

تعیین طیف‌های طراحی افقی و قائم برای ساختگاه‌های سنگی براساس داده‌های شتاب‌نگاری ایران

سید حسن موسوی بفرولی^{۱*}، مرتضی اسکندری قادی^۲ و نوربخش میرزائی^۳

^۱ دانشجوی دکتری زلزله‌شناسی، گروه فیزیک زمین، مؤسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران، ایران

^۲ دانشیار، گروه علوم پایه مهندسی، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران، ایران

^۳ دانشیار، گروه فیزیک زمین، مؤسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران، ایران

(دریافت: ۸۷/۷/۲۹، پذیرش نهایی: ۸۹/۱۱/۱۹)

چکیده

مطابق آئین‌نامه طرح ساختمان‌های مقاوم در برابر زلزله، استاندارد ۲۸۰۰ ایران، خاک‌ها به چهار دسته تقسیم شده‌اند. در این مقاله با توجه به افزایش نسبی داده‌های شتاب‌نگاری در سال‌های اخیر، طیف‌های طراحی افقی و قائم برای خاک نوع I (سنگ)، براساس داده‌های ایران تهیه می‌شود. به این منظور کلیه مؤلفه‌های غالب افقی و قائم شتاب‌نگاشت‌های مربوط به ایستگاه‌های مستقر بر خاک نوع I جمع‌آوری، تصحیح خط مبنا و فیلتر می‌شوند. همچنین همه شتاب‌نگاشت‌ها به حداکثر شتاب زمین مربوط به خودشان مقیاس می‌شوند. برطبق این داده‌ها کیفیت ۶۰ نگاشت قائم و ۷۱ نگاشت افقی قابل قبول بوده است که با استفاده از آنها طیف‌های پاسخ قائم و افقی برای هر شتاب‌نگاشت برای چهار نسبت میرایی (۲٪، ۵٪، ۱۰٪ و ۲۰٪) رسم شده‌اند. با میانگین‌گیری از طیف‌های پاسخ، طیف‌های طرح هموار نشده به دست آمد و طیف‌های طرح هموار شده در دو دستگاه مختصات سه‌جانبه در مقیاس لگاریتمی و مختصات قائم شتاب طیفی - تناوب رسم شده‌اند. این مراحل برای تابع میانگین به علاوه انحراف معیار طیف‌های پاسخ نیز صورت گرفته است. در پایان طیف طرح هموار شده به دست آمده با طیف‌های طرح محرز و آیین‌نامه ۲۸۰۰ ایران مقایسه شده است. نتیجه این تحقیق نشان می‌دهد که در مقایسه با طیف آئین‌نامه ۲۸۰۰ ایران، میزان شتاب وارد بر سازه روی ساختگاه سنگی، در تناوب‌های کم، بیشتر و در تناوب‌های زیاد کمتر است.

واژه‌های کلیدی: طرح ساختمان‌ها در برابر زلزله، طیف طرح، طیف پاسخ، ساختگاه‌های سنگی

Determination of horizontal and vertical design spectra for rock sites based on acceleration time histories in Iran

Mousavi-Bafrouei, S. H.¹, Eskandari-Ghadi, M.² and Mirzaei, N.³

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

² Associate Professor, Eng. Science Dept., Faculty of Engineering, University of Tehran, Iran

³ Associate Professor, Earth Physics Department, Institute of Geophysics, University of Tehran, Iran

(Received: 20 Oct 2008, Accepted: 8 Feb 2011)

Abstract

Based on the standards for design of structures, any structure should be designated for seismic loads and any combinations containing seismic loads. For spectral analysis of a structure, the site effect is taken into account by considering its effects on the design spectra. Because of different lateral and vertical stiffness of the soil layers underneath the structure, the design spectra are different from soil to soil. The stiffer the soil the higher the velocity results in. The shear and compressive wave velocities of the soil as continuum are criteria for categorizing the soil in stiffness point of view. Since, the structures are more affected by lateral forces than vertical ones, the shear wave velocity is more important than the compressive wave velocity. Moreover, the soil nearer to the

structure affects the structure more than the soil far from it. Thus, in the standards for design of structures, the mean shear wave velocity of the upper 30 m of the soil layer is used for categorizing the soil underneath the structure in stiffness point of view. In the Iranian code of practice for seismic resistant design of buildings, the standard number is 2800, the sites have been categorized into four different types, which are rock (with the mean shear wave velocity of the upper 30 m denoted as V_s larger than 750 m/sec), medium alluvium (where $350 \leq V_s < 750$ m/sec), soft alluvium (where $175 \leq V_s < 350$ m/sec), and very soft alluvium (with $V_s < 175$ m/sec). To analyze the structures using design response spectra, specified horizontal and vertical spectra are needed for each category. Because of the increase in the number of strong motion accelerograms in recent years, in this research the horizontal and vertical design spectra for the first category (the rock site) are prepared based on Iranian data. To do so, all the existing horizontal and vertical acceleration time histories in different stations fixed on rock sites are gathered. The data are filtered and baseline corrected by *Seismosignal* software to remove the noise frequency components and to modify the magnitude of both the displacement and velocity. In addition, all the data are normalized for the Peak Ground Acceleration (PGA). According to the data, the quality of 60 vertical time histories and 71 horizontal time histories were acceptable. With this data, both the vertical and the horizontal response spectra are prepared for each time history and for four different damping ratios, which are %2, %5, %10 and %20. Averaging the response spectra, the unsmoothed design spectra are obtained. The smoothed design spectra are plotted in tripartite coordinate system and spectral acceleration-time system, as well. These procedures are done for the average plus one standard deviation of vertical and horizontal response spectra. Finally, the smoothed design spectra from the data of this research are compared with that of the Iranian code of 2800 regulation and also the Mohraz design spectra. It is shown that the results are in good agreement with the Mohraz design spectra except that in long periods, the spectral acceleration obtained in this study is smaller. Comparing the result of this research with that of 2800 regulation, it is seen that in short periods, the spectral acceleration in this study is higher than that in the 2800 regulation, while for long periods, the spectral accelerations in this study is much less than that given in 2800 regulation. It means that in the category of short period structures more strengthen structures may be needed.

Key words: Seismic design, Design spectra, Response spectra, Rock sites, Acceleration time histories.

۱ مقدمه

می‌آید (آندرسون و همکاران، ۱۹۸۹). نمونه چنین طیفی را اولین بار در اواخر دهه ۵۰ میلادی هازنر (۱۹۷۰) پیشنهاد کرد که با در نظر گرفتن مؤلفه افقی ۴ زلزله بزرگ امریکا تهیه شده است. پس از آن طیف‌های طراحی چندی از سوی محققان گوناگون برای استفاده در مکان‌های خاص عرضه شده است که از آن جمله می‌توان به طیف طرح نیومارک و هال (۱۹۸۲) و طیف طرح محرز (۱۹۷۶) اشاره کرد که امروزه نیز مورد توجه است (نعیم، ۱۳۸۰).

با توجه به عملی نبودن پیش‌بینی دقیق زمان و مکان زلزله و تهدید بیشتر شهرها و مراکز مهم اقتصادی ایران به وقوع زلزله، اهمیت تدوین آیین‌نامه‌های دقیق‌تر و کامل‌تر طراحی سازه‌های مقاوم در برابر زلزله آشکار می‌شود. در طراحی سازه‌های مقاوم در برابر زلزله، از طیف‌های طراحی که برای نسبت‌های میرایی متفاوت عرضه می‌شود، استفاده می‌کنند و این طیف‌ها از میانگین‌گیری و هموار ساختن طیف‌های پاسخ زلزله که در شرایط خاک مشابه ثبت شده‌اند، به‌دست

(محرز، ۱۹۷۶). چون همه موارد فوق در زلزله‌ها و شرایط ساختگاه گوناگون، متفاوت هستند، نمی‌توان مبنای کار طراحی سازه‌ها را صرفاً طیف پاسخ یک زلزله قرارداد و منطقی به نظر می‌رسد برای هدف‌های طراحی از میانگین طیف‌های پاسخ زلزله‌های گوناگون استفاده شود. در هر تناوب با احتمال نزدیک به ۵۰ درصد، مقادیر طیفی بیشتر از مقدار میانگین است و بنابراین برای سازه‌های با اهمیت بیشتر می‌توان از مقادیری بیشتر از مقادیر میانگین، مانند مقادیر میانگین به اضافه یک برابر انحراف معیار استفاده کرد (آندرسون و همکاران، ۱۹۸۹). تبعیت داده‌های زلزله از توزیع نرمال را می‌توان با آزمون آماری کولموگوروف-اسمیرنوف (Klomagorov- Smirnov) بررسی کرد (فتوحی، ۱۳۸۱).

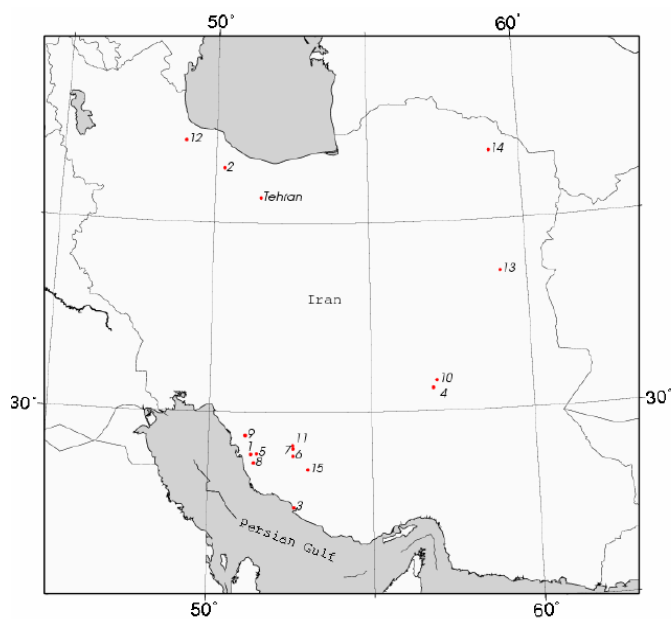
طیف طرح را اولین بار هازنر معرفی کرد (هازنر، ۱۹۷۰). در طول دهه ۷۰ دو طیف طراحی، یکی از سوی هازنر و دیگری از سوی نیومارک و هال پیشنهاد شد که هر دو به طور وسیع در عمل مورد استفاده قرار می‌گیرند (آندرسون و همکاران، ۱۹۸۹). هر دو این طیف‌ها براساس طیف پاسخ مولفه‌های افقی تعدادی از زلزله‌های ثبت شده واقعی به دست آمده‌اند.

تقسیم‌بندی خاک‌ها به چهار نوع طبق آیین‌نامه ۲۸۰۰ ایران ما را بر آن داشت تا به طور جداگانه برای هر نوع خاک، طیف‌های طراحی تهیه کنیم. در این مقاله که با هدف تعیین طیف‌های طراحی افقی و قائم برای ساختگاه‌های سنگی براساس داده‌های ایران به انجام رسیده است، از شتاب‌نگاشت‌های ثبت شده در ایستگاه‌های مستقر روی سنگ که سرعت موج برشی آن بیش از ۷۵۰ متر بر ثانیه است، استفاده شده است. در شکل ۱ موقعیت این ایستگاه‌ها و در جدول (۱) اسامی و سرعت موج برشی در محل آنها مشخص شده است.

در آیین‌نامه ۲۸۰۰ ایران چهار نوع خاک: I، II، III و IV معرفی شده است (مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن، ۱۳۸۴). خاک نوع I سنگ‌ها یا خاک‌های سخت با ضخامت کم روی بستر سنگی، خاک نوع II سنگ‌های سست یا خاک‌های سخت با ضخامت زیاد روی بستر سنگی، خاک نوع III سنگ‌های هوازده یا خاک‌های تراکم یا سختی متوسط و خاک نوع IV خاک‌های نرم یا رُس مرطوب هستند. سرعت موج برشی در انواع خاک‌های فوق به ترتیب بیشتر از ۷۵۰ متر بر ثانیه، بین ۷۵۰ و ۳۷۵ متر بر ثانیه، بین ۳۷۵ و ۱۷۵ متر بر ثانیه و در نهایت کمتر از ۱۷۵ متر بر ثانیه است. این پژوهش با هدف تعیین طیف‌های طراحی افقی و قائم برای ساختگاه‌های سنگی (خاک نوع I) براساس داده‌های ایران صورت می‌گیرد. به این منظور شتاب‌نگاشت‌های مربوط به خاک نوع I جدا شده‌اند، مؤلفه قائم و مؤلفه افقی غالب آنها مورد تصحیح خط مبنا و فیلتر قرار گرفته و نیز مقیاس شده‌اند. طیف‌های پاسخ آنها نیز رسم شده است که از میان آنها طیف‌های پاسخ با کیفیت قابل قبول در تهیه طیف طرح، مورد استفاده قرار گرفته‌اند. با محاسبه میانگین و انحراف معیار مقادیر طیفی، طیف‌های طراحی سه‌جانبه حرکت‌های قائم و افقی برای میانگین و میانگین به علاوه یک انحراف معیار در مقیاس لگاریتمی، برای چهار نسبت میرایی (۲٪، ۵٪، ۱۰٪ و ۲۰٪) به دست آمده است. مقایسه نتایج با آیین‌نامه ۲۸۰۰ ایران نشان می‌دهد که مقادیر طیفی شتاب برای تناوب‌های کوچک، بزرگ‌تر از مقادیر آیین‌نامه‌ای و برای تناوب‌های بزرگ، کوچک‌تر از مقادیر آیین‌نامه‌ای است.

۲ شتاب‌نگاشت‌ها

عامل‌های فراوانی از جمله شرایط خاک محل، بزرگی زلزله، مدت دوام زلزله، فاصله تا محل وقوع و ویژگی‌های چشمه زلزله، همگی بر طیف پاسخ زلزله اثر می‌گذارند



شکل ۱. موقعیت ایستگاه‌های مستقر بر ساختگاه‌های سنگی استفاده شده در این مقاله.

جدول ۱. نام ایستگاه‌های شتاب‌نگاری و سرعت موج برشی در آنها (سینائیان، ۱۳۸۵).

ردیف	نام ایستگاه	استان	سرعت موج برشی (m/s)	تعداد نگاشت‌های مورد استفاده
۱	اهرم	بوشهر	۹۸۸	۶
۲	آلولک	قزوین	۱۴۵۸	۱
۳	بندر عسلویه	بوشهر	۸۵۸	۲
۴	چترود	کرمان	۸۵۲	۲
۵	فاریاب	بوشهر	۸۲۸	۵
۶	فیروزآباد	فارس	۸۹۴	۹
۷	جوکان	فارس	۱۰۲۱	۳
۸	خورموج	بوشهر	۹۱۹	۶
۹	سعدآباد	بوشهر	۹۲۱	۱۵
۱۰	سد شیرینرود	کرمان	۸۲۴	۶
۱۱	زنجیران	فارس	۹۳۶	۳۱
۱۲	ماسوله	گیلان	۹۵۶	۲
۱۳	قائن	خراسان جنوبی	۸۸۹	۲
۱۴	رادکان	خراسان رضوی	۱۰۰۸	۱
۱۵	قیر	فارس	۱۰۹۷	۱

۳ پردازش داده‌ها

ایستگاه‌های گوناگون در اختیار است، به کار بردن روش‌های جداگانه برای تصحیح خط منبای هر یک از آنها امری شدنی نیست، به این دلیل بعد از زلزله ۱۹۹۹ هکتور ماین، مراحل زیر به منظور تصحیح نگاشت‌ها مورد

قبل از رسم طیف پاسخ، تصحیح خط مبنا و اعمال فیلتر روی شتاب‌نگاشت‌ها لازم است. چرا که گاهی شتاب‌نگاشت‌های خام با تغییر مکان و سرعت پایدار همراه هستند. هنگامی که تعداد زیادی شتاب‌نگاشت از

توافق قرار گرفت (بور، ۲۰۰۱، ۲۰۰۲):

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

در مواردی که ایستگاه شتاب‌نگاری در نزدیکی محل وقوع زمین‌لرزه باشد، تغییر مکان پایدار در آن ایجاد می‌شود و اثر آن در نمودارهای سرعت-زمان و جابه‌جایی-زمان پدیدار می‌شود (بور، ۲۰۰۲). در این پژوهش در مواردی که تغییر مکان پایدار مشاهده شده است علاوه بر برازش چندجمله‌ای درجه ۱ یا ۲ به سری‌های زمانی سرعت و حذف مشتق آن از سری زمانی شتاب از فیلتر بالاگذر برای حذف بسامدهای پایین نیز استفاده شده است و نتیجه اعمال آنها در سری‌های زمانی سرعت و جابه‌جایی، مطلوب دیده شده است.

به منظور به دست آوردن بسامدهای قطع لازم برای فیلتر کردن نباید به نسبت سیگنال به نوفه اکتفا کرد زیرا این نسبت به میزان زیادی بستگی به انتخاب پنجره‌های سیگنال و نوفه دارد و انتخاب آنها با عدم قطعیت زیادی همراه است (سینائیان، ۱۳۸۵). علاوه بر این برای داده‌های ثبت شده با دستگاه‌های SMA-1 به دلیل ثبت نشدن ابتدای حرکت (قبل از رسیدن به آستانه حرکت)، پنجره نوفه را

نمی‌توان تعیین کرد. پس برای به دست آوردن این دو بسامد، از طیف فوریه شتاب (محورها با مقیاس لگاریتمی) استفاده می‌شود. محدوده بسامدی طیف فوریه ایدئال شتاب‌نگاشت شامل بسامد گوشه (f_c) در بسامد پایین و بسامد بیشینه (f_{max}) در بسامد بالا است [۳]. در محدوده بین f_c و f_{max} دامنه ثابت و در بسامدهای کمتر از f_c یا بیشتر از f_{max} دامنه به صورت خطی کاهش می‌یابد. هرگونه انحراف از این شکل ایدئال برای طیف که معمولاً خارج از محدوده f_c تا f_{max} اتفاق می‌افتد، نشان از 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 (سینائیان، ۱۳۸۵ و کرامر، ۱۹۹۶).

به منظور فیلتر کردن شتاب‌نگاشت‌های ثبت شده با دستگاه‌های آنالوگ SMA-1 از یک فیلتر میان‌گذر استفاده شده است و بسامد قطع (f_L) برای هر مؤلفه هر شتاب‌نگاشت به طور جداگانه و به کمک طیف فوریه با مقیاس لگاریتمی، تعیین و بسامد قطع (f_H)، حداکثر برابر ۲۵ هرتز در نظر گرفته شده است؛ چرا که دقت بسامد بالا براساس بسامد طبیعی مبدل و رقمی کردن نیمه‌دستی برای این نوع داده‌ها حدود ۲۵ هرتز است (سینائیان، ۱۳۸۵).

در اینجا بیشتر از داده‌های ثبت شده با دستگاه‌های رقمی SSA-2 استفاده شده است که بیشتر داده‌های آن با فیلتر بالاگذر فیلتر شدند. بسامد قطع (f_L) برای هر مؤلفه هر شتاب‌نگاشت به طور جداگانه و به کمک طیف فوریه با مقیاس لگاریتمی آن تعیین و در فیلتر بالاگذر برای تصحیح شتاب‌نگاشت استفاده شده است. با توجه به کمتر بودن تضعیف فیلتر بسل در باند توقف نسبت به فیلتر باترورت با همان مرتبه و واپیچش‌های موجود در باند گذر یا باند توقف در فیلترهای چیبیشوف و بیضوی کاربران ترجیح می‌دهند از فیلتر باترورت استفاده کنند (جبه‌دار

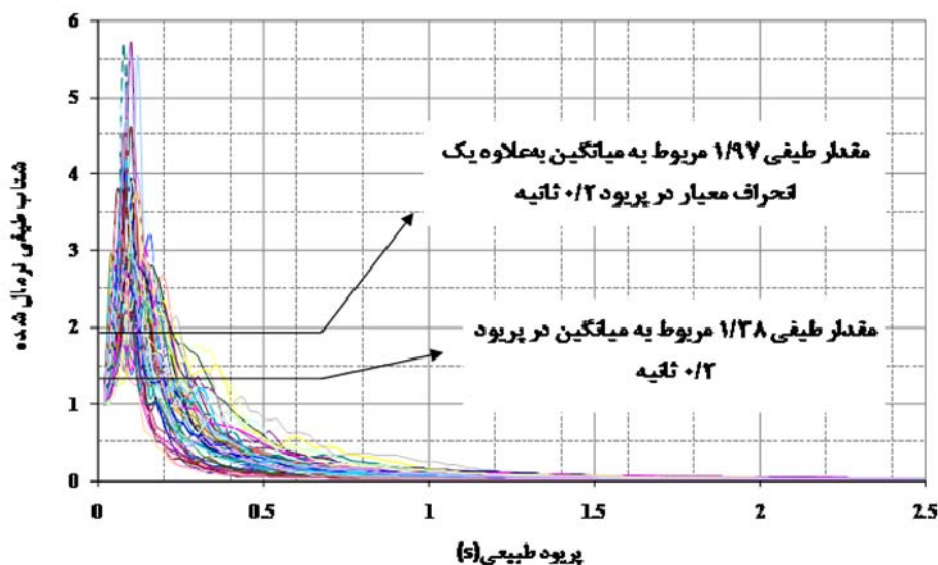
مارلانی، ۱۳۶۸). در این پژوهش از فیلتر باترورت مرتبه ۴ بهره گرفته شده است.

۴ طیف‌های طراحی

پس از تصحیح خط مبنا و فیلتر کردن داده‌ها، تعداد ۷۱ شتاب‌نگاشت غالب افقی و ۶۰ شتاب‌نگاشت قائم در اختیار بوده به طوری که بیشینه شتاب زمین در مورد آنها متفاوت است. چون بیشینه شتاب، بیشینه سرعت و بیشینه جابه‌جایی زمین برای داده‌های ثبت شده زمین‌لرزه‌های گوناگون با یکدیگر اختلاف دارند، نباید از پاسخ محاسبه شده به طور مطلق میانگین گرفت، از روش‌های متفاوتی برای بهنجار کردن طیف‌های پاسخ قبل از میانگین‌گیری، استفاده شده است. در میان این روش‌ها، دو روش که بیشتر از همه استفاده می‌شوند عبارت‌اند از: (۱) بهنجار کردن بر طبق شدت طیف، که در آن سطوح زیر طیف‌هایی که بین دو بسامد یا دوره تناوب مشخص قرار دارند، با هم برابر قرار داده می‌شوند و (۲) بهنجار کردن بر طبق بیشینه حرکت زمین، که در آن عرض نقاط طیفی بر بیشینه شتاب، بیشینه سرعت یا بیشینه جابه‌جایی زمین تقسیم می‌شود (آندرسون و همکاران، ۱۹۸۹). به‌منظور

عملی ساختن محاسبات یکسان و تعیین میانگین و انحراف معیار آنها، این داده‌ها با استفاده از روش دوم بهنجار شده‌اند. پس از مراحل تصحیح خط مبنا، فیلتر و بهنجار کردن شتاب‌نگاشت‌ها، طیف‌های پاسخ برای چهار نسبت میرایی ۲٪، ۵٪، ۱۰٪ و ۲۰٪ به دست آمده‌اند. در نتیجه تعداد ۷۱ طیف پاسخ افقی و ۶۰ طیف پاسخ قائم تهیه شده که به طور جداگانه برای تهیه طیف طرح از آنها استفاده شده است.

در شکل ۲ طیف‌های پاسخ به دست آمده از ۷۱ شتاب‌نگاشت افقی بهنجار شده مربوط، به ازای نسبت میرایی ۵٪ در یک نمودار آمده‌اند. در هر تناوب به منظور بررسی نرمال بودن توزیع مقادیر، داده‌ها به نرم‌افزار آماری SPSS16 منتقل شده‌اند و با رسم نمودار P-P (شکل ۳) و اجرای آزمون کولموگوروف-اسمیرنوف (Kolmogorov-Smirnov) مشخص شده است که انطباق خوبی بین توزیع داده‌ها و توزیع نرمال وجود دارد. در اینجا برای نمونه نمودار P-P و نتایج آزمون کولموگوروف-اسمیرنوف مربوط به مقادیر طیفی در تناوب ۰/۲ ثانیه آورده می‌شود.



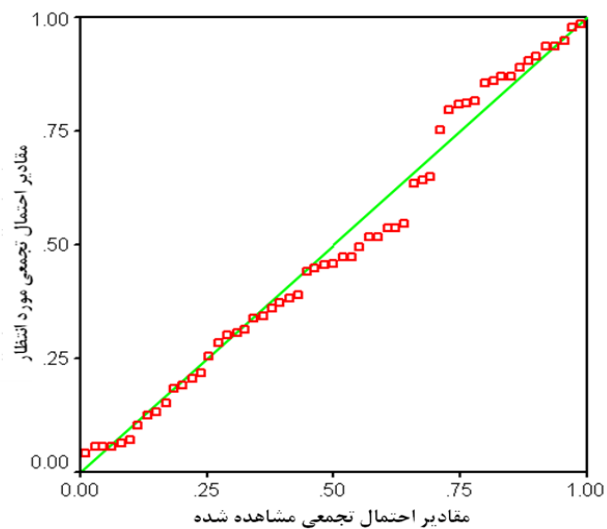
شکل ۲. طیف‌های پاسخ مربوط به شتاب‌نگاشت‌های افقی برای نسبت میرایی ۵٪.

داد که مقدار احتمال به‌دست آمده برابر $0/59$ بوده و از سطح خطای مفروض ($0/05$) بزرگ‌تر است. بنابراین به لحاظ آماری می‌توان گفت که توزیع مقادیر طیفی در تناوب $0/2$ ثانیه در سطح خطای $0/05$ دارای اختلاف قابل توجه و معناداری با توزیع نرمال نیست و در حد قابل قبولی با آن منطبق است.

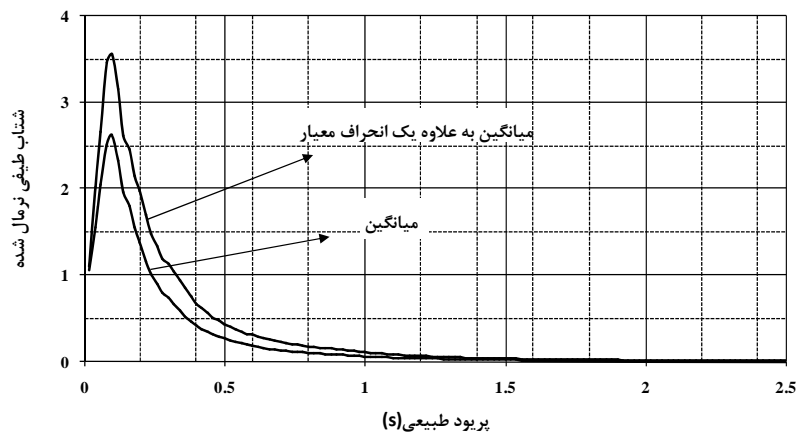
در تناوب $2/$ ثانیه میانگین مقادیر طیفی برابر $1/38$ و انحراف معیار آن برابر $0/58$ است. به همین صورت مقادیر میانگین و انحراف معیار در تمام تناوب‌ها به‌دست آمده است. شکل ۴ طیف‌های شتاب افقی میانگین و میانگین به‌علاوه یک انحراف معیار را برای نسبت میرایی 5% نشان می‌دهد.

(الف) شکل ۳ نشان می‌دهد که مقادیر احتمال تجمعی مشاهده شده تا چه اندازه بر مقادیر احتمال تجمعی موردانتظار (در اینجا توزیع نرمال) منطبق است. اگر نقاط در اطراف خط نیمساز قرار گیرند و انحراف عمده از خط نداشته باشند، فرض نرمال بودن داده‌ها را می‌پذیریم. البته انحراف جزئی نقاط از قسمت بالا و پایین خط نیمساز، چندان تعیین‌کننده نیست. نمودار زیر مربوط به مقادیر طیفی در تناوب $0/2$ ثانیه است که انطباق نسبی داده‌ها با توزیع نرمال را آشکار می‌کند.

(ب) نتیجه اجرای آزمون کولموگوروف - اسمیرنوف روی مقادیر طیفی در تناوب $0/2$ ثانیه نیز نشان



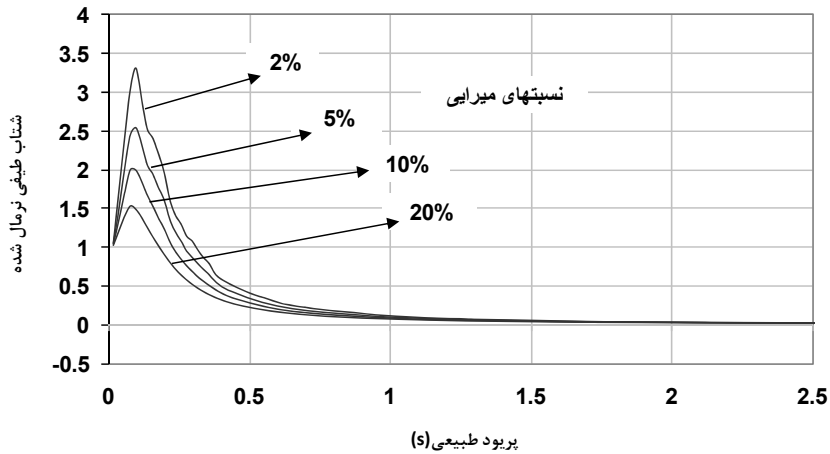
شکل ۳. نمودار مقایسه توزیع داده‌ها (observed) و توزیع نرمال (Expected) مقادیر طیفی در تناوب $0/2$ ثانیه.



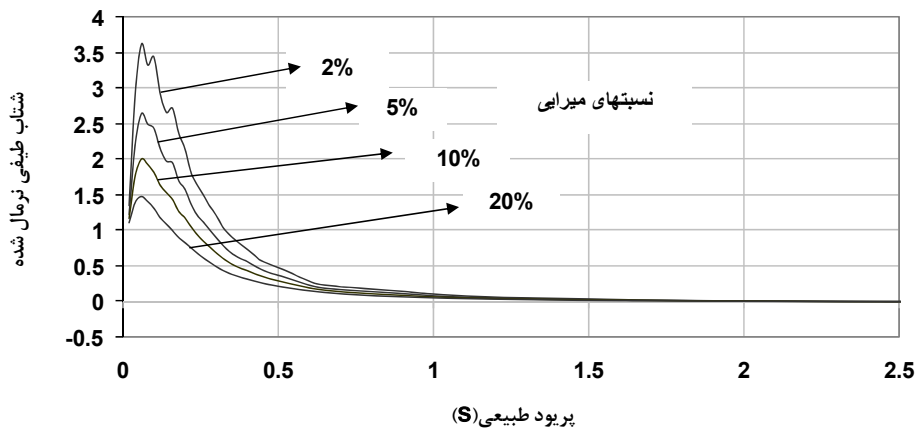
شکل ۴. طیف پاسخ شتاب افقی میانگین و میانگین به علاوه یک انحراف معیار برای نسبت میرایی 5% .

به دست آمده از میانگین به علاوه انحراف معیار داده‌ها نیز با روش مشابه برای چهار نسبت میرایی رسم شده‌اند، که نتیجه آن در شکل‌های ۷ و ۸ نشان داده شده است.

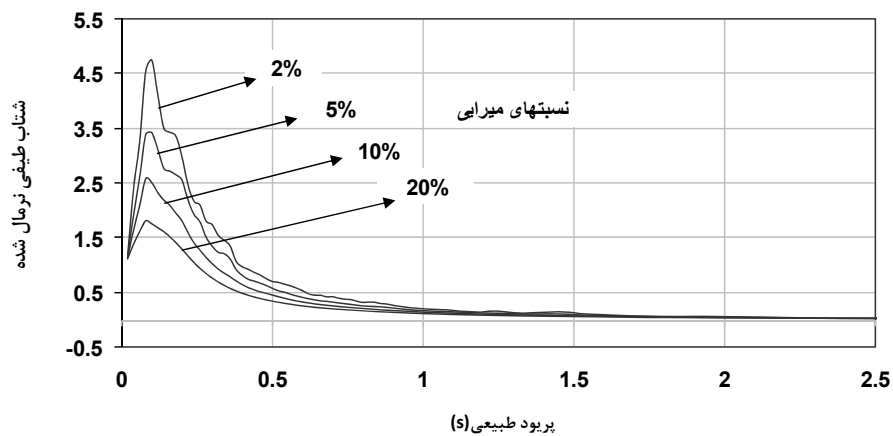
با میانگین‌گیری از داده‌های طیف پاسخ بهنجار شده، طیف‌های پاسخ شتاب افقی و قائم برای ۴ نسبت میرایی رسم شده‌اند که نتیجه آن در شکل‌های ۵ و ۶ آمده است. طیف‌های پاسخ شتاب افقی و قائم



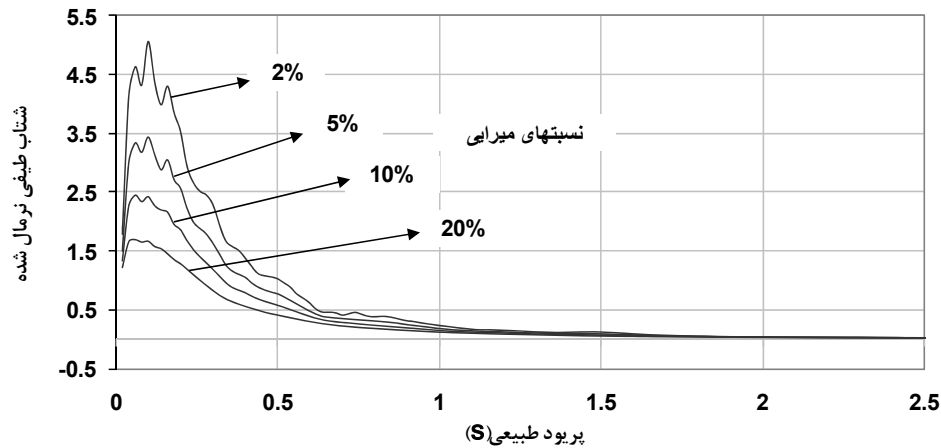
شکل ۵. میانگین طیف پاسخ شتاب افقی براساس داده‌های مؤلفه افقی ثبت شده در ایستگاه‌های مستقر بر ساختمان‌های سنگی ایران.



شکل ۶. میانگین طیف پاسخ شتاب قائم براساس داده‌های مؤلفه قائم ثبت شده در ایستگاه‌های مستقر بر ساختمان‌های سنگی ایران.



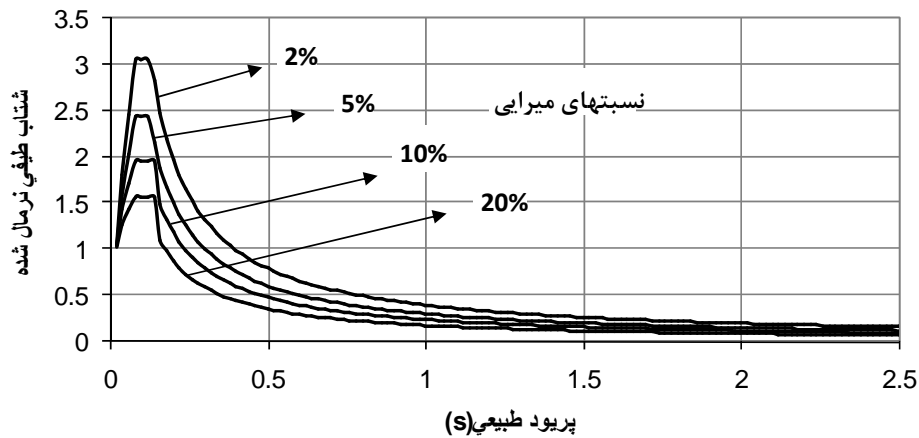
شکل ۷. میانگین به علاوه یک انحراف معیار طیف پاسخ شتاب افقی براساس داده‌های مؤلفه افقی ثبت شده در ایستگاه‌های مستقر بر ساختمان‌های سنگی ایران.



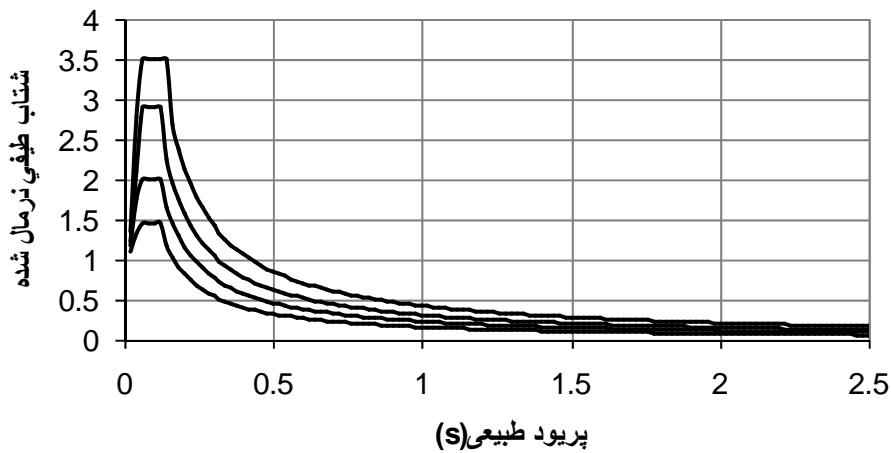
شکل ۸. میانگین به‌علاوه یک انحراف معیار طیف پاسخ شتاب قائم براساس داده‌های مؤلفه قائم ثبت شده در ایستگاه‌های مستقر بر ساختگاه‌های سنگی ایران.

می‌شوند. در هموار کردن طیف‌ها، مقادیر قله در تناوب قله با عدم قطعیت حد اقل $\pm 0/15$ برابر تناوب قله پهن شده‌اند.

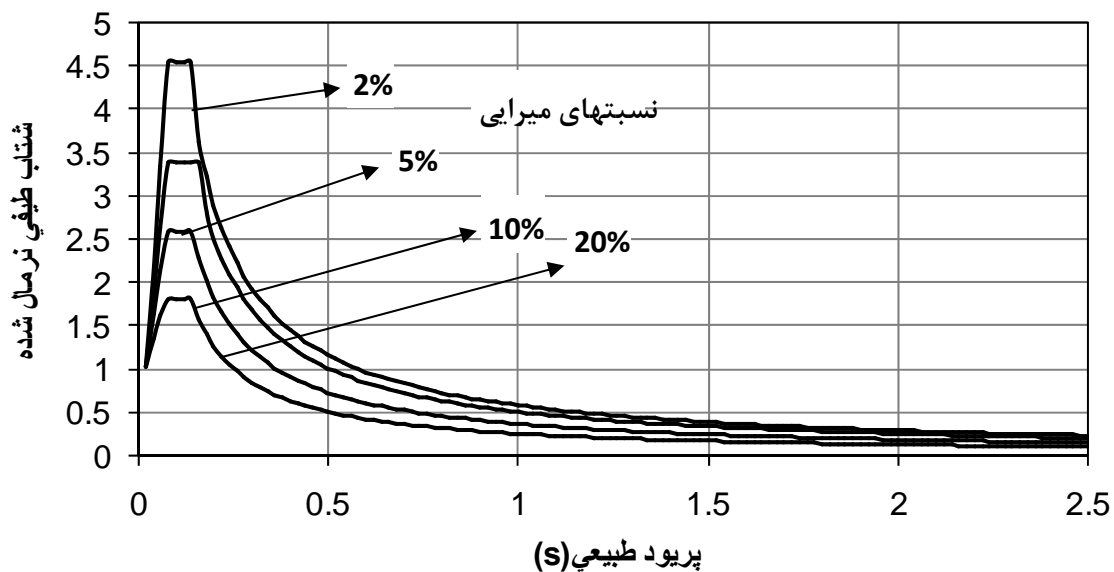
با هموار کردن طیف‌های پاسخ شتاب که در شکل‌های ۵ تا ۸ نشان داده شده‌اند، طیف‌های طراحی به‌دست می‌آیند که به ترتیب در شکل‌های ۹ تا ۱۲ دیده



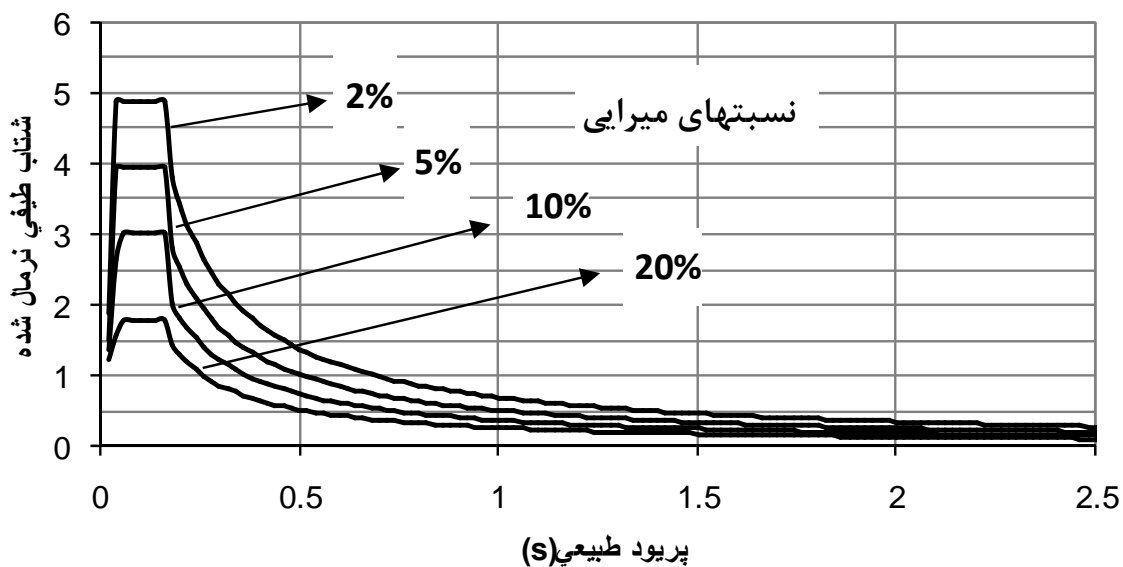
شکل ۹. طیف طرح شتاب افقی براساس میانگین داده‌های مؤلفه افقی ثبت شده در ایستگاه‌های مستقر بر ساختگاه‌های سنگی ایران.



شکل ۱۰. طیف طرح شتاب قائم براساس میانگین داده‌های مؤلفه قائم ثبت شده در ایستگاه‌های مستقر بر ساختگاه‌های سنگی ایران.



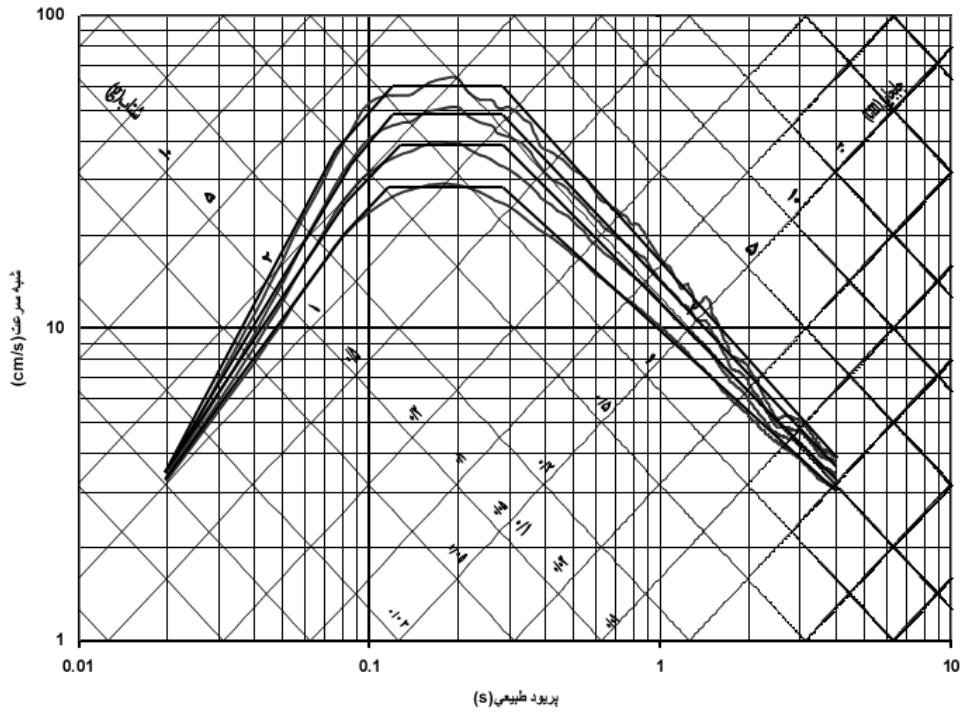
شکل ۱۱. طیف طرح شتاب افقی براساس میانگین به علاوه انحراف معیار داده‌های مؤلفه افقی ثبت شده در ایستگاه‌های مستقر بر ساختمانهای سنگی ایران.



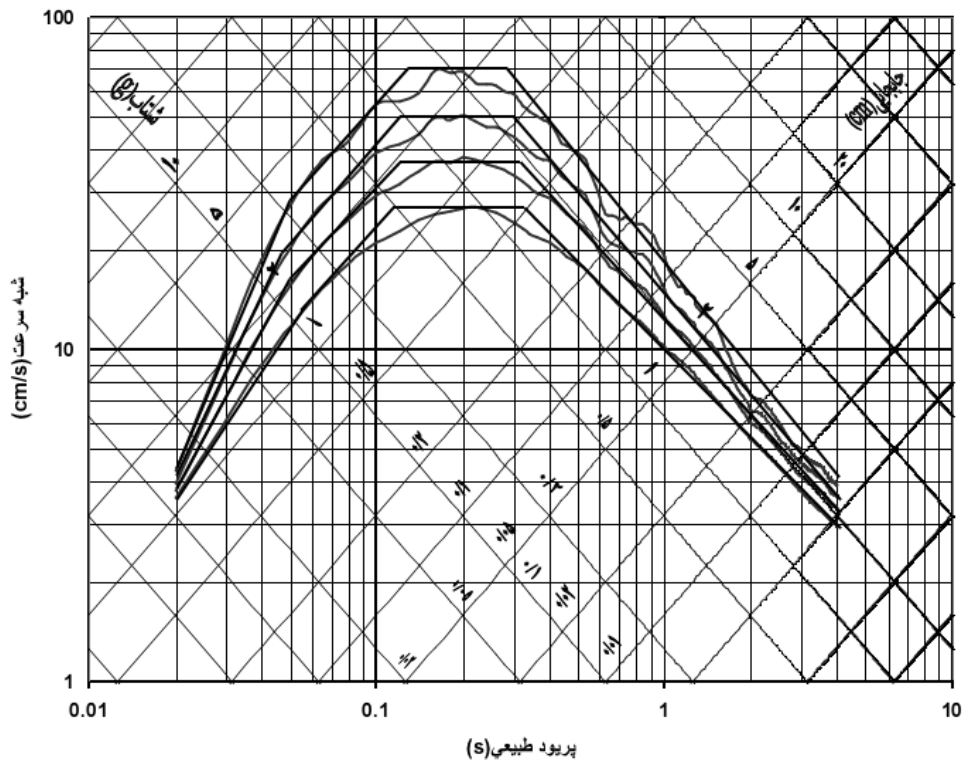
شکل ۱۲. طیف طرح شتاب قائم بر اساس میانگین به علاوه انحراف معیار داده‌های مؤلفه قائم ثبت شده در ایستگاه‌های مستقر بر ساختمانهای سنگی ایران.

به دست آمده‌اند. طیف‌های طرح به دست آمده از میانگین به علاوه انحراف معیار داده‌ها نیز با روش مشابه برای چهار نسبت میرایی رسم شده، که در شکل‌های ۱۵ و ۱۶ نشان داده شده است.

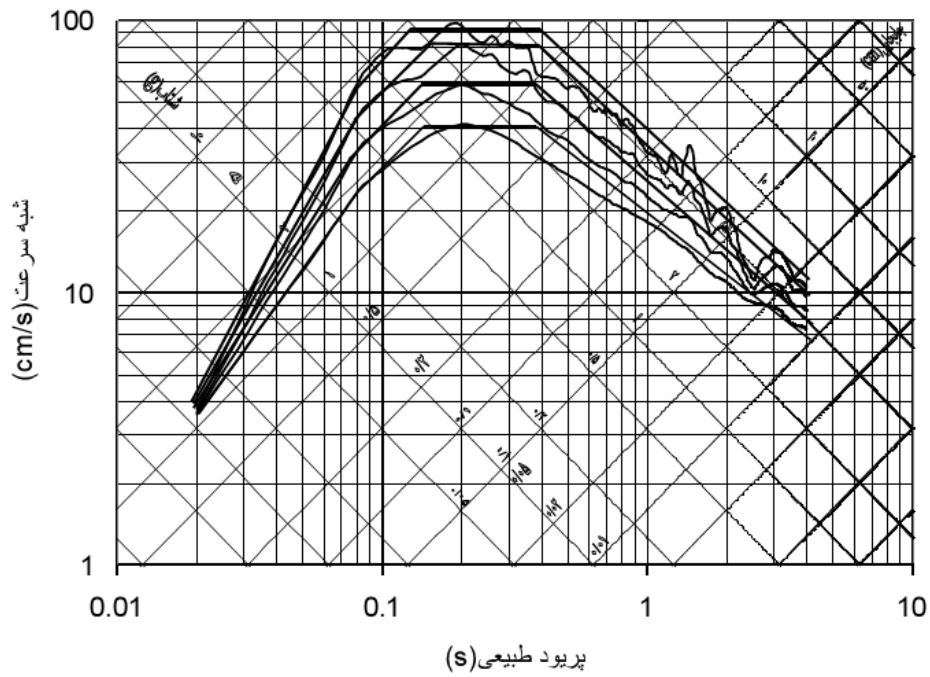
به کمک میانگین داده‌های شبه سرعت و رسم آنها در نمودارهای سه‌جانبه و سپس برازش خطوط به بخش‌های گوناگون طیف با روش کمترین مربعات، طیف‌های طرح افقی و قائم برای چهار نسبت میرایی، مطابق شکل‌های ۱۳ و ۱۴



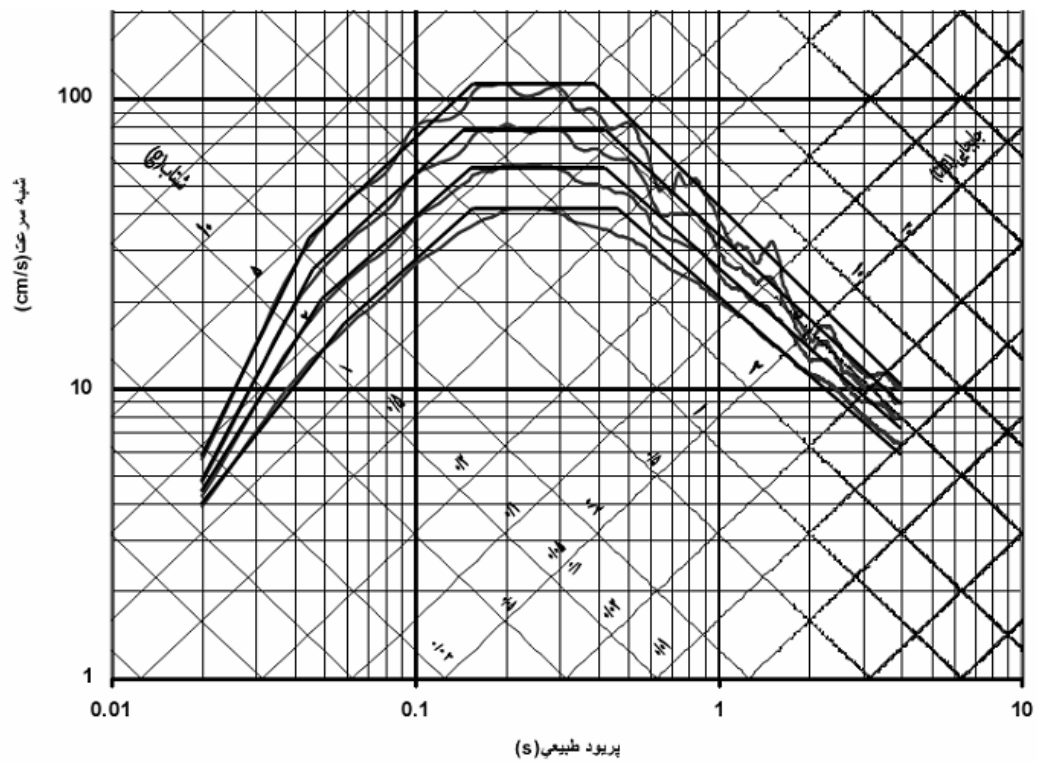
شکل ۱۳. طیف طرح سه جانبه افقی براساس میانگین شتاب‌نگاشت‌های مؤلفه افقی ثبت شده در ایستگاه‌های مستقر بر ساختگاه‌های سنگی ایران (به ترتیب از بالا به پایین برای نسبت‌های میرایی ۲٪، ۵٪، ۱۰٪ و ۲۰٪).



شکل ۱۴. طیف طرح سه جانبه قائم براساس میانگین شتاب‌نگاشت‌های مؤلفه قائم ثبت شده در ایستگاه‌های مستقر بر ساختگاه‌های سنگی ایران (به ترتیب از بالا به پایین برای نسبت‌های میرایی ۲٪، ۵٪، ۱۰٪ و ۲۰٪).



شکل ۱۵. طیف طرح سه‌جانبه افقی براساس میانگین به‌علاوه انحراف معیار شتاب‌نگاشت‌های مؤلفه افقی ثبت شده در ایستگاه‌های مستقر بر ساختگاه‌های سنگی ایران (به‌ترتیب از بالا به پایین برای نسبت‌های میرایی ۲٪، ۵٪، ۱۰٪ و ۲۰٪).



شکل ۱۶. طیف طرح سه‌جانبه قائم براساس میانگین به‌علاوه انحراف معیار شتاب‌نگاشت‌های مؤلفه قائم ثبت شده در ایستگاه‌های مستقر بر ساختگاه‌های سنگی ایران (به‌ترتیب از بالا به پایین برای نسبت‌های میرایی ۲٪، ۵٪، ۱۰٪ و ۲۰٪).

۵ مقایسه طیف طرح به‌دست آمده در این مقاله با

طیف‌های طرح محرز و آیین‌نامه ۲۸۰۰ ایران

چون در آیین‌نامه ۲۸۰۰ ایران کلیه ساختمان‌ها با فرض میرایی ۵٪ طرح می‌شوند و فقط طیف طرح برای نسبت میرایی ۵٪ آورده شده است، طیف طرح به‌دست آمده در این مقاله با میرایی ۵٪ با طیف‌های طرح محرز و آیین‌نامه ۲۸۰۰ ایران، برای خاک نوع I (ساختگاه‌های سنگی)، مقایسه می‌شود. همان‌طور که در شکل ۱۷ نشان داده شده است، دامنه طیفی شتاب حاصل از این تحقیق، نسبت به مقدار متناظر آن در دستورالعمل آیین‌نامه ۲۸۰۰ ایران و همچنین نسبت به مقدار متناظر آن در طیف طرح محرز، در تناوب‌های کوچک، بزرگ‌تر بوده است و در تناوب‌های بلند، کوچک‌تر است و سریع‌تر میرا می‌شود.

۶ بحث و نتیجه‌گیری

با توجه به طیف‌های طرح به‌دست آمده از شتاب‌نگاشت‌های ثبت شده در ایستگاه‌های مستقر بر ساختگاه سنگی، که در بخش قبل به تفصیل شرح داده شد، نتایج زیر حاصل شده است:

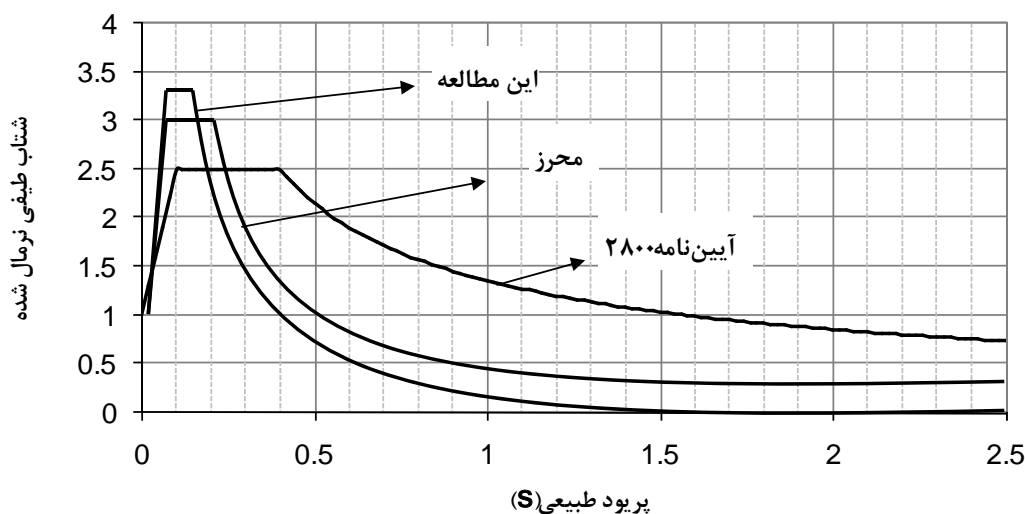
- مقادیر طیفی مربوط به تناوب‌های کمتر از ۰/۲ ثانیه، بیشتر از مقادیر پیش‌بینی شده در آیین‌نامه ۲۸۰۰ ایران

است.

- سازه‌های با تناوب طبیعی بیشتر از یک ثانیه را می‌توان با در نظر گرفتن درجه اهمیت سازه و ملاحظات اقتصادی با مقاومت کمتر از مقدار در نظر گرفته شده در آیین‌نامه ۲۸۰۰ ایران، طراحی کرد.

- میانگین سرعت موج برشی در ایستگاه‌هایی که از نگاشت آنها استفاده شده، ۹۲۵ متر بر ثانیه است و این مقدار از حد پایین لایه سنگی تعریف شده در آیین‌نامه ۲۸۰۰ ایران بیشتر است. این موضوع باعث کاهش بیشتر طیف طرح در تناوب‌های بلند نسبت به طیف طرح آیین‌نامه‌ای شده است. به منظور استفاده از نتایج این تحقیق در آیین‌نامه‌ها، منطقی است که دامنه این بخش از طیف، افزایش داده شود.

- با توجه به اینکه تعداد شتاب‌نگاشت‌های قابل استفاده مربوط به گروه خاک I چندان زیاد نبود؛ به طوری که به دلیل بانک داده‌های محدود برای هر زمین‌لرزه فقط یک نگاشت آن قابل استفاده بوده است و همچنین در مورد بسیاری از شتاب‌نگاشت‌ها، اطلاعات مربوط به مشخصات زمین‌لرزه‌های مربوط، کامل و قابل اعتماد نیستند، امکان در نظر گرفتن اثر میدان نزدیک در آنها وجود نداشته است.



شکل ۱۷. مقایسه طیف‌های طراحی این پژوهش، محرز و آیین‌نامه ۲۸۰۰ ایران.

- Kramer, S. L., 1996, Geotechnical Earthquake Engineering, Prentice Hall.
- Mohraz, B., 1976, A Study of Earthquake Response Spectra for Different Geological Conditions, Bull. Seism. Soc. Am., **66**, 915-935.
- Newmark, N. M. and Hall, W. J., 1982, Earthquake Spectra and Design, Earthquake Engineering Research Institute, Berkeley, California.

تقدیر و تشکر

از مؤسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران به خاطر فراهم ساختن امکانات تحقیق و از مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن برای در اختیار گذاردن داده‌های شتاب‌نگاری، صمیمانه قدردانی می‌کنیم. از آقای علیرضا بابایی به خاطر همفکری صمیمانه در مراحل اجرای این تحقیق سپاسگزاریم.

منابع

- مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن، آیین‌نامه طراحی ساختمان‌ها در برابر زلزله، استاندارد ۲۸۰۰، ویرایش سوم، ۱۳۸۴.
- نعیم، ف.، ۱۳۸۰، طراحی سازه‌های ضد زلزله، ترجمه علی شریفی و رسول میرقادری، مرکز نشر دانشگاهی، تهران.
- جبه‌دار مارلانی، پ.، ۱۳۶۸، سیگنال‌ها و سیستم‌ها، چاپ اول، انتشارات دانشگاه تهران.
- سینائیان، ف.، ۱۳۸۵، پژوهشی بر جنبش شدید زمین در ایران از کاتالوگ تا روابط کاهیدگی، پایان‌نامه دکتری، پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله.
- فتوحی اردکانی، ا.، ۱۳۸۱، کتاب آموزشی SPSS 10، انتشارات شایگان، چاپ سوم.
- Anderson, James c. and Naeim, F., 1989, The Seismic Design Handbook, Van Nostrand Reinhold, New York.
- Boore, D. M., 2001, Effect of Baseline Corrections on Displacements and Response Spectra for Several Recordings of the 1999 Chi-Chi, Taiwan, Earthquake, Bull. Seism. Soc. Am., **91**, 1199-1211.
- 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.
- Housner, G. W., 1970, Design Spectrum, Chapter 5 in Earthquake Engineering, R. L. Wiegel, Editor, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, N. J.