح شده مرتبه صفر، ه) به کار بردن فیلتر باترورت (Butterworth) بالاگذر با در نظر گرفتن بسامد گوشه، و) انتگرال‌گیری برای رسیدن به سری‌های زمانی سرعت و جابه‌جایی.

سیگنال‌های ثبت شده با شتاب‌نگارها است. زیرا به علت های بسیار زیاد از جمله مکان نامناسب شتاب‌نگار، خرابی قسمتی از آن، محدودیت بسامدی شتاب‌نگار، خطای دید در رقومی کردن شتاب‌نگارهای آنالوگ و مانند آن، خطا و نوفه در سیگنال‌های شتاب موجود است و با وجود این نوفه‌ها، نمی‌توان از این سیگنال‌ها اطلاعات صحیح را استخراج کرد. به علاوه، یک شتاب‌نگار برخلاف لرزه‌نگار همیشه در حال کار نیست و طوری تنظیم می‌شود که از آستانه شتاب معینی به بعد شروع به کار و شتاب ارتعاش‌ها را ثبت کند. در نتیجه ارتعاش‌های بی‌اهمیتی مانند عبور و مرور وسایط نقلیه سنگین و مانند آن ثبت نمی‌شوند. این موضوع سبب می‌شود که بخش ابتدایی شتاب‌نگاشت که شتاب در آن کمتر از شتاب آستانه حرکت است، در دسترس نباشد. همچنین معیار مشخصی برای تعیین نقطه پایانی شتاب‌نگاشت موجود نیست، لذا خطی به منزله محور شتاب صفر وجود ندارد تا شتاب نسبت به آن سنجیده شود. ناگزیر، سیگنال‌های موجود باید تصحیح شوند. یکی از روش‌ها برای تصحیح سیگنال، عبور آن از فیلتر مناسب است. در این روش سه مرحله برای تصحیح شتاب‌نگاشت‌ها در نوشتار مهندسی زلزله بیان شده است:

- ۱- تصحیح دستگاهی به منظور حذف اثرات دستگاه‌های شتاب‌نگاشت، ۲- اصلاح خط مبنا سیگنال برای از بین بردن خطای ناشی از آستانه حرکت، ۳- حذف نوفه‌های خارج از پهنای بسامدی شتاب‌نگاشت واقعی. البته در مورد سیگنال‌های رقومی، به علت تفاوت زیاد بسامد طبیعی دستگاه شتاب‌نگار با پهنای بسامدی مورد علاقه در مهندسی زلزله و زلزله‌شناسی و همچنین به سبب انتخاب مناسب پارامتر میرایی دستگاه، در غالب موارد نیازی به تصحیح دستگاهی نیست (بور و بومر، ۲۰۰۵).

هر دو نوع شتاب‌نگارهای آنالوگ و رقومی دارای مشکل خط مبنا هستند. به عبارت دیگر، به سبب عوامل گوناگونی از قبیل پدیده جذب انرژی حس‌گر

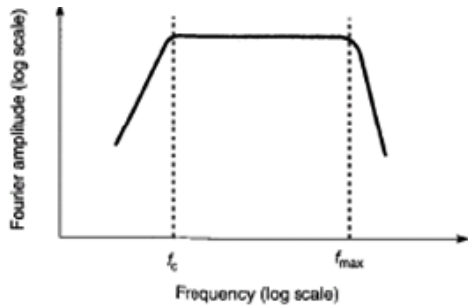
برای به دست آوردن بسامدهای قطع لازم برای فیلتر کردن، از طیف فوریه شتاب (با مقیاس لگاریتمی) استفاده می‌شود. محدوده بسامدی طیف فوریه ایدئال شتاب‌نگاشت بین بسامد گوشه ( $f_c$ ) به منزله حد پایین و بسامد بیشینه ( $f_{max}$ ) در حکم حد بالا است. دامنه طیف فوریه در محدوده بین  $f_c$  و  $f_{max}$  ثابت و در بسامدهای کمتر از  $f_c$  (تا  $f_c$ ) و بیشتر از  $f_{max}$  به صورت خطی کاهش می‌یابد (کرامر، ۱۹۹۶). هرگونه انحراف از این شکل ایدئال (شکل ۱) برای طیف که معمولاً خارج از محدوده  $f_c$  تا  $f_{max}$  اتفاق می‌افتد، نشان از وجود نوفه است که باید حذف شود. پس بسامد قطع در طیف فوریه هر شتاب‌نگاشت مربوط به محل شروع انحراف طیف از حالت ایدئال آن است (موسوی بفرویی و همکاران، ۱۳۹۰). برای پردازش داده‌ها و اصلاح شتاب‌نگاشت‌ها، سری زمانی شتاب، سرعت، جابه‌جایی و طیف فوریه هر یک از آنها با استفاده از نرم‌افزار سائز موسیگنال رسم می‌شود و سپس تصحیح خط مبنا و فیلتر روی داده‌ها صورت می‌گیرد. در صورت لزوم، نگاشت‌های مبهم و با کیفیت بد (نگاشت‌های بدون پیش‌رویداد یا نگاشت‌هایی که زمان رسید فازهای P و S در آنها نامشخص است) از مجموعه داده‌ها حذف می‌شوند. البته با وجود همه این روش‌ها، تصحیح شتاب‌نگاشت‌ها به‌طور کامل میسر نیست و فقط خطا در آنها به حداقل می‌رسد. گذشته از این، خود روش‌های تصحیح نیز ممکن است منبع تولید خطاهای جدیدی باشند. تریفوناک که از پیشروان کارهای تحقیقاتی در این زمینه می‌باشد، وجود ۲۵٪ خطا در محاسبه جابه‌جایی اولیه زمین از روی شتاب‌نگاشت‌ها را خطایی معقول می‌شمارد. همچنین او محدوده بسامدی متداول برای شتاب‌نگاشت‌های زلزله را ۰/۱ HZ تا ۲۵ HZ ذکر کرده است (تریفوناک و تودوروسکا، ۲۰۰۱).

میان‌گذر (Bandpass) استفاده شده است. بسامد قطع حداقل ( $f_L$ ) برای هر مؤلفه، برای تک‌تک نگاشت‌ها به‌طور جداگانه به کمک طیف فوریه با مقیاس لگاریتمی آن تعیین و مطابق تحقیقات موسوی بفرویی و همکاران (۱۳۹۰) بسامد قطع حداکثر ( $f_H$ ) برابر ۲۵ هرتز فرض شده است. این دو مقدار در حقیقت مشخص‌کننده محدوده بسامدی عملیات پردازش هستند. سعی ما بر آن است تا داده‌های حاصل از یک ثبت در این محدوده بسامدی دارای دقت قابل قبول باشد و داده‌های مربوط به بسامدهای خارج از این محدوده که ممکن است خطاهای بزرگی را به همراه داشته باشند، حذف شوند. در این تحقیق، بیشتر از شتاب‌نگاشت‌های ثبت شده با دستگاه‌های رقومی SSA2 استفاده شده است که برای این شتاب‌نگاشت‌ها از فیلتر بالاگذر (Highpass) کمک گرفته شد؛ هرچند که در بعضی جاها استثناهایی نیز در نظر گرفته شده است (برای مثال، برای تصحیح نگاشت‌های دستگاه‌های SSA2، در شرایطی که اعمال فیلتر بالاگذر نگاشت‌های مناسبی را ایجاد نمی‌کرد، از فیلتر میان‌گذر به جای آن استفاده شد). برای این شتاب‌نگاشت‌ها بسامد قطع حداقل ( $f_L$ ) یا همان حد پایین طیف فوریه ایدئال شتاب‌نگاشت در تحقیق کرامر (۱۹۹۶) برای هر مؤلفه هر شتاب‌نگاشت به‌طور جداگانه و به کمک طیف فوریه با مقیاس لگاریتمی آن تعیین و در فیلتر بالاگذر برای تصحیح شتاب‌نگاشت استفاده شده است. در ضمن در صورت استفاده از فیلتر پایین‌گذر می‌توان همانند فیلتر بالاگذر بسامد قطع حداقل ( $f_L$ ) را به کمک طیف فوریه تعیین کرد. هرچند که در این تحقیق از فیلتر پایین‌گذر استفاده نشده است. مطابق تحقیقات موسوی بفرویی و همکاران (۱۳۹۰) در همه مراحل از فیلتر باترورت مرتبه چهار برای فیلتر کردن و از تصحیح خط مبنا از نوع خطی و گاهی از نوع چندجمله‌ای درجه دو برای نگاشت‌ها استفاده شده است. با توجه به کم‌اثر بودن فیلتر بسل نسبت به فیلتر باترورت با همان

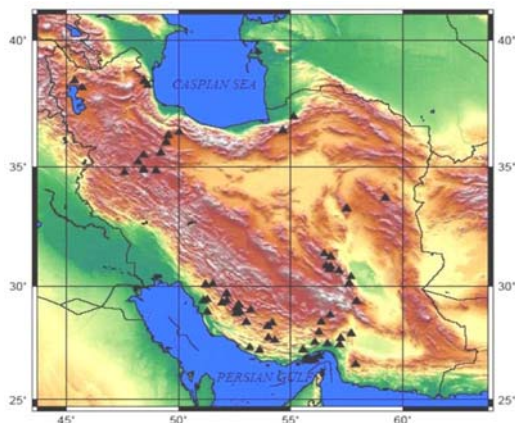
در این مقاله به منظور فیلتر کردن شتاب‌نگاشت‌های

ثبت شده با دستگاه‌های آنالوگ SMA1 از یک فیلتر

مشخص شده‌اند. در جدول ۱ اسامی تعدادی از ایستگاه‌ها، نگاشت‌های مربوط و پارامترهای مبنایی زلزله‌هایی که از شتاب‌نگاشت آنها در این تحقیق استفاده شده، ذکر شده‌اند.

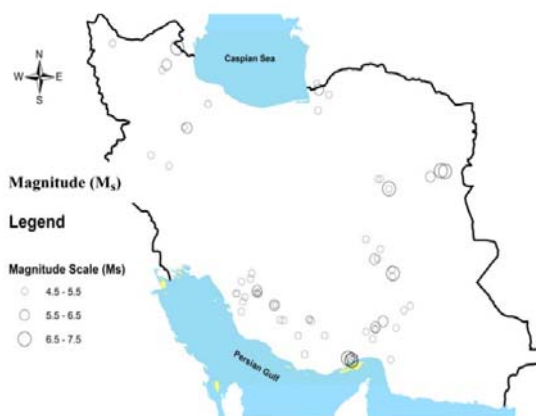


شکل ۱. شکل ایدئال طیف دامنه فوریه هموار شده، با بسامد گوشه  $f_c$  و بسامد قطع  $f_{max}$  (کرامر، ۱۹۹۶).



شکل ۲. موقعیت ۶۴ ایستگاه شتاب‌نگاری مستقر بر ساختگاه‌های سنگی ایران، مورد استفاده در این تحقیق.

مرتبه و واپیچش‌های موجود در باند گذر یا باند توقف در فیلترهای چیبیشوف و بیضوی، کاربران ترجیح می‌دهند که از فیلتر باترورت استفاده کنند (جبه دار مارلانی، ۱۳۶۸). انتخاب بسامد قطع برای ثبت‌های دستگاه‌های آنالوگ که قسمت پیش رویداد ندارند مشکل‌تر است، زیرا معمولاً برآوردی از نوفه وجود ندارد (آمبرسیز و همکاران ۲۰۰۵). نتیجه تصحیح به تغییرات جزئی در پارامترهای تصحیح، به‌خصوص در مورد فیلترهای بالاگذر بسیار حساس است. به‌عبارت‌دیگر با تغییر جزئی در بسامد قطع فیلتر بالاگذر، سیگنال تغییر مکان که با انتگرال‌گیری از سیگنال شتاب به دست می‌آید، دچار تغییرات زیادی می‌شود. این موضوع روی طیف تغییر مکان نیز در محدوده دوره‌های بلند بسیار مؤثر است (بور و بومر، ۲۰۰۵). بنابراین، در صورتی که با انتخاب یک بسامد قطع نگاشت با کیفیتی به دست نیاید، با تغییر بسامد قطع ثبت مناسب‌تری جست‌وجو می‌شود. به این ترتیب ۱۰۳ نگاشت قائم و ۱۰۹ نگاشت افقی غالب قابل قبول فراهم و طیف پاسخ همه آن نگاشت‌ها برای میرایی ۵٪ تهیه شد. این نگاشت‌ها، مربوط به ۶۴ ایستگاه شتاب‌نگاری مستقر بر ساختگاه‌های سنگی از ۷۱ زمین‌لرزه رخ داده در ایران می‌باشد. موقعیت این ایستگاه‌ها و رومرکز زلزله‌های اشاره شده، در شکل‌های ۲ و ۳ به تفکیک بر روی دو نقشه



شکل ۳. موقعیت ۷۱ زمین‌لرزه ثبت شده در ایستگاه‌های شبکه شتاب‌نگاری ایران، مورد استفاده در این تحقیق.

جدول ۱. تعدادی از ایستگاه‌های ثبت کننده و پارامترهای مبنایی زلزله‌های استفاده شده در این مطالعه (جوان‌امروز، ۱۳۸۹)..

نام	استان	طول (E°)	عرض (N°)	تاریخ وقوع	ساعت وقوع	طول رومرکز (E°)	عرض رومرکز (N°)	عمق کانونی (km)	فاصله رومرکز (km)	بزرگی $m_b$	بزرگی $M_s$	گزارش کننده	سرعت موج برشی (m/s)
قائن	خراسان جنوبی	59.22	33.73	1976/11/07	04:00:50	59.19	33.82		10	5.8	6.4	AMB	889
دیپوک	یزد	57.50	33.29	1978/09/16	15:35:57	57.44	33.37	34	10	6.4	7.4	ISC	843
قائن	خراسان جنوبی	59.22	33.73	1979/11/14	02:21:18	59.81	34.03	3	64	6	6.7	ISC	889
قبر	فارس	53.03	28.44	1985/02/02	20:52:35	52.99	28.38	44	8	5.1	5.3	ISC	1099
نورآباد	فارس	51.53	30.11	1986/12/20	23:47:10	51.60	29.95	32	19	5.4	4.9	ISC	887
میمند	فارس	52.75	28.87	1994/06/20	09:09:02	52.61	28.96	8	17	5.9	5.7	NEIC	881
سعدآباد	بوشهر	51.12	29.38	1996/01/24	07:07:04	51.03	29.41	57	9	4.7	4.6	NEIC	921
نمین	اردبیل	48.48	38.42	1997/02/28	12:57:45	48.06	38.07	10	54	5.5	6.1	NEIC	1236
ابارق	کرمان	57.94	29.35	1998/03/14	19:40:27	57.61	30.15	9	95	5.9	6.9	NEIC	1160
بالا ده	فارس	51.94	29.29	1999/05/06	23:13:25	51.90	29.40	33	13	5.3	5.2	NEIC	1380
فارغان	هرمزگان	56.26	28.01	2000/03/05	09:40:06	56.47	27.95	33	22	5.6	5.3	NEIC	1079
بابامنیر	فارس	51.21	30.07	2001/03/28	16:34:22	51.22	29.84	33	26	5.1	4.7	NEIC	832
تخت	هرمزگان	56.64	27.50	2002/04/17	08:47:22	56.75	27.66	33	21	5.3	4.9	NEIC	1195
ضیاء آباد	قزوین	49.45	36.00	2002/04/19	13:46:49	49.81	36.57	33	71	5.2	5.2	NEIC	815
سنقر	کرمانشاه	47.60	34.78	2002/04/24	19:48:07	47.40	34.64	33	24	5.2	5	NEIC	1477
شیرین سو	همدان	48.45	35.49	2002/06/22	02:58:20	48.93	35.67	10	48	6.2	6.4	NEIC	813
راور	کرمان	56.79	31.26	2002/10/16	09:20:49	56.47	31.45	33	37	4.9	4.5	NEIC	853
کهنوج	کرمان	57.70	27.94	2003/07/06	16:04:20	57.74	28.09	33	17	4.9	4.6	NEIC	1564
رامیان	گلستان	55.14	37.02	2004/10/07	21:46:18	54.48	37.12	34	60	5.6	6	NEIC	827
مجن	سمنان	54.65	36.48	2004/10/07	21:46:18	54.48	37.12	34	73	5.6	6	NEIC	876
راور	کرمان	56.79	31.26	2005/05/14	18:04:54	56.83	30.69	10	64	5.5	5.7	NEIC	853
رودان	هرمزگان	57.19	27.45	2006/02/28	07:31:02	56.87	28.12	18	81	5.9	6.2	NEIC	869
شبیستر	آذربایجان شرقی	45.71	38.18	2008/09/02	20:00:56	45.78	38.87	35	78	5	4.8	NEIC	922
راور	کرمان	56.79	31.26	2009/02/15	21:22:20	57.07	31.07	17	36	4.9	4.5	NEIC	853



## ۴ اثر بزرگی

$$M_s = am_b + b \quad (1)$$

به منظور در اختیار داشتن داده‌های کافی برای تحلیل آماری، همه نگاشت‌ها با توجه به بزرگی زمین‌لرزه‌ها برای بازه‌های بزرگی ۴/۵-۵/۵، ۵/۵-۶/۵ و ۶/۵-۷/۵ تقسیم شدند. اگر بازه بزرگی بیشتر از یک واحد بزرگی انتخاب شود، دامنه و احتمالاً محتوای بسامدی شتاب‌نگاشت‌ها تغییر قابل توجهی خواهد یافت (کیمبال، ۱۹۸۳).

## ۵ اثر فاصله

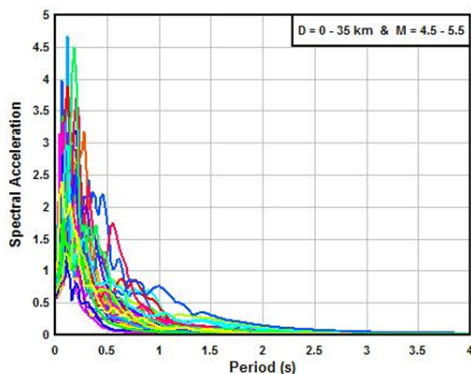
بر اساس تحقیقات کیمبال (۱۹۸۳) و کمیته مقررات هسته‌ای امریکا (۱۹۸۹)، در نبود چشمه لرزه‌ای مشخص، محدوده فاصله‌های صفر تا ۳۰ کیلومتر درحکم فاصله نزدیک در نظر گرفته می‌شود. هرچه فاصله رویداد زمین‌لرزه از محل استقرار شتاب‌نگار دورتر باشد، تأثیر میرایی غیرکشسان بیشتر خواهد شد و احتمال عبور امواج لرزه‌ای از میان واحدهای سنگی با خصوصیات متفاوت بیشتر می‌شود (کیمبال، ۱۹۸۳). با این حال در این تحقیق، به علت کافی نبودن تعداد نگاشت‌ها تا فاصله رومرکزی ۳۰ کیلومتر، فاصله صفر تا ۳۵ کیلومتری به منزله فاصله نزدیک انتخاب می‌شود. با توجه در اختیار نداشتن شتاب‌نگاشت برای فاصله‌های دور تا حدود ۱۰۰ km، بازه فاصله برای فاصله‌های دور، قدری بیشتر از فاصله متوسط (در اینجا ۳۵-۶۵ km) انتخاب می‌شود. نگاشت‌های فاصله‌های بیش از ۱۰۰ km به علت‌های زیر در نظر گرفته نمی‌شوند:

- ۱- نگاشت‌های فاصله‌های بزرگ‌تر، اهمیت مهندسی کمتری دارند؛
- ۲- تأثیر میرایی غیرکشسان با افزایش فاصله، افزایش می‌یابد و در نتیجه، دامنه نگاشت‌ها کاهش می‌یابد؛
- ۳- توزیع نگاشت‌ها با افزایش فاصله غیریکنواخت می‌شود؛
- ۴- معمولاً در فاصله‌های بزرگ‌تر از ۱۰۰ کیلومتر، دستگاه‌های شتاب‌نگاری قادر به ثبت نگاشت زلزله نیستند (آمبرسیز و همکاران، ۲۰۰۵).

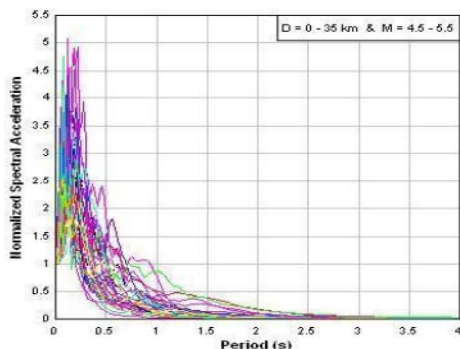
مقادیر بیشینه تکان زمین در تحلیل و طراحی در برابر زلزله دارای اهمیت است. با وجود این، کمیت‌های مزبور به تنهایی برای تعیین بیشینه نیروهای وارد بر سازه یا تجهیزات، کافی نیست. عوامل دیگری مانند بزرگی زمین‌لرزه، فاصله از رومرکز زلزله یا گسلش، مدت تکان قوی، نوع زمین ساختگاه، و محتوای بسامدی تکان نیز بر پاسخ سازه مؤثرند. تحقیقی که محرز (۱۹۷۶) در باب تأثیر بزرگی زمین‌لرزه بر تقویت‌های پاسخ در زمین‌های آبرفتی به انجام رسانده، حاکی از آن است که بزرگی زمین‌لرزه می‌تواند بر شکل‌های طیفی مؤثر باشد و این مهم باید در تهیه طیف‌های طراحی برای یک ساختگاه، به‌ویژه برای سازه‌های مهم، منظور شود.

برای تحلیل آماری مناسب، بزرگی زلزله‌ها باید به مقیاس واحدی تبدیل شوند. در میان مقیاس‌های بزرگی، فقط بزرگی گشتاوری ( $M_w$ ) است که اشباع نمی‌شود، بنابراین، بزرگی  $M_w$  می‌تواند انتخاب مناسبی برای بررسی باشد. اما، از آنجاکه  $M_w$  فقط برای تعداد کمی از زمین‌لرزه‌های ایران تعیین شده، در این تحقیق، از  $M_s$  به جای  $M_w$  استفاده شده است؛ چرا که برای اکثر زمین‌لرزه‌ها،  $M_s$  با  $M_w$  تا بزرگی حدود هشت، همخوانی بسیار خوبی دارد (هانکس و کاناموری، ۱۹۷۹). از طرفی به این علت که برای حدود ۸۰ درصد از زمین‌لرزه‌های ایران که پس از ۱۹۶۳ به ثبت رسیده‌اند، فقط بزرگی در مقیاس امواج درونی ( $m_b$ ) گزارش شده است (میرزائی و همکاران، ۱۳۸۱)، بنابراین، برای تعیین  $M_s$  از رابطه تجربی تبدیل  $m_b$  به  $M_s$  استفاده می‌شود. با توجه به بازه‌های انتخاب بزرگی، این تبدیل عدم قطعیت زیادی ایجاد نمی‌کند. برای رسیدن به  $M_s$  در هر منطقه از ایران با توجه به زلزله‌های موجود، به‌طور مجزا رابطه بین  $m_b$  و  $M_s$  از راه پردازش با تابع خطی به‌صورت رابطه (۱) زیر به‌دست می‌آید:

میانگین گیری و هموارسازی از آنها استفاده می کنند. اوج شتاب، سرعت و جابه جایی زمین در نگاشت های گوناگون زمین لرزه متفاوت است. لذا، به منظور مقایسه اثر شتاب نگاشت هایی که از زلزله های گوناگون به دست آمده اند، لازم است آنها را به مقدار اوج خود نرمال کنیم تا قابل مقایسه باشند. روش های گوناگونی را برای نرمال کردن طیف های پاسخ می توان مورد استفاده قرار داد. از این میان دو روش متداول عبارتند از: ۱- نرمال کردن برحسب شدت طیفی، که در آن مساحت های زیر خم های طیفی بین دو بسامد یا دوره مفروض با یکدیگر برابر گرفته می شوند؛ ۲- نرمال کردن برحسب اوج تکان زمین، که در آن ارتفاع های طیفی بر اوج شتاب، سرعت یا جابه جایی زمین تقسیم می شوند (نعیم، ۲۰۰۱).



شکل ۴. طیف های پاسخ شتاب افقی در ۵٪ میرایی برای ایستگاه های مستقر بر ساختگاه های سنگی ایران.



شکل ۵. طیف های پاسخ شتاب افقی نرمال شده به بیشینه شتاب افقی زمین در ۵٪ میرایی برای ایستگاه های مستقر بر ساختگاه های سنگی ایران

بنابراین، با در نظر گرفتن شرایط فوق، همه نگاشت ها با توجه به فاصله های گوناگون ایستگاه ها از رومرکز زمین لرزه ها، به فاصله نزدیک (۰-۳۵ km)، فاصله متوسط (۳۵-۶۵ km) و فاصله دور (۶۵-۱۰۰ km) تقسیم می شوند.

## ۶ طیف های پاسخ و طیف های طرح

برای در اختیار داشتن پاسخ واقعی تر در تحلیل طیفی لازم است که مشخصات طیفی تا جای ممکن نزدیک به مشخصات محل اجرای سازه و سوابق زلزله خیزی آن باشد. آئین نامه ها با در نظر گرفتن احتمال وقوع زلزله در یک منطقه و سابقه لرزه خیزی آن، شکل خاصی را برای طیف پیشنهاد و انتخاب شتاب نگاشت های منطبق بر آن را برای تحلیل تاریخچه زمانی توصیه می کنند. طیف پیشنهادی آئین نامه را طیف طرح می گویند. پس از بررسی شتاب نگاشت های گوناگون و تفکیک آنها براساس بازه های بزرگی و فاصله و تنگناهای موجود در انتخاب شتاب نگاشت ها، داده های شتاب طیفی در بازه های بزرگی و فاصله متفاوت رسم شده اند (شکل ۴).

اگر چه از طیف های پاسخ یک شتاب نگاشت معین می توان برای به دست آوردن پاسخ سازه به یک تکان زمین با ویژگی های مشابه استفاده کرد، اما، نمی توان از آنها برای طراحی کمک گرفت، چرا که انطباق کامل دو زمین لرزه ممکن نیست. به هر حال، تکان های ثبت شده زمین و طیف های پاسخ محاسبه شده از زمین لرزه های گذشته دارای شباهت هایی هستند. تحقیقات صورت گرفته نشان می دهد که طیف های پاسخ حاصل از شتاب نگاشت هایی که در زمین های با نوع خاک مشابه ثبت شده اند، از نظر شکل و تقویت پاسخ ها شباهت هایی دارند. به این سبب قبل از استفاده در طراحی، طیف های پاسخ حاصل از نگاشت هایی را که دارای ویژگی های مشترک هستند در یک دسته قرار می دهند و با

می‌شود. در این روش، دو گزینه تحت عنوان گره‌ها و مرتبه برای خم‌ها تعریف می‌شوند و از طریق میان‌یابی، منحنی همواری بر داده‌ها برازش می‌شود. گره‌ها و مرتبه منحنی برازش داده شده بر داده‌ها متغیرند و به سمت کمینه‌سازی بیشتر بر مبنای روش کمینه‌سازی کمترین مربعات تغییر داده می‌شوند. این روش، به سبب وجود تعداد زیادی خم متناسب با داده‌های گوناگون، مناسب‌تر از دیگر روش‌های موجود در نرم‌افزار Table Curve است. نمونه‌ای از طیف‌های حاصل اولیه و هموار شده در شکل‌های ۶ و ۷ نشان داده شده‌اند.

پس از هموارسازی طیف‌ها به روش گفته شده، میانگین طیف‌های تقویت شتاب افقی و قائم هموار شده برای هر ترکیب از بازه‌های بزرگی و فاصله در میرایی ۵٪ رسم می‌شود. این طیف‌های میانگین در شکل‌های ۸ و ۹ نشان داده شده‌اند.

#### ۷ محاسبه کمیت‌های طیفی با استفاده از روابط تضعیف طیفی

روابط تضعیف از تحلیل رگرسیون داده‌های ثبت شده جنبش‌های نیرومند زمین به دست می‌آیند. بر این اساس، به موازات در دسترس قرار گرفتن داده‌های جدیدی از تکان‌های نیرومند، این روابط با زمان تغییر خواهند کرد. اغلب روابط تضعیف هر ۳ تا ۵ سال و یا پس از فاصله کمی از زلزله‌های بزرگ در مناطق دارای دستگاه‌های اندازه‌گیری خوب روزآمد می‌شوند. برای به دست آوردن طیف طرح و مقایسه آن با طیف‌های به دست آمده از این تحقیق براساس داده‌های ایران، از روابط تضعیف طیفی آمبرسیز و همکاران (۲۰۰۵) که با استفاده از داده‌های منطقه‌ای (اروپا و خاورمیانه)، برای اوج شتاب زمین و شتاب طیفی افقی و قائم پیشنهاد شده، استفاده می‌شود. این رابطه به صورت رابطه (۲)

در این تحقیق، از روش نرمال کردن براساس اوج شتاب استفاده می‌شود که به سبب سادگی متداول و از نظر آئین‌نامه ۲۸۰۰ ایران نیز مورد تأیید است. همچنین، تأثیر بزرگی زمین‌لرزه و فاصله از رومرکز بر طیف‌های پاسخ و طراحی عموماً با مشخص کردن اوج شتاب زمین در ساختگاه منظور می‌شود؛ با این فرض، همه این داده‌ها به PGA مربوط به خود، نرمال شده‌اند که نمونه‌ای از آن در شکل ۵ نشان داده شده است. با میانگین‌گیری از هر دسته از داده‌های طیف پاسخ نرمال شده، میانگین طیف‌های تقویت شتاب افقی و قائم برای هر ترکیب از بازه‌های بزرگی و فاصله و برای نسبت میرایی ۵٪ به دست می‌آید. طیف میانگین برای سازه‌های عادی تا حد مناسبی محافظه‌کاری لازم را برآورده می‌کند، درحالی‌که برای سازه‌های مهم و بحرانی نظیر سدها، نیروگاه‌های هسته‌ای، زلزله‌های طراحی باید به صورت میانگین به علاوه یک انحراف معیار (فوق میانگین) استفاده شوند (هال و همکاران، ۱۹۷۵ و سید؛ ادیس، ۱۹۸۲). بنابراین، به طور جداگانه برای هر دوره، انحراف معیار داده‌ها برای هر دسته طیف پاسخ، به دست می‌آید و طیف‌های تقویت شتاب افقی و قائم میانگین به علاوه انحراف معیار هر بازه نیز برای نسبت میرایی ۵٪ رسم می‌شود. برای استفاده کاربردی، طیف‌های طراحی به صورت خم‌های هموار شده یا خطوط صاف داده می‌شوند. هموارسازی طیف‌ها به عنوان تکنیکی گرافیکی شناخته می‌شود که بوسیله آن تیزی و فرورفتگی طیف پاسخ را از بین می‌برند. در هر حالت، هموار کردن طیف به سبب آگاهی از این حقیقت که ویژگی دقیق طیف‌های پاسخ زمین‌لرزه‌های آینده معلوم نیست، انجام می‌شود. روش‌های مختلفی جهت هموارسازی طیف‌ها از جمله روش خطی، نمایی و فضایی وجود دارد که در نرم‌افزار Table Curve گروهی از این روش‌ها کاربرد دارند. لذا، با استفاده از این نرم‌افزار اقدام به هموارسازی طیف‌ها با روش LS B-Spline opt

است:

$$\log y = \quad (2)$$

$$a_1 + a_2 M_w + (a_3 + a_4 M_w) \log \sqrt{d^2 + a_5^2} + a_6 S_S + a_7 S_A + a_8 F_N + a_9 F_T + a_{10} F_O$$

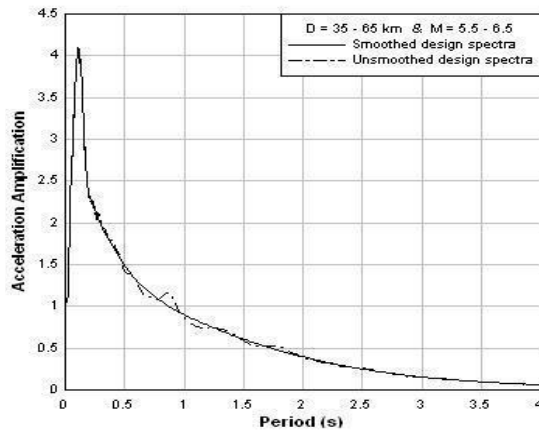
که در آن،  $y$  شتاب افقی یا قائم پیش‌بینی شده برحسب شتاب گرانی زمین  $(g)$ ،  $M_w$  بزرگی گشتاوری زمین‌لرزه و  $d$  نزدیک‌ترین فاصله سطحی تا گسل به کیلومتر است. همچنین، در این رابطه  $S_S$  برای ساختگاه‌های با خاک نرم برابر واحد و برای بقیه ساختگاه‌ها برابر صفر است.  $S_A$  برای ساختگاه‌های با خاک سخت برابر واحد و برای بقیه ساختگاه‌ها برابر صفر است.  $F_N$  برای زلزله‌های با سازوکار نرمال برابر یک و برای بقیه سازوکارها برابر صفر است.  $F_T$  برای زلزله‌های با سازوکار رانندگی برابر یک و برای بقیه سازوکارها برابر صفر است و  $F_O$  برای زلزله‌های با سازوکار ناشناخته (Odd) برابر یک و برای بقیه سازوکارها برابر صفر است. شکل عمومی این رابطه برای

شتاب‌های افقی و قائم یکسان است، اما، پارامترهای  $a_1$  تا  $a_{10}$  تابع‌هایی از دوره و برای دوره‌های گوناگون، متفاوت‌اند. با توجه به شرایط ساختگاه و با فرض اینکه نوع گسلش امتدادلغز باشد تنها ۵ پارامتر  $a_1$  تا  $a_5$  تأثیرگذار خواهند بود و این مقادیر برای اوج شتاب زمین و شتاب‌های طیفی افقی برحسب دوره در جدول ۲ داده شده است.

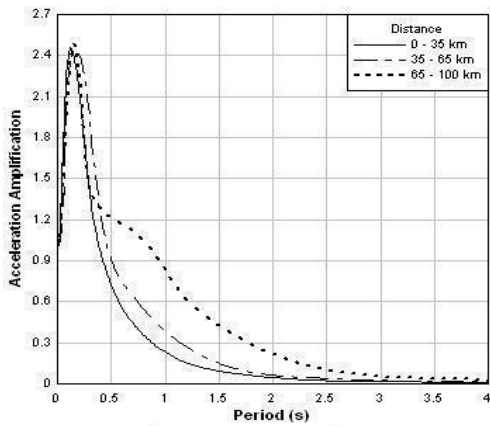
پس از تعیین مقادیر شتاب طیفی افقی و قائم نرمال شده به  $PGA$  مربوط، با استفاده از رابطه تضعیف آمبرسیز و همکاران (۲۰۰۵)، طیف‌های تقویت شتاب افقی و قائم میانگین در ۵٪ میرایی برای فاصله‌های متفاوت ۱۵، ۵۰ و ۸۵ کیلومتری ایستگاه‌ها از رومرکز زلزله‌ها و همچنین، بزرگی‌های متفاوت ۵، ۶ و ۷ در مقیاس امواج سطحی ( $M_s$ ) که معادل با مقادیر میانی بازه‌های فاصله و بزرگی در این تحقیق هستند، رسم شده‌اند (شکل ۱۰).

جدول ۲. ضرایب ارائه شده آمبرسیز و همکاران (۲۰۰۵) برای برآورد اوج شتاب زمین و شتاب طیفی افقی در ۵٪ میرایی و با فرض گسلش امتدادلغز.

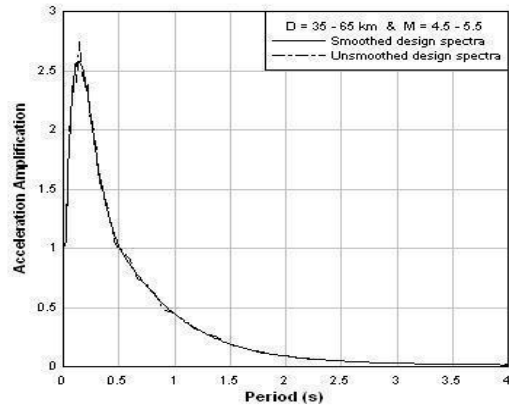
Period	a1	a2	a3	a4	a5
0.05	3.247	-0.225	-3.525	0.359	7.4
0.055	3.125	-0.206	-3.418	0.345	7.1
0.06	3.202	-0.212	-3.444	0.347	7.4
0.065	3.442	-0.242	-3.571	0.365	7.7
0.07	3.504	-0.249	-3.576	0.367	7.9
0.075	3.472	-0.24	-3.521	0.358	8
PGA	2.522	-0.142	-3.184	0.314	7.6



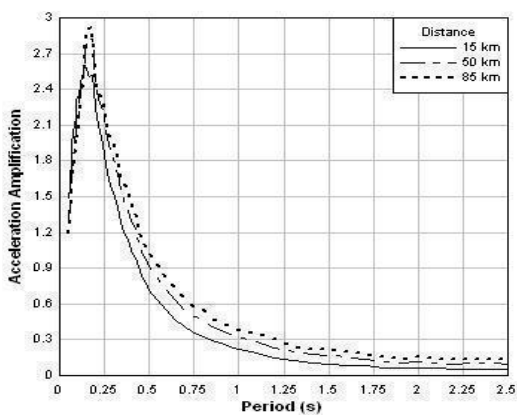
شکل ۶. طیف‌های تقویت شتاب قائم میانگین به‌علاوه انحراف معیار ناهموار و هموار شده در ۰.۵٪ میرایی برای ایستگاه‌های مستقر بر ساختگاه‌های سنگی ایران (فاصله ۳۵ تا ۶۵ کیلومتر و بزرگی  $M_s = 5.5 - 6.5$ ).



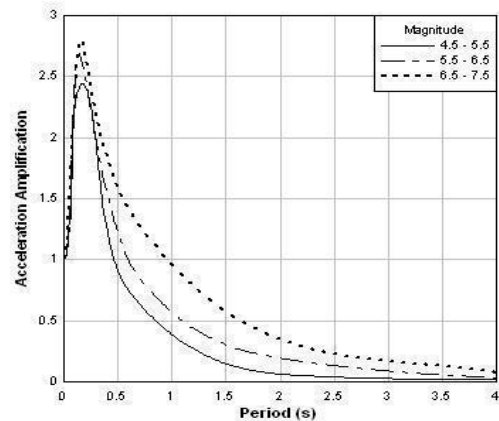
شکل ۹. طیف‌های تقویت شتاب افقی میانگین در ۰.۵٪ میرایی برای ایستگاه‌های مستقر بر ساختگاه‌های سنگی ایران و بزرگی  $M_s = 5.5 - 6.5$



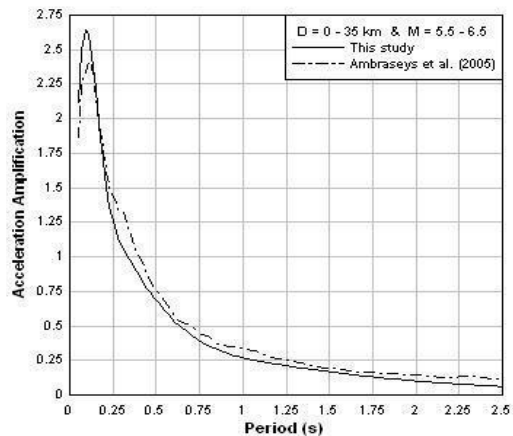
شکل ۷. طیف‌های تقویت شتاب قائم میانگین ناهموار و هموار شده در ۰.۵٪ میرایی برای ایستگاه‌های مستقر بر ساختگاه‌های سنگی ایران (فاصله ۳۵ تا ۶۵ کیلومتر و بزرگی  $M_s = 4.5 - 5.5$ ).



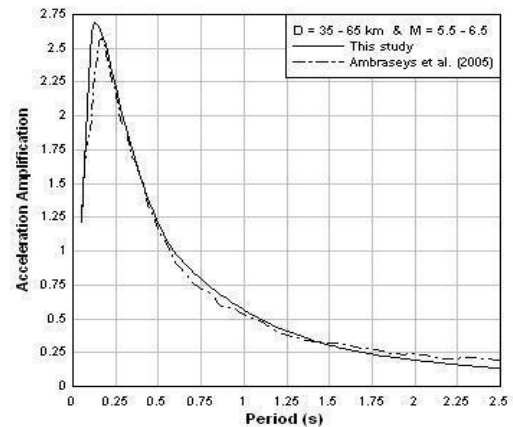
شکل ۱۰. طیف‌های تقویت شتاب افقی نتیجه شده از رابطه تضعیف آمبرسیز و همکاران (۲۰۰۵) در ۰.۵٪ میرایی برای  $M_s = 5$



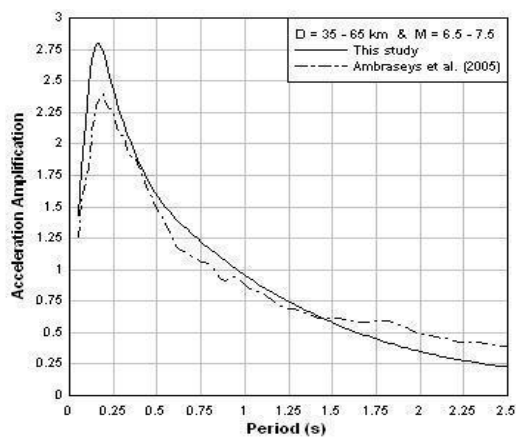
شکل ۸. طیف‌های تقویت شتاب افقی میانگین در ۰.۵٪ میرایی برای ایستگاه‌های مستقر بر ساختگاه‌های سنگی ایران و فاصله ۳۵ تا ۶۵ کیلومتر.



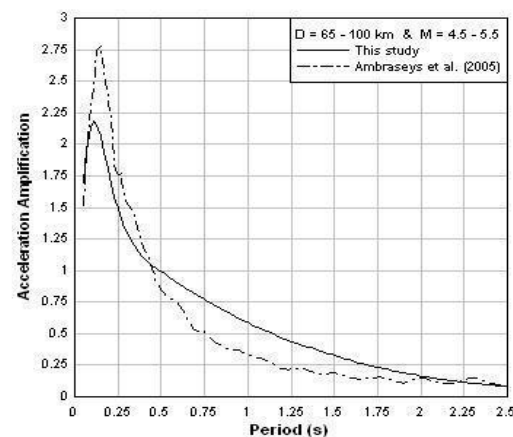
شکل ۱۲. مقایسه طیف طرح قائم حاصل از تحقیقات منطقه‌ای آمبرسیز و همکاران (۲۰۰۵)، با طیف طرح قائم میانگین به‌دست آمده از این تحقیق براساس داده‌های ایران در ۵٪ میرایی.



شکل ۱۱. مقایسه طیف طرح افقی حاصل از تحقیقات منطقه‌ای آمبرسیز و همکاران (۲۰۰۵)، با طیف طرح افقی میانگین به‌دست آمده از این تحقیق براساس داده‌های ایران در ۵٪ میرایی.



شکل ۱۴. مقایسه طیف طرح افقی حاصل از تحقیقات منطقه‌ای آمبرسیز و همکاران (۲۰۰۵)، با طیف طرح افقی میانگین به‌دست آمده از این تحقیق براساس داده‌های ایران در ۵٪ میرایی.



شکل ۱۳. مقایسه طیف طرح قائم حاصل از تحقیقات منطقه‌ای آمبرسیز و همکاران (۲۰۰۵)، با طیف طرح قائم میانگین به‌دست آمده از این تحقیق براساس داده‌های ایران در ۵٪ میرایی.

## ۸ نتیجه‌گیری

با توجه به طیف‌های به‌دست آمده از شتاب‌نگاشت‌های استفاده شده در این تحقیق که براساس داده‌های ایستگاه‌های مستقر بر ساختگاه‌های سنگی ایران است، می‌توان نتیجه گرفت که برای بزرگی‌های ثابت، با افزایش فاصله از رومرکز، در دوره‌های کمتر از حدود ۰/۳۱ ثانیه، شتاب قائم و افقی میانگین و میانگین به‌علاوه انحراف

از آنجا که پارامترهای رابطه تضعیف آمبرسیز و همکاران (۲۰۰۵) فقط برای نسبت میرایی ۵٪ داده شده‌اند، طیف‌های طرح به‌دست آمده در این تحقیق براساس داده‌های ایران نیز فقط در میرایی ۵٪ با طیف‌های حاصل از تحقیقات منطقه‌ای آمبرسیز مقایسه می‌شوند. در شکل‌های ۱۱ تا ۱۴، مقایسه بین طیف‌های حاصل از دو تحقیق پیش‌گفته، نشان داده شده‌اند.

طراحی، مقادیر شتاب طیفی برای دوره‌های کوچک (معمولاً کوچک‌تر از ۰/۲ ثانیه) با یک خط صاف جایگزین می‌شود، و لذا، وجود همبستگی برای دوره‌های بزرگ‌تر (معمولاً بزرگ‌تر از ۰/۲ ثانیه) اهمیت ویژه‌ای دارد. با توجه به کافی نبودن داده‌ها برای تحلیل آماری در بعضی بازه‌ها، باید به نتایج حاصل، به‌خصوص در فاصله‌های دور و بزرگی‌های زیاد، با دیده تردید نگریست. نتایج این تحقیق برای بازه بزرگی‌های کمتر، با تحقیقات قبلی، بهتر تناسب دارد. از آنجا که پارامترهای جنبش زمین ممکن است تحت تأثیر پارامترهای متعدد دیگری از جمله نوع گسلش، راستاگرایی و مانند آن باشند، می‌توان طیف‌های طرح را با توجه به تأثیر این پارامترها نیز تهیه کرد و از این طیف‌ها در ارزیابی دقیق‌تر بیشینه پاسخ و تحلیل و طراحی سازه‌ها در ساختگاه‌های گوناگون ایران، به‌ویژه برای سازه‌های مهم، استفاده کرد. همچنین با توجه به تأثیر این پارامترها در روابط تضعیف طیفی، می‌توان طیف‌های حاصل از شتاب‌نگاشت‌ها را با در نظر گرفتن پارامترهای فوق با طیف‌های نظیر حاصل از روابط تضعیف طیفی، مقایسه کرد.

#### تشکر و قدردانی

از مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن، که داده‌های شتاب‌نگاری را در اختیار قرار داده‌اند، قدردانی می‌شود.

#### مراجع

جبه‌دار مارلانی، پ.، ۱۳۶۸، سیگنال‌ها و سیستم‌ها، چاپ اول، انتشارات دانشگاه تهران.  
جوان‌امروز، ح. ر.، ۱۳۸۹، طیف‌های طرح برای ساختگاه‌های سنگی ایران با ملاحظات بزرگی و فاصله و مقایسه با طیف‌های حاصل از تحقیقات منطقه‌ای،

معیار، افزایش می‌یابد. به‌ازای فاصله‌های ثابت ایستگاه‌ها از رومرکز و با افزایش بزرگی، تقویت شتاب افقی، در دوره‌های بزرگ‌تر از حدود ۰/۳۱ ثانیه، افزایش می‌یابد.  
با مقایسه طیف‌های طرح به‌دست آمده با استفاده از روابط تضعیف منطقه‌ای آمبرسیز و همکاران (۲۰۰۵) با یکدیگر نتایج زیر حاصل می‌شوند:  
الف) برای بزرگی‌های ثابت، با افزایش فاصله ایستگاه‌ها از رومرکز زمین‌لرزه، تقویت شتاب افقی و قائم افزایش می‌یابد (تقویت شتاب قائم در بزرگی‌های بین ۶/۵-۷/۵ برای دوره کمتر از ۰/۱۵ ثانیه به‌طور استثنایی با افزایش فاصله از رومرکز کاهش می‌یابد). ب) تقویت شتاب افقی و قائم برای فاصله‌های ثابت ایستگاه‌ها از رومرکز و در دوره‌های کمتر از حدود ۰/۲۴ ثانیه با افزایش بزرگی کمتر می‌شود و در دوره‌های بالاتر از این مقدار افزایش می‌یابد (تقویت شتاب قائم در فاصله‌های رومرکزی بین ۰-۳۵ کیلومتر و در دوره کمتر از ۰/۲۴ ثانیه با افزایش بزرگی به‌طور استثنایی بیشتر می‌شود).

همچنین، با مقایسه طیف‌های به‌دست آمده از این تحقیق و بررسی‌های منطقه‌ای، نتایج زیر حاصل می‌شود:  
الف) در دوره‌های بین ۰/۰۹-۰/۱۹ ثانیه همبستگی ضعیف و در دوره‌های بزرگ‌تر از حدود ۰/۱۹ ثانیه همبستگی به‌نسبت خوبی بین طیف‌های حاصل از این تحقیق و بررسی‌های منطقه‌ای وجود دارد. ب) برای فاصله‌های دور (فاصله رومرکزی بین ۶۵-۱۰۰ کیلومتر) و همه بازه‌های بزرگی، همبستگی ضعیفی تقریباً در همه دوره‌ها وجود دارد (تقویت شتاب قائم، در شرایط فاصله دور و بزرگی ۴/۵-۵/۵ از این قاعده مستثنی است و همبستگی به‌نسبت خوبی بین طیف‌ها وجود دارد). ج) در دوره‌های بین ۰/۰۹-۰/۱۹ ثانیه برای بازه بزرگی ۴/۵-۵/۵، در اکثر موارد، تقویت شتاب حاصل از بررسی‌های منطقه‌ای، بیشتر از مقادیر نظیر حاصل از این تحقیق و برای سایر بازه‌های بزرگی، کمتر از آن است. در آئین‌نامه‌های

- Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology, Paper No. K1/6.
- Hanks, T. C. and Kanamori, H., 1979, A moment magnitude scale, *J. Geophys. Res.*, **84**, 2348-2350.
- Housner, G. W., 1959, Behavior of structures during earthquakes, *J. Eng. Mech. Div., ASCE*, 85(EM4), 109-129.
- Housner, G. W., 1973, Strong ground motion, chapter 4 in earthquake engineering, R. L. Wiegel (ed.), Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey.
- Joyner, W. B. and Boore, D. M., 1996, Recent developments in strong motion attenuation relationships, *Proceedings of the 28<sup>th</sup> Joint Meeting of the U.S.-Japan Cooperative*, 101-116.
- Kimball, J. K., 1983, The use of site dependent spectra, *U.S. Geol. Surv., Open File Report* 83-845, 401-422.
- Kramer, S. L., 1996, *Geotechnical earthquake engineering*, Prentice Hall.
- Naem, F., 2001, *The seismic design handbook*, 2nd edition, Kluwer Academic Publishers.
- Newmark, N. M. and Hall, W. J., 1973, *Procedures and criteria for earthquake resistant design, building practices for disaster mitigation*, National Bureau of Standards, Washington, D. C., *Building Sciences Series*, **46(1)**, 209-236.
- Mohraz, B., 1976, A study of earthquake response spectra for different geological conditions, *Bull. Seism. Soc. Am.*, **66**, 915-935.
- Seed, H. B., Ugas, C. and Lysmer, J., 1976, Site-dependent spectra for earthquake resistant design, *Bull. Seism. Soc. Am.*, **66**, 221-243.
- Seed, H. B. and Idriss, I. M., 1982, *Ground motion and soil liquefaction during earthquakes*, EERC, Monograph Series.
- Trifunac, M. D. and Todorovska, M. I., 2001, A note on the useable dynamic range of accelerographs recording translation, *Soil Dynamics and Engineering*, **21**, 275-286.
- U.S. Nuclear Regulatory Commission, 1989, *Design response spectra for seismic design of nuclear power plants, regulatory guide 1.60*, Washington, PP. 6.
- پایان نامه کارشناسی ارشد، مؤسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران.
- مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن، ۱۳۸۴، آیین نامه طرح ساختمانها در برابر زلزله، استاندارد ۲۸۰۰ ایران، ویرایش سوم.
- موسوی بفرئی، س. ح.، اسکندری قادی، م. و میرزائی، ن.، ۱۳۹۰، تعیین طیفهای طراحی افقی و قائم برای ساختمانهای سنگی براساس دادههای شتابنگاری ایران، م. فیزیک زمین و فضا، **۳۷(۴)**، ۳۷-۵۰.
- میرزائی، ن.، قیطانچی، م.، ناصریه، س.، رئیسی، م.، ظریفی، ز. و طبائی، ق.، ۱۳۸۱، پارامترهای مبنایی زمین لرزه‌های ایران، انتشارات دانش نگار.
- Ambraseys, N. N., Douglas, J., Sarma, S. K. and Smit, P. M., 2005, Equations for the estimation of strong ground motions from shallow crustal earthquakes using data from Europe and the Middle East, *Bull. Earthq. Eng.*, **3**, 1-53.
- Boore, D. M., 2002, Comments on baseline correction of digital strong motion data: examples from the 1999 Hector Mine, California, earthquake, *Bull. Seism. Soc. Am.*, **92**, 1543-1560.
- Boore, D. M. and Bommer, J. J., 2005, Processing of strong-motion accelerograms: needs, options and consequences, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, **25**, 93-115.
- Campbell, K. W. and Bozorgnia, Y., 2003, Updated near source ground motion relations for the horizontal and vertical component of peak ground acceleration and acceleration response spectra, *Bull. Seism. Soc. Am.*, **93**, 314-331.
- Elgamal, A. and He, L., 2004, Vertical earthquake ground motion records: an overview, *J. Earthq. Eng.*, **8(5)**, 663-697.
- Hall, W. J., Mohraz, B. and Newmark, N. M., 1975, *Statistical study of earthquake response spectra*, proceedings of 3rd International