

تحلیل خطر لرزه‌ای احتمالاتی و تهیه طیف خطر یکنواخت استان بوشهر با فرض مدل هندسی خطی چشمه‌های لرزه‌زا

امین کشاورز^{۱*}، بتول منصوری مقدم^۲

۱- استادیار، دانشکده مهندسی، دانشگاه خلیج فارس، بوشهر، ایران
۲- کارشناسی ارشد مهندسی عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه خلیج فارس، بوشهر، ایران

چکیده

یافته‌های علمی نشان می‌دهند که با استفاده از روش‌های آماری و احتمالی تحت عنوان تحلیل خطر لرزه‌ای، می‌توان ایمن بودن سازه‌ها در مقابل زمین‌لرزه را تا حد مطلوبی برآورد نمود. مطالعه حاضر، نتایج این تحلیل را با استفاده از رهیافت احتمالی و در مواردی با استفاده از رهیافت تعیینی ارائه می‌دهد. این مطالعات به منظور بررسی وضعیت لرزه‌خیزی در استان بوشهر و با انتخاب گستره طرحی به شعاع ۱۵۰ کیلومتر از مرزهای استان صورت گرفته است. بدین منظور منابع لرزه‌زا در گستره طرح با استفاده از نقشه‌های موجود، تعیین و سپس مدل مناسب از چشمه‌های لرزه‌زا به صورت خطی در منطقه ارائه شده است. فهرست زمین‌لرزه‌های روی داده در محدوده مطالعاتی از طریق اسناد تاریخی و ثبت دستگاهی جمع‌آوری شده و با استفاده از روش‌هایی، نواقص موجود در این کاتالوگ مرتفع گردیده است. دستیابی به توزیع پواسونی با به‌کارگیری روش پنجره زمانی- مکانی گاردنر و نوپوف و حذف پس‌لرزه‌ها و پیش‌لرزه‌ها انجام شده است. در ادامه با استفاده از روش‌های کیکو و گوتنبرگ- ریشتر، پارامترهای لرزه‌خیزی محاسبه و پس از انجام بررسی‌هایی بهترین نتایج انتخاب شده‌اند. در نهایت پارامترهای مذکور، با توجه به توان لرزه‌زایی هر گسل به گسل‌های منطقه اختصاص داده می‌شود. پس از ترکیب منابع لرزه‌زا و استفاده از روابط کاهندگی مناسب، تحلیل خطر لرزه‌ای صورت گرفته است. خروجی‌ها به صورت طیف خطر یکنواخت با استفاده از روش‌های تعیینی و احتمالی خطر لرزه‌ای، برای شهرهای مهم استان ارائه شده است. در نهایت نقشه پهنه‌بندی خطر لرزه‌ای برای دوره بازگشت‌های ۷۵، ۴۷۵ و ۲۴۷۵ سال ترسیم شده است.

کلمات کلیدی: تحلیل خطر لرزه‌ای، استان بوشهر، پهنه‌بندی، طیف خطر یکنواخت، احتمالاتی.

شناسه دیجیتال:	سابقه مقاله:				
	دریافت	بازنگری	پذیرش	انتشار آنلاین	چاپ
doi: 10.22065/jsce.2017.86053.1181	۱۳۹۶/۰۱/۲۵	۱۳۹۶/۰۳/۱۴	۱۳۹۶/۰۳/۲۴	۱۳۹۶/۰۳/۲۵	۱۳۹۷/۰۳/۳۰
http://dx.doi.org/10.22065/jsce.2017.86053.1181					
		*نویسنده مسئول:			دکتر امین کشاورز
		پست الکترونیکی:			keshavarz@pgu.ac.ir

Probabilistic seismic hazard analysis and determination of uniform hazard spectrum of Bushehr province assuming linear source model

Amin Keshavarz^{1*}, Batool Mansoori Moghaddam²

1- Assistant Professor, School of Engineering, Persian Gulf University, Bushehr, Iran

2- MSc of Civil Engineering, School of Engineering, Persian Gulf University, Bushehr, Iran

ABSTRACT

Due to the high complexity in the mechanism of earthquakes occurrence, it is not possible to predict it accurately at a given site. Experiences and scientific findings indicate that using the statistical and probabilistic techniques entitled seismic hazard analysis, the safety of the structures can be desirably assessed. This study evaluates the seismic hazard of Bushehr province using the probabilistic and in some cases the deterministic approaches. To assess the seismic hazard, an area of 150 km around Bushehr province has been considered. Seismic linear sources have been prepared using the available maps. Historical and instrumental earthquake catalogue has been provided using the published catalogues. Foreshocks and aftershocks have been removed from the catalogue by applying the Gardner and Knopoff algorithm. Then, by employing the Keijko and Gutenberg-Richter methods, suitable seismicity parameters have been calculated. Finally, according to the seismic power of each fault, the mentioned parameters have been assigned to the faults. Seismic hazard analysis has been performed using the desirable ground motion prediction equations. Results have been presented as the deterministic and probabilistic acceleration response spectra for important cities. The probabilistic seismic hazard zonation maps have been provided for the return periods of 75, 475 and 2475 years.

ARTICLE INFO

Received: 14/04/2017

Revised: 04/06/2017

Accepted: 14/06/2017

Keywords:

Seismic hazard analysis

Bushehr province

Zonation

Uniform hazard spectrum

Probabilistic

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: 10.22065/jsce.2017.86053.1181

*Corresponding author: Dr. Amin Keshavarz.

Email address: keshavarz@pgu.ac.ir

تحلیل خطر به روش احتمالاتی (PSHA) روشی است که برای معین کردن شاخص و یا احتمال فراتر رفتن حرکات شدید زمین برای یک محل از تمام زلزله‌های ممکن به کار می‌رود. روش عددی-تحلیلی برای تحلیل خطر احتمالاتی لرزه‌ای (PSHA) اولین بار توسط Cornell (۱۹۶۸) ارائه شده و بعدها به کمک Algermissent et al. (1982) به خوبی تبیین شده است [۱]. سالانه پژوهش‌های زیادی در رابطه با تحلیل خطر لرزه‌ای با استفاده از روش PSHA در تمامی نقاط جهان و از جمله کشور ایران انجام می‌شود که معمولاً در فرضیات اولیه تحلیل و یا نرم افزار مورد استفاده، متفاوت هستند. اکثر پژوهش‌های مذکور برای ساختمان‌های موردی انجام شده و اخیراً به صورت پهنه‌بندی خطر لرزه‌ای برای یک منطقه وسیع ارائه شده‌اند.

مطالعات بسیاری در مناطق مختلف دنیا در مورد تحلیل خطر لرزه‌ای احتمالاتی انجام شده است. به عنوان مثال، در سال‌های اخیر ویمر و همکاران [۲] برای کشور سوئیس، خان و همکاران [۳] برای کشور امارات متحده عربی، تریانی و همکاران [۴] برای خلیج بنگال و اشدی و همکاران [۵] برای استان جاوای مرکزی در اندونزی تحلیل خطر لرزه‌ای احتمالاتی را انجام داده‌اند. پیشرفت‌های اخیر در مورد تحلیل احتمالاتی خطر لرزه‌ای را می‌توان در مرجع [۶] یافت.

مطالعات برآورد خطر و ریزپهنه‌بندی ژئوتکنیک لرزه‌ای شهر بوشهر در سال ۱۳۸۵ توسط پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله صورت گرفته است [۷]. در این مطالعه با در نظر گرفتن لرزه‌زمین‌ساخت و لرزه‌خیزی در گستره شهر بوشهر، برآورد خطر زمین‌لرزه به روش‌های تعیینی و احتمالاتی تخمین زده شده است. به منظور برآورد بیشینه شتاب به روش تعیینی و احتمالی از روابط کاهندگی امبرسیز و همکاران [۸]، بور و همکاران [۹]، کمپیل و بزرگ نیا [۱۰] و زارع [۱۱] استفاده شده است. بیشینه شتاب افقی به روش احتمالی برای دوره بازگشت‌های ۴۷۵ و ۲۴۷۵ سال برای شبکه ۱×۱ کیلومتر مربع برای سنگ بستر در محدوده بوشهر، عالی‌شهر، تنگک و بهمنی تخمین زده شده است. مقادیر حداکثر بیشینه شتاب افقی با این روش برای دوره بازگشت‌های ۴۷۵ و ۲۴۷۵ سال به ترتیب $0.23g$ و $0.31g$ برای محدوده بوشهر، $0.25g$ و $0.3g$ برای عالی‌شهر و $0.23g$ و $0.31g$ در محدوده تنگک و بهمنی برآورد گردیده است. همچنین به عنوان یک کار بسیار جامع در این زمینه می‌توان به فاز یک پروژه بزرگ تحلیل خطر لرزه‌ای ایران که شامل محدوده تهران بزرگ می‌شود، اشاره کرد [۱۲]. در این پژوهش تحلیل خطر لرزه‌ای به صورت ارائه نقشه پهنه‌بندی محدوده تهران بزرگ برای دوره بازگشت‌های ۴۷۵، ۱۰۰۰ و ۲۴۷۵ سال و منحنی‌های خطر لرزه‌ای مربوط به سه سایت نقطه‌ای خاص و با استفاده از روابط کاهندگی NGA انجام شده است. بر اساس بررسی‌های انجام شده مقادیر شتاب در نقشه پهنه‌بندی خطر لرزه‌ای با دوره بازگشت ۴۷۵ سال بازه صفر تا $0.9g$ را پوشش می‌دهد. بر اساس آیین‌نامه ۲۸۰۰ ایران، تهران از جمله مناطق با پهنه خطر لرزه‌ای نسبی خیلی زیاد بوده و دارای شتاب مبنای طرح معادل $0.35g$ است. لذا با توجه به پژوهش مذکور می‌توان به این نتیجه دست یافت که در برخی موارد آیین‌نامه ۲۸۰۰ مقادیر شتاب را دست‌پایین در نظر گرفته و به‌خصوص در حوزه نزدیک گسل ضعیف کار کرده است.

مطالعات برآورد خطر و پهنه‌بندی ژئوتکنیک لرزه‌ای سایت ۳ پارس جنوبی، از دیگر پژوهش‌های انجام شده توسط پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله است که در گستره‌ای به شعاع ۲۰۰ کیلومتر از ساختمان‌ها با مختصات جغرافیایی $26/96$ درجه عرض شمالی و $53/625$ درجه طول شرقی انجام شده است [۱۳]. در این مطالعه با در نظر گرفتن لرزه‌زمین‌ساخت و لرزه‌خیزی در گستره سایت ۳ پارس جنوبی، برآورد خطر زمین‌لرزه به روش‌های تعیینی و احتمالاتی برای شبکه ۱×۱ کیلومتر مربع تخمین زده شده است. بیشینه شتاب افقی به روش احتمالاتی برای دوره بازگشت‌های ۷۵، ۴۷۵ و ۲۴۷۵ و برای سنگ بستر در محدوده سایت برآورد شده است.

استان بوشهر از نظر اقتصادی، صنعتی، تجاری و... از جمله قرار داشتن نیروگاه هسته‌ای و بخش عظیمی از مهم‌ترین تاسیسات زیربنایی کشور نظیر پالایشگاه‌ها، تاسیسات نفتی و پتروشیمی و سدهای بزرگ، نقش بسیار مهمی در اقتصاد کشور ایفا می‌کند. از کار افتادن هر کدام از این سازه‌های حیاتی در اثر زلزله می‌تواند خسارات جبران ناپذیری بر پیکره اقتصاد و صنعت کشور وارد کند. از طرف دیگر، آیین‌نامه ۲۸۰۰ مؤید سطح نسبی خطر لرزه‌ای بالا در استان است. لذا از آن‌جا که تا کنون هیچ‌کاری به صورت جدی و خاص در این زمینه در استان بوشهر صورت نگرفته است؛ این مطالعه به دنبال ارزیابی خطرات ناشی از زلزله با دقت قابل قبولی در گستره مذکور است. هدف اصلی در این

مطالعه، برآورد پارامترهای جنبش نیرومند زمین در استان بوشهر با استفاده از روش تحلیل احتمالاتی خطر لرزه‌ای است. به این ترتیب وضعیت لرزه‌خیزی در استان بوشهر مورد بررسی و ارزیابی قرار گرفته و نقشه‌های پهنه‌بندی خطر لرزه‌ای در دوره بازگشت‌های مختلف ترسیم شده است. همچنین بر مبنای این نقشه‌ها، طیف‌های خطر یکنواخت برای شهرهای مهم استان ارائه شده است. از طرف دیگر، با توجه به اینکه برای ساختمان‌های مهم و استراتژیک، کاربرد روش احتمالاتی قابل تردید است؛ برای برخی از شهرهای کلیدی استان، این تحلیل به صورت تعیینی نیز انجام شده است.

۲- لرزه زمین ساخت و لرزه‌خیزی

لرزه زمین ساخت منطقه مورد مطالعه، اهمیت بسیار زیادی در تحلیل خطر لرزه‌ای دارد. در این بخش فقط به خلاصه‌ای از وضعیت لرزه‌زمین ساخت استان اشاره شده است و جزییات مطالعات انجام شده در این مقاله را می‌توان در مرجع [۱۴] یافت. بدین منظور گستره مورد مطالعه توسط نگاره‌های هوایی و تصاویر ماهواره‌ای، نقشه‌های زمین‌شناسی و مراجع معتبر دیگر، مورد مطالعه قرار گرفته و وضعیت زمین‌ساختی و گسلش منطقه بررسی شده است. از نگاه جغرافیایی و ارتباط با پهنه‌های ساختاری، استان بوشهر بخشی از حاشیه جنوب باختری کوه‌های زاگرس است که در جبهه کوهستانی این ارتفاعات و در کنار خلیج فارس قرار دارد. شناسایی بسیاری از گسل‌ها در پهنه زاگرس که به عنوان گسل‌های کور شناخته شده‌اند، به دلیل عدم وجود رخنمون سطحی، امکان پذیر نیست. در گستره مورد بررسی، به عنوان بخشی از زاگرس، گسل‌ها را می‌توان از نظر ساختار به سه دسته تقسیم کرد: الف) گسل‌های معکوس با راستای شمال غرب- جنوب شرق؛ به صورتی که شیب صفحات گسلی اکثر آن‌ها به سمت شمال شرق است. ب) گسل‌های راستالغز با امتداد تقریبی شمالی- جنوبی که از بنیادی‌ترین عوامل دگرشکلی منطقه به حساب می‌آیند از جمله گسل‌های کازرون- برازجان و رازک و ج) گسل‌های پنهان نسبتاً کم ژرفای مرتبط با چین‌خوردگی‌های ناحیه.

شکل ۱ گسل‌های موجود در گستره مورد مطالعه را نشان می‌دهد. اصلی‌ترین گسل‌های معکوس گستره طرح، یا بر اساس سابقه لرزه‌خیزی مهم قلمداد شده‌اند (همانند گسل‌های قیر، لار، بریز، یا از نرخ لغزش (حاصل از GPS) بالایی برخوردار بوده و هم راستا با گسل‌های لرزه‌زا هستند و یا اهمیت ساختاری زیادی داشته و در سطح رخنمون دارند (نظیر قطعات گسلی کنگان، عسلویه، لارستان، مزارعی، میشان و ...).

هر چشمه لرزه‌زا توانایی ایجاد حداکثر بزرگای معینی را دارد. بنابراین بعد از مشخص کردن سرچشمه‌های لرزه‌زا، بایستی برای هر کدام از آن‌ها، یک زمین لرزه کنترل‌کننده تعیین گردد. این زمین لرزه بر مبنای هدف مطالعه و میزان خطری که در اثر تخریب تاسیسات و بناها می‌تواند ایجاد شود، متغیر است. بر این اساس برای سازه‌هایی که گسیختگی در آن‌ها خطر نسبتاً کمی در پی دارد، زمین لرزه کنترل‌کننده، به صورت زمین لرزه‌ای که در طول عمر مفید سازه مورد انتظار است، تعریف می‌گردد. در مورد سازه‌های حساس و با درصد خطر زیاد از جمله نیروگاه‌های اتمی، کارخانجات صنایع شیمیایی و سدها، این بزرگا، معمولاً به صورت بیشینه بزرگای زمین لرزه (M_{max}) که سرچشمه قادر به ایجاد آن است، تعریف می‌گردد. بدین منظور، روابط متعددی در سطح جهانی و منطقه‌ای (به صورت خاص برای ایران) ارائه شده است. در این پژوهش، از روابط ارائه شده توسط ولز و کوپراسمیت [۱۵]، مهاجراشعی و نوروزی [۱۶]، زارع [۱۱] و نوروزی [۱۷] استفاده شده است. در برآورد بزرگای بیشینه منتسب به گسل‌ها، موارد زیر مد نظر قرار گرفته است:

• قطعه‌بندی (Segmentation) گسل‌ها شامل شناسایی قطعات گسل‌های خاص است که بر اساس ویژگی‌های زمین‌ساختی و بزرگ‌ترین زمین لرزه‌های رویداده در گستره طرح صورت می‌گیرد. قطعات گسل‌ها معمولاً به صورت نیمه مستقل از دیگر بخش‌ها عمل کرده و خصوصیات خاص خودش را دارد. به عنوان مثال با توجه به پیشینه لرزه‌خیزی گسل قیر به دو بخش قابل تفکیک است. چرا که بخش شمال باختری آن بسیار فعال تر بوده و همچنین از لحاظ راستا و مکانیسم گسل با بخش شرقی آن متفاوت است. هر کدام از بخش‌های این گسل به تنهایی به عنوان یک چشمه لرزه‌زا مدل شده‌اند.

• گسل‌های کازرون و برازجان با توجه به روند لرزه‌خیزی و فعالیت بخش‌های مختلف آنها و همچنین امتداد سطحی متفاوت قطعات مختلف که طبیعتاً بر مکانیسم و میزان فعالیت گسل تأثیرگذار است، به قطعاتی تقسیم‌بندی شده‌اند.

• در مورد گسل‌هایی که طول آنها کمتر از حدی باشد که احتمال رسیدن آن به لایه لرزه‌زا وجود داشته باشد (به طور معمول گسل‌ها تقریباً به میزان یک سوم طولشان در عمق ادامه دارند) و از طرف دیگر شواهد زمین‌ساختی خاصی نداشته‌اند، فاقد ارزش زمین‌ساختی بوده و از محاسبات خارج شده‌اند.

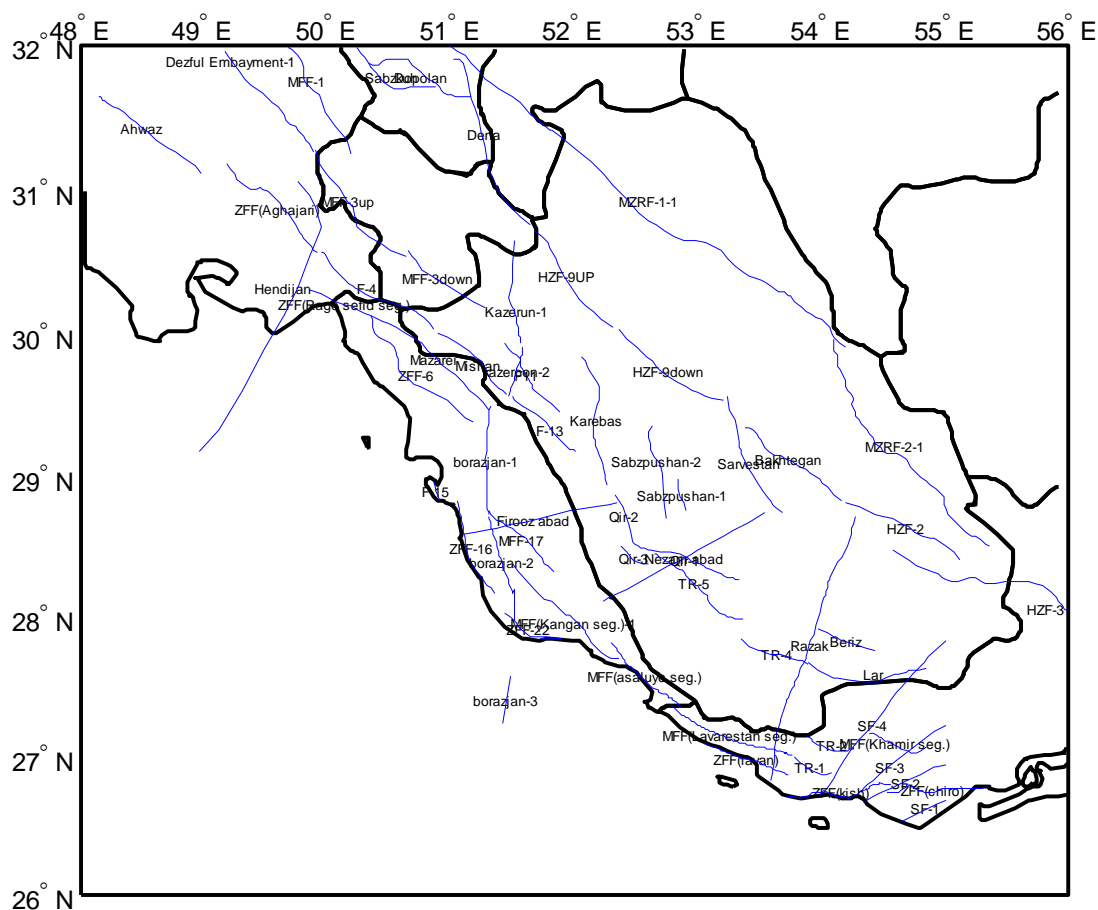
• بزرگ‌ترین زمین‌لرزه تاریخی رویداده در گستره طرح، زمین‌لرزه تاریخی قیر و کارزین سال ۱۴۴۰ با بزرگای M_s برابر ۷/۱ و بزرگ‌ترین زمین‌لرزه دستگاهی با بزرگای M_w برابر ۶/۸ می‌باشد. لذا بیشینه بزرگای پذیرفته شده برای گسل‌ها برابر ۷/۱ خواهد بود.

در جدول ۱ حداکثر توان لرزه‌زایی گسل‌های مهم و کواترنری واقع در محدوده‌ی مطالعاتی، بر اساس طول گسلش برابر ۱۲، ۳۷ و ۵۰ درصد طول گسل، ارائه شده است. با استفاده از درخت منطقی حداکثر توان لرزه‌زایی برای هر گسل مشخص شده است. بدین منظور بیشینه بزرگای پذیرفته شده برای هر چشمه از طریق میانگین‌گیری بین روابط مطرح شده به دست آمده است.

استان بوشهر قسمتی از ایالت لرزه‌خیز زاگرس به شمار می‌رود که در نیمه شمالی پهنه آب‌های خلیج فارس قرار دارد. این استان در حدفاصل ۵۰/۳ تا ۵۳ درجه طول جغرافیایی و ۲۷/۳۲۵ تا ۳۰/۲۶۴ درجه عرض جغرافیایی قرار دارد. در این پژوهش، به منظور انجام مطالعات تحلیل خطر زمین‌لرزه، یک گستره طرح وسیع به فاصله ۱۵۰ کیلومتر از مرزهای استان در نظر گرفته شده است. بر این اساس مطالعات بر روی چندضلعی م‌حضور بین ۴۷/۸ تا ۵۵ درجه طول جغرافیایی و ۲۵/۴ تا ۳۲/۱ درجه عرض جغرافیایی صورت گرفته است. شکل ۲ پراکندگی رومرکز زمین‌لرزه‌های تاریخی و دستگاهی گستره طرح را نشان می‌دهد. بررسی کاتالوگ زلزله در این پژوهش، نشان می‌دهد که بیش از ۲۰۰۰ رویداد لرزه‌ای از سال ۱۹۰۰ میلادی تا کنون در محدوده مورد مطالعه اتفاق افتاده است. با توجه به دانش لرزه‌شناسی، لرزه‌خیزی هر گستره را می‌توان به دو دسته تقسیم کرد: زلزله‌های تاریخی که قبل از سده بیستم (قبل از سال ۱۹۰۰ میلادی) به وقوع پیوسته‌اند و زلزله‌های دستگاهی که از سال ۱۹۰۰ میلادی تا به حال به وقوع پیوسته‌اند.

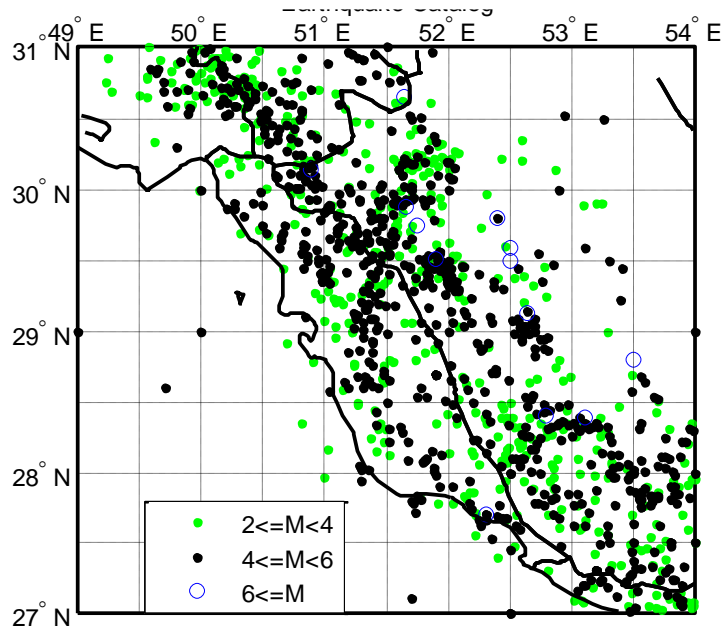
بزرگای زمین‌لرزه‌های تاریخی با توجه به میزان آسیب وارده در گستره ناحیه‌ای که زمین‌لرزه در آن احساس شده است، برآورد می‌گردد. در این مطالعه از کاتالوگ زلزله‌های تاریخی ایران که توسط امبرسیز و ملویل [۱۸] تهیه شده و نسبت به سایر مراجع از همگنی بیشتری برخوردار است، استفاده شده است. ژرف‌نگری اطلاعات زمین‌لرزه‌های سده بیستم و دوازده سال نخست سده بیست‌ویکم بر اساس کاتالوگ‌های زلزله‌شناسی معتبر، از جمله مرکز بین‌المللی زلزله‌شناسی (ISC)، انگدال و همکاران [۱۹] و پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله (IIES) انجام شده است. در این مرحله، کاتالوگ‌هایی در نظر گرفته شده‌اند که اعتبار نسبتاً بالا و خطای محاسباتی پایین‌تری دارند. به عنوان مثال می‌توان به کاتالوگ انگدال و همکاران اشاره نمود. در تلاش‌های تحقیقاتی ایشان، زمین‌لرزه‌های قبل از سال ۲۰۰۷ میلادی با توجه ویژه به عمق کانونی، مجدداً مکان‌یابی و ارزیابی شده‌اند. شایان ذکر است بانک اطلاعات (IIES) رویدادهای لرزه‌ای ۱۹۶۰ میلادی لغایت ۲۰۰۴ میلادی را بر اساس آخرین مدل‌سازی و به‌کارگیری روش‌های پیشرفته تعیین محل مجدد با همکاری انگدال تصحیح نموده است. علاوه بر این با توجه به گسترش شبکه ملی لرزه‌نگاری باندپهن ایران وابسته به پژوهشگاه، زمین‌لرزه‌های جنوب کشور در چند ساله اخیر با دقت بسیار بالا مکان‌یابی شده‌اند. لذا این کاتالوگ به عنوان مرجع اصلی پژوهش در نظر گرفته می‌شود.

در شکل ۳ هیستوگرام فراوانی زمین‌لرزه‌ها بر حسب عمق، برای بازه‌های ۵ کیلومتری تهیه و ارائه شده است. همان‌طور که از شکل پیداست، بیشترین فراوانی در ژرفای ۱۰ تا ۱۵ کیلومتر مشاهده می‌شود. با توجه به محدود بودن لرزه‌خیزی فلات ایران به پوسته فوقانی زمین و پایین بودن ژرفای کانونی زمین‌لرزه‌های مهم رخ داده در منطقه و همچنین مطالعات مربوط به عمق لایه‌لرزه‌زا در منطقه (انتخاب ژرفای ۸ تا ۱۵ کیلومتر برای لایه لرزه‌زا) با دیدی محافظه‌کارانه می‌توان ژرفای کانونی ۱۱ کیلومتر را برای زمین‌لرزه‌هایی که فاقد عمق هستند، انتخاب کرد.

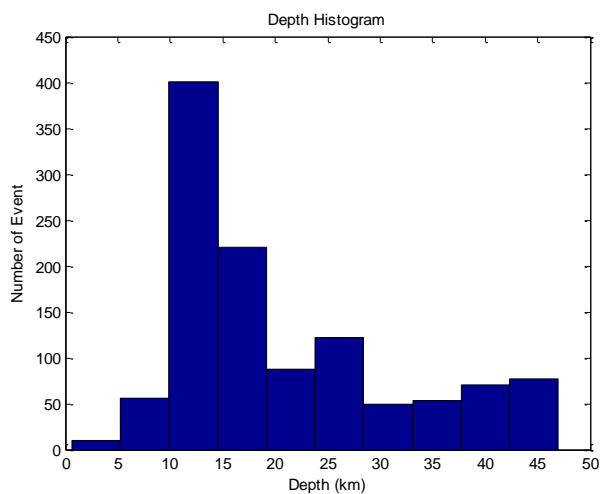


شکل ۱: نقشه گسل‌های منطقه.

اندازه بزرگای یک زمین‌لرزه از طریق دو پارامتر بزرگ و شدت قابل بیان است. واضح است که برای مقاصد مهندسی استفاده از پارامتر بزرگ که بر مبنای روشهای محاسباتی است، مناسب‌تر است. به منظور اندازه‌گیری این پارامتر از مقیاسهای مختلفی استفاده می‌شود که در میان آنها بزرگای موج سطحی (M_s)، بزرگای موج حجمی (m_b)، بزرگای محلی (M_L) و بزرگای گشتاوری (M_w) از مهم‌ترین مقیاس‌ها می‌باشند. در فهرست زمین‌لرزه‌های گزارش شده برای گستره مورد پژوهش، انواع مختلف بزرگای ارائه شده و کمتر زلزله‌هایی وجود دارد که برای آن بزرگاهای مختلف بیان شده باشد. در برآورد پارامترهای لرزه خیزی و تحلیل خطر زمین‌لرزه، محاسبات بر حسب یک نوع بزرگای که اغلب M_s یا M_w می‌باشد، انجام می‌شود. لذا لازم است روابطی برای همگن‌سازی بزرگای (امکان تبدیل بزرگای زمین‌لرزه‌ها بر حسب مقیاس مورد نظر) ارائه شود. مقیاس بزرگای به کار رفته در این پژوهش، M_w است که از مقادیر m_b و M_s رویدادهای منطقه استنتاج می‌شود.



شکل ۲: رومرکز زمین لرزه‌های رخ داده در گستره طرح.



شکل ۳: نمودار توزیع فراوانی زمین لرزه‌ها در ناحیه در گستره طرح.

به منظور همگن‌سازی بزرگاها لازم است تا با به‌دست آوردن رابطه‌ای مناسب بین دو بزرگا، فهرست زمین لرزه‌ها تکمیل گردد. برای تعیین رابطه خطی بین بزرگای امواج سطحی و بزرگای امواج حجمی در گستره مورد مطالعه، کلیه زمین لرزه‌هایی که برای آنها هر دو نوع بزرگا گزارش شده‌اند، استخراج و با فرض خطی بودن رابطه بین دو بزرگا و به‌دست آوردن بهترین خط برازش شده به روش آماری کمترین مربعات، رابطه زیر به‌دست آمد:

$$M_s = 1.177 M_b - 1.365 \quad (1)$$

کمیته ملی سدهای بزرگ ایران رابطه کلی زیر را برای این دو بزرگا ارائه داده است [۲۰]. همین‌طور که واضح است رابطه (۱)، همخوانی بسیار خوبی با رابطه (۲) دارد.

$$M_s = 1.205 M_b - 1.29 \quad (2)$$

به منظور تعیین رابطه خطی بین دو بزرگای M_w و M_s ، بین این دو بزرگا با استفاده از روش آماری کمترین مربعات، رگرسیون انجام شد و رابطه خطی آنها با ضریب همبستگی 0.873 ، به شرح زیر به دست آمد:

$$M_w = 0.585 M_s + 2.473 \quad M_s \leq 6.0 \quad (3)$$

رابطه به دست آمده، با رابطه (۴) که توسط توسط مرجع [۲۱] ارائه شده است، همخوانی بسیار خوب و قابل قبولی دارد.

$$M_w = 0.56 M_s + 2.66 \quad 4.2 \leq M_s \leq 6.0 \quad (4)$$

همچنین برای بزرگای موج سطحی به ازای $M_s > 6$ بزرگی گشتاور با بزرگی موج سطحی برابر است [۲۲]. به همین ترتیب رابطه زیر بین بزرگای M_w و M_b ، به دست آمد:

$$M_w = 0.895 M_b + 0.688, \quad R = 0.645 \quad (5)$$

از آنجا که رابطه خطی بین بزرگا M_w - m_b با استفاده از زلزله‌های موجود در گستره دارای ضریب همبستگی مناسبی نبود، از این رو بنا به پیشنهاد مرجع [۲۲]، برای بزرگای کمتر از 6 ، $M_w = M_L = m_b$ فرض شد.

حذف پس لرزه‌ها و پیش‌لرزه‌ها از کاتالوگ تهیه شده، با استفاده از مدل جهانی گاردنر و نوپوف [۲۳] و به کمک نرم‌افزار ZMAP [۲۴] انجام گرفت. پس از اعمال روش پنجره‌ی زمانی و مکانی گاردنر و نوپوف و حذف وقایع غیرپواسونی، در بین حدود 2066 زمین‌لرزه، 1176 زمین‌لرزه اصلی به دست آمد.

از مهم‌ترین بخش‌های مطالعات تحلیل خطر لرزه‌ای، برآورد پارامترهای لرزه‌خیزی از جمله بیشینه بزرگای قابل انتظار (M_{max})، آهنگ فعالیت سالانه بزرگا (λ) و مقادیر a و b در رابطه گوتنبرگ-ریشر [۲۵] است. در این پژوهش با توجه به لرزه‌خیزی بالای زاگرس، برآوردها با استفاده از روش گوتنبرگ-ریشر و روش پیشرفته کیکو-سلوول [۲۶] صورت گرفته است تا به این طریق، مناسب‌ترین پارامترهای لرزه‌خیزی در رابطه با فعالیت چشمه‌های لرزه‌زا اختیار گردد. به‌طور کلی در مقایسه با روش گوتنبرگ-ریشر، نتایج حاصل از به‌کارگیری روش کیکو-سلوول و برنامه ارائه شده توسط کیکو [۲۷]، بسیار معتبرتر بوده و به‌خصوص در زمینه تخمین دوره بازگشت زلزله‌ها، بهتر عمل می‌کند. با استفاده از روش گوتنبرگ-ریشر، بین بزرگی M_w و فراوانی تجمعی زمین‌لرزه‌های با بزرگی برابر یا بیشتر از M_w ، رابطه زیر به دست آمد:

$$\log N_c = a - bM = -1.211M_w + 8.23, \quad R^2 = 0.969 \quad (6)$$

با توجه به اینکه پارامتر b مقداری بالاتر از میانگین جهانی دارد، لذا می‌توان به این نتیجه رسید که در منطقه مورد مطالعه، رخداد زلزله‌های با بزرگای کم تا متوسط محتمل‌تر است.

روش ارائه شده توسط کیکو و سلوول [۲۶]، بهترین و کامل‌ترین روش در به‌کارگیری رویداد زمین‌لرزه‌های آمیخته، ناهمگون و با دقت نامناسب می‌باشد که مشابه با شرایط داده‌های لرزه‌ای کشور ایران است. در این مطالعه از نسخه نرم‌افزاری کیکو [۲۷] استفاده شده است. به منظور اعمال عدم قطعیت‌ها و اختلاف دقت داده‌ها در دوره‌های زمانی مختلف، دسته‌بندی‌های زیر در نظر گرفته شده است:

۱. زمین‌لرزه‌های تاریخی با خطای محاسبه بزرگا از 0.3 تا 0.5 واحد بزرگا.

۲. زمین‌لرزه‌های دستگاهی از تاریخ 1900 تا 1963 میلادی (سال نصب شبکه لرزه‌نگاری جهانی) با خطای 0.2 واحد بزرگا و بزرگای آستانه $4/3$.

۳. زمین‌لرزه‌های دستگاهی از تاریخ 1964 میلادی تا کنون با خطای 0.1 واحد بزرگا و بزرگای آستانه $4/3$.

جدول ۱: حداکثر توان لرزه‌زایی گسل‌های منطقه و پارامترهای آن‌ها

پارامترها با روش Kijko (2001)			بیشینه توان لرزه‌ای (M_w)	طول (کیلومتر)	سازوکار گسل	نام گسل	پارامترها با روش Kijko (2001)			بیشینه توان لرزه‌ای (M_w)	طول (کیلومتر)	سازوکار گسل	نام گسل
β	λ	M_{max}					β	λ	M_{max}				
۲٫۴۸	۰٫۰۵۸	۶٫۵۹۷	۶٫۶	۱۷۴	امتداد لغز	فیروزآباد	۱٫۹۶	۰٫۰۷۶	۶٫۷۳۷	۶٫۷۴	۲۲۰	امتداد لغز	رازک
۱٫۲۸	۰٫۱۱۲	۶٫۹۳۹	۶٫۹۴	۱۰۰	امتداد لغز	سبزپوشان	۱٫۷۲	۰٫۰۵۳	۶٫۷۸۴	۶٫۷۸	۶۴	معکوس	ZFF-1
۱٫۴۴	۰٫۰۴۸	۷٫۰۵	۷٫۰۵	۱۰۰	امتداد لغز	سروستان	۱٫۴۶	۰٫۰۵۷	۶٫۷۰۴	۶٫۷	۵۶	معکوس	ZFF-2
۱٫۶۳	۰٫۱۲۶	۷٫۰۲۶	۷٫۰۳	۹۶	معکوس	TR-1	۱٫۴۶	۰٫۰۷۶	۷٫۰۷۷	۷٫۰۸	۱۲۶	معکوس	ZFF-3
۱٫۹۶	۰٫۰۷۶	۶٫۷۳۵	۶٫۷۴	۵۹	معکوس	TR-2	۲٫۱۲	۰٫۰۴۸	۷	۷	۹۲	معکوس	ZFF-4
۱٫۶۸	۰٫۱۱۵	۶٫۴۲۳	۶٫۴۲	۳۵	معکوس	TR-3	۲٫۴۸	۰٫۰۵۸	۶٫۶۸۲	۶٫۶۸	۵۴	معکوس	ZFF-5
۲٫۳۵	۰٫۰۸۱	۶٫۵۳۲	۶٫۵۳	۴۲	معکوس	TR-4	۲٫۲۸	۰٫۰۲۹	۶٫۸۶۲	۶٫۸۶	۷۳	معکوس	ZFF-6
۱٫۶۸	۰٫۰۶۹	۶٫۳۴۵	۶٫۳۴	۱۱۴	امتداد لغز	SF1	۱٫۶۸	۰٫۰۵۸	۶٫۹۸	۶٫۹۸	۸۹	معکوس	ZFF-7
۱٫۶۸	۰٫۰۶۹	۶٫۴۳۷	۶٫۴۴	۹۴	امتداد لغز	SF2	۱٫۶۸	۰٫۰۵۸	۶٫۹۵۳	۶٫۹۵	۸۵	معکوس	ZFF-8
۲٫۳۵	۰٫۰۳۶	۶٫۶۶۸	۶٫۶۷	۱۹۶	امتداد لغز	SF3	۰٫۵۳	۰٫۰۶۳	۶٫۹۴۷	۶٫۹۵	۸۴٫۱۳	امتداد لغز	کازرون ۱
۱٫۹۶	۰٫۰۷۶	۶٫۵۶۹	۶٫۵۷	۱۶۶	امتداد لغز	SF4	۰٫۵۳	۰٫۰۷۴	۶٫۴۶۲	۶٫۴۶	۳۷٫۳۳	امتداد لغز	کازرون ۲
۱٫۳۸	۰٫۰۶۳	۶٫۹۹۶	۷	۱۱۰	معکوس	MFF-1	۱٫۱۱	۰٫۰۹۵	۶٫۹۷۹	۶٫۹۸	۸۸٫۸۳	امتداد لغز	برازجان ۱
۱٫۳۸	۰٫۰۵	۷٫۲۷۶	۷٫۱	۱۷۶	معکوس	MFF-2	۱٫۱۱	۰٫۰۴۸	۶٫۹۵۴	۶٫۹۵	۸۵٫۱۴	امتداد لغز	برازجان ۲
۲٫۴۸	۰٫۰۵۸	۶٫۸۵۴	۶٫۸۵	۷۲	معکوس	MFF-3	۱٫۱۱	۰٫۰۴۸	۶٫۹۳۶	۶٫۹۴	۸۲٫۵۹	امتداد لغز	برازجان ۳
۲٫۴۸	۰٫۰۸۷	۷٫۰۵۸	۷٫۰۶	۱۲۲	معکوس	MFF-4	۱٫۹۶	۰٫۱۱۴	۷٫۰۷۳	۷٫۰۷	۱۰۴	معکوس	لار
۲٫۲۸	۰٫۰۷۶	۶٫۸۹۴	۶٫۸۹	۷۷	معکوس	MFF-5	۱٫۹۶	۰٫۱۱۴	۶٫۶۳۶	۶٫۶۴	۵۰	معکوس	بریز
۲٫۲۸	۰٫۰۸۶	۶٫۹۷۴	۶٫۹۷	۱۰۶	معکوس	MFF-6	۱٫۶۳	۰٫۲۱	۶٫۸۲	۶٫۸۲	۶۸	معکوس	قیر ۱
۲٫۳۵	۰٫۰۹۹	۶٫۸۹۴	۶٫۸۹	۷۷	معکوس	MFF-7	۱٫۶۳	۰٫۱۳۸	۶٫۸۰۲	۶٫۸	۶۶	امتداد لغز	قیر ۲
۱٫۶۳	۰٫۰۱۳	۶٫۷۶۴	۶٫۷۶	۲۳۰	امتداد لغز	نظام آباد	۱٫۶۳	۰٫۱۲۶	۶٫۲۹	۶٫۲۹	۲۸	معکوس	قیر ۳
۰٫۴۶	۰٫۰۱	۷٫۰۳۲	۷٫۰۳	۹۷	معکوس	HZF-1	۱٫۲۸	۰٫۰۹۶	۷٫۲۴۱	۷٫۱	۱۶۶	امتداد لغز	کره بس
۱٫۴۴	۰٫۰۳۲	۷٫۰۵	۷٫۰۵	۱۰۰	معکوس	HZF-2	۱٫۴۶	۰٫۰۷۶	۶٫۸۷	۶٫۸۷	۷۴	معکوس	میشان
۱٫۴۴	۰٫۰۳۲	۶٫۹۵۱	۶٫۹۵	۱۰۲	معکوس	HZF-3	۱٫۴۶	۰٫۰۷۶	۷٫۰۴۸	۷٫۰۵	۱۲۰	معکوس	مزارعی
۰٫۴۶	۰٫۰۱	۷٫۰۵۸	۷٫۰۶	۱۲۲	معکوس	HZF-4	۱٫۷۲	۰٫۰۳۴	۶٫۸۰۱	۶٫۸	۲۴۵	امتداد لغز	HBF
۱٫۴۴	۰٫۰۴۸	۷٫۰۲۶	۷٫۰۳	۹۶	معکوس	بختگان	۱٫۴۶	۰٫۰۹۵	۶٫۹۹۶	۷	۱۱۰	معکوس	F-1
۱٫۷۲	۰٫۰۵۳	۷٫۰۵	۷٫۰۵	۱۰۰	معکوس	اهواز	۰٫۵۳	۰٫۰۳۷	۶٫۸۳۷	۶٫۸۴	۷۰	معکوس	F-2
۱٫۲۹	۰٫۲۵۱	۷٫۱۶۹	۷٫۱	۱۴۷	معکوس	دنا	۰٫۵۳	۰٫۰۳۷	۶٫۸۱۱	۶٫۸۱	۶۷	معکوس	F-3
۱٫۲۹	۰٫۲۵۸	۶٫۸۹۴	۶٫۸۹	۷۷	معکوس	سبزکوه	۲٫۱۲	۰٫۰۳۲	۶٫۰۲۶	۶٫۰۳	۱۸	معکوس	F-4

برای مقاصد مهندسی، زلزله‌های خیلی کوچک، اهمیت کمی دارند و از آن‌جا که خسارت مهمی ایجاد نمی‌کنند، معمولاً در نظر گرفته نمی‌شوند. بزرگای آستانه، بیانگر کوچک‌ترین حد بزرگای زمین‌لرزه است که از نظر مهندسی قابل اهمیت است. در مطالعات لرزه‌خیزی این بزرگا را با توجه به دسته‌بندی‌های انجام شده برای زمین‌لرزه‌ها و همچنین کیفیت داده‌های لرزه‌ای، با دآوری کارشناسی تعیین می‌کنند. در این پژوهش، بزرگای $\frac{4}{3}$ برای بزرگای آستانه یا حد پایین (M_{min})، با توجه به دقت ثبت بزرگای زلزله‌ها توسط پایگاه‌های زلزله نگار، انتخاب شده است.

دوره بازگشت بزرگا درگستره مورد مطالعه با استفاده از روش کیکو محاسبه شد و بر اساس آن برای دوره بازگشت‌های ۷۵، ۴۷۵ و ۱۰۰۰ سال، بزرگای زمین‌لرزه به ترتیب $\frac{6}{52}$ ، $\frac{6}{198}$ و $\frac{7}{98}$ برآورد گردید. در حالی که در روش گوتنبرگ-ریشتر برای همین دوره‌های

بازگشت، بزرگای زمین‌لرزه‌ها به ترتیب معادل $6/65$ ، $7/1$ و $7/1$ تخمین زده شده است. چنین تخمینی از دوره بازگشت زلزله را می‌توان به دلیل عدم لحاظ زلزله‌های تاریخی در رابطه گوتنبرگ-ریشتر تفسیر کرد.

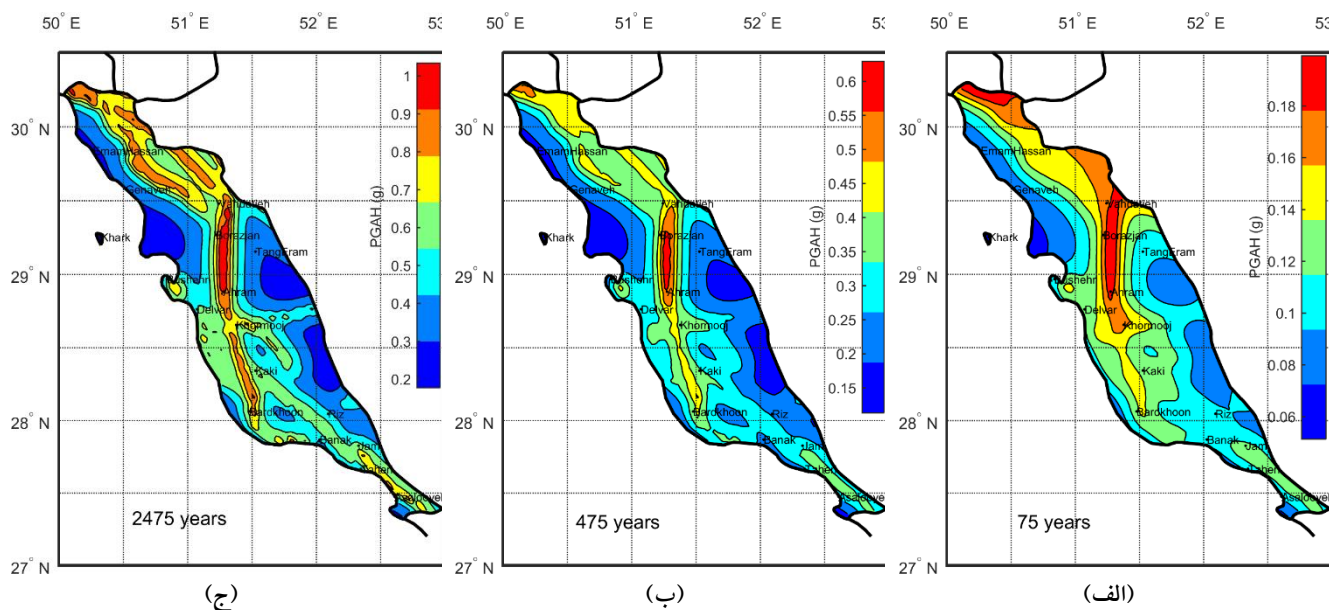
اما مهم‌ترین مسئله در رابطه با چگونگی استفاده از این پارامترها، ارتباط صحیح آن‌ها با چشمه‌های مختلف لرزه‌ای موجود در گستره طرح است. این پارامترها بایستی به تناسب نوع چشمه و با توجه به ویژگی‌ها، ابعاد و میزان توان لرزه‌ای آنها، به منابع لرزه‌ای اختصاص داده شوند. با توجه به هدف این پژوهش که پهنه‌بندی خطر لرزه‌ای برای استان بوشهر است و در نظر گرفتن یک گستره طرح وسیع برای آن، امکان تخصیص این پارامترها به گسل‌های منطقه که مشتمل بر تعداد نسبتاً زیادی هستند، کاری بس دشوار و نشدنی است. بنابراین با استفاده از روش کیکو و در نظر گرفتن زون‌های ناحیه‌ای مناسب برای هر گسل، پارامترهای لرزه‌ای مرتبط با آن‌ها به دست خواهد آمد. این زون‌بندی با نظر کارشناسی و بر اساس امتداد گسل‌ها، شیب آنها و زلزله‌های رخ داده صورت می‌گیرد. به طوری که برای گسل‌های راندگی حاشیه‌ای به عرض حداقل ۱۵ کیلومتر در ناحیه فروشیب و عرض ۵ کیلومتر در ناحیه فراشیب و برای سایر گسل‌ها حاشیه‌ای به عرض حداقل ۱۰ کیلومتر در طرفین گسل در طول آن در نظر گرفته می‌شود. این زون‌ها در بر گیرنده سابقه لرزه‌ای یک یا چند گسل خواهد بود. حال با استفاده از روش کیکو می‌توان پارامترهای لرزه‌ای مربوط به هر زون را محاسبه کرد. به منظور تعیین λ برای هر گسل، با توجه به پتانسیل فعالیت لرزه‌ای هر کدام از آنها می‌توان آهنگ رویداد سالیانه هر منبع را به دست آورد [۲۸]. از آنجا که دوره بازگشت بزرگا با نرخ تجاوز سالانه رابطه عکس دارد، به این ترتیب می‌توان برای یک گسل، دوره بازگشت زلزله را برای بزرگای معین تعیین کرد. باید توجه داشت که پارامتر $\beta=2.303b$ برای تمامی گسل‌های واقع در یک زون برابر است. پارامترهای لرزه‌ای محاسبه شده برای گسل‌ها در جدول ۱ ارائه شده است.

انتخاب رابطه کاهندگی یا روابط تخمین پارامترهای حرکت زمین، اهمیت بسیار زیادی در تحلیل خطر دارد. در این مقاله، با مطالعه و بررسی روابط کاهندگی ارائه شده برای تمامی جهان و با توجه به ویژگی‌ها و شرایط زمین‌شناسی و لرزه‌زمین‌ساختی کشور ایران از روابط بور و اتکینسون [۲۹]، کمپبل و بزرگ نیا [۳۰] و چیو ویانگ [۳۱] استفاده گردید. این روابط از جدیدترین مدل‌های کاهندگی هستند که به عنوان روابط کاهیدگی نسل جدید، اخیراً گسترش یافته و موسوم به روابط NGA هستند. شجاع طاهری و همکاران [۳۲] با انجام مطالعاتی به مقایسه و چگونگی تطابق روابط NGA مذکور با داده‌های گزارش شده از حرکات قوی زمین در ایران پرداخته‌اند. ایشان با بررسی توزیع داده‌های زلزله‌های گزارش شده در ایران با این سه رابطه NGA، استفاده از این روابط را با پذیرش سطح قابل قبولی از خطا، سازگار با شرایط تکتونیکی ایران دانسته‌اند. علاوه بر روابط فوق با توجه به شرایط ساختگاهی منطقه، از رابطه کاهندگی قاسمی و همکاران [۳۳] نیز استفاده شده است. نتایج حاصل از چهار رابطه توسط رهیافت درخت منطقی با یکدیگر ادغام شده؛ به طوری که در محاسبات مربوط به مطالعات خطر لرزه‌ای، اثرگذاری توأم این روابط به خوبی قابل مشاهده است. برای حرکت عمودی زمین نیز از روابط کاهندگی آبرامسون و سیلوا [۳۴]، امبرسیز و همکاران [۳۵] و کمپبل و بزرگ نیا [۱۰] استفاده گردید. به منظور دست یافتن به نتایجی منطقی، روابط با اعمال وزن مساوی لحاظ شده‌اند. پارامتر مهم در انتخاب وزن مذکور، این است که با توجه به نقاط ضعف و قوت روابط، هریک به نوعی کمبود دیگری را پوشش داده و نتایج محافظه‌کارانه‌تری به دست خواهد آمد.

تحلیل خطر زمین‌لرزه در این پژوهش بر پایه آنالیز داده‌ها در محیط نرم‌افزار EZ-FRISK 7.43 صورت گرفته است. این برنامه، خطر لرزه‌ای را با استفاده از روش استاندارد تحلیل خطر لرزه‌ای برآورد و محاسبه می‌کند. بطور کلی ورودی‌های نرم‌افزار جهت انجام آنالیز به دو بخش اساسی تقسیم می‌شود: پارامترهای چشمه‌های لرزه‌زا و پارامترهای ساختگاهی. از آنجا که برای بسیاری از گسل‌ها ممکن است اطلاعات خاصی از پروفیل عمقی آن وجود نداشته باشد، می‌توان برای گسل‌های نرمال از زاویه شیب ۴۰ و برای گسل‌های معکوس از زاویه شیب ۵۰ درجه استفاده کرد. در این پژوهش به طور کلی از زاویه ۴۵ درجه برای گسل‌های شیب لغز استفاده شده است. این زاویه در گسل‌های امتدادلغز معادل ۹۰ درجه لحاظ شده است [۳۶]. بحث نزدیکی به چشمه لرزه‌زا یا میدان نزدیک از جمله مواردی است که تحقیقات روی چگونگی تأثیر آن بر امواج لرزه‌ای هنوز در جریان است. اثر زلزله‌های نزدیک گسل نیز در نرم‌افزار EZ-FRISK اعمال گردیده است.

۳- نقشه‌های پهنه‌بندی شتاب و طیف‌های پاسخ

در این مطالعه برای تهیه نقشه خطر استان بوشهر، گستره‌ی طرح به شبکه‌ای از نقاط با فاصله ۰/۰۲ درجه (تقریباً معادل ۲ کیلومتر) تقسیم شده است. نقشه خطر ارائه شده در این مطالعه، نقشه پهنه‌بندی بیشینه شتاب زمین (PGA) در استان بوشهر، برای دوره‌های بازگشت ۴۷۵، ۷۵ و ۲۴۷۵ سال است (مقادیر شتاب‌های ارائه شده ضرایبی از g هستند). این نقشه‌ها با فرض شرایط یکنواخت ساختگاه با سرعت موج برشی V_{S30} برابر ۷۶۰ متر بر ثانیه و اعمال ضریب میرایی ۵ درصد ارائه شده است. شکل ۴ نقشه پهنه‌بندی بیشینه شتاب افقی زمین (PGAH) را به ترتیب برای دوره‌های بازگشت ۴۷۵، ۷۵ و ۲۴۷۵ سال نشان می‌دهند. همان گونه که در این شکل‌ها دیده می‌شود، بیشتر نواحی استان در پهنه‌های با خطر نسبی زلزله متوسط و زیاد قرار دارند. در مناطقی مقدار بیشینه شتاب زمین به صورت قابل ملاحظه‌ای افزایش می‌یابد. دلیل این امر را می‌توان به گسل‌هایی ارتباط داد که در این ناحیه قرار گرفته‌اند. با دور شدن از گسل مقدار شتاب حرکت زمین به شدت کاهش می‌یابد. این اتفاق به دلیل در نظر گرفتن اثر حوزه نزدیک گسل رخ می‌دهد. از جمله گسل‌های مهم استان می‌توان به گسل‌های برازجان، مزارعی و ZFF-6 اشاره کرد که امتداد آنها به خصوص بر روی شکل ۴، به راحتی قابل تشخیص است؛ به طوری که بالاترین شتاب‌ها روی این امتدادها رخ می‌دهند.



شکل ۴: نقشه پهنه‌بندی شتاب افقی ماکزیمم در استان بوشهر طی دوره‌های بازگشت (الف) ۷۵ (ب) ۴۷۵ و (ج) ۲۴۷۵ سال.

شکل ۴ نقشه پهنه‌بندی شتاب افقی ماکزیمم را برای دوره بازگشت ۴۷۵ سال نشان می‌دهد. از آنجایی که طیف طرح در آیین‌نامه ۲۸۰۰ بر اساس مؤلفه افقی شتاب بیشینه زمین و با احتمال وقوع ۱۰٪ در طول ۵۰ سال است، بنابراین از نتایج روش احتمالاتی با همین احتمال وقوع یا به عبارت دیگر با در نظر گرفتن دوره بازگشت ۴۷۵ سال، جهت مقایسه استفاده می‌شود. در آیین‌نامه ۲۸۰۰ ویرایش چهارم، استان بوشهر به جز شهر خارک، در محدوده خطر نسبی زیاد طبقه بندی شده‌اند و شتاب مبنای طرح در این استان $0.3g$ پیشنهاد شده است. با توجه به شکل ۴ دیده می‌شود که عمده نقاط استان از جمله نواحی شرق و جنوب غربی استان، شتابی در حدود $0.2g$ تا $0.32g$ دارند. در نواحی مرکزی، مقدار شتاب در آنها به نحو محسوسی افزایش یافته به طوری که ماکزیمم شتاب در امتداد شهرهای برازجان-اهرم به $0.6g$ می‌رسد. دلیل این امر را می‌توان به گسل فعال برازجان ارتباط داد که در این ناحیه قرار دارد. بنابراین آیین‌نامه ۲۸۰۰ در بسیاری از مناطق، مخصوصاً مناطق مرکزی و شمال شرقی استان، شتاب مبنای طرح را دست پایین تخمین می‌زند.

جدول ۲ مقادیر بیشینه شتاب افقی را برای شهرهای مهم استان بوشهر، به روش تعیینی و احتمالاتی با دوره‌های بازگشت مختلف نشان می‌دهد. در دوره بازگشت ۴۷۵ سال، به جز شهرهای برازجان، خورموج و اهرم، سایر شهرهای مهم استان شتاب افقی کمتر از $0.3g$ دارند. برای شهر بوشهر، در سطوح عملکرد به ترتیب با دوره بازگشت ۴۷۵، ۷۵ و ۱۰۰۰ سال، مقدار مؤلفه افقی بیشینه شتاب معادل $0.11g$ ، $0.3g$ ، $0.418g$ و $0.61g$ به دست می‌آید. مرجع [۷] برای دوره‌های بازگشت ۴۷۵ و ۲۴۷۵ سال برای شهر بوشهر بیشینه شتاب افقی را به ترتیب $0.23g$ و $0.31g$ برآورده کرده است که مقادیر کمتری نسبت به نتایج این مقاله می‌باشد. مقدار مؤلفه قائم بیشینه شتاب زمین برای همین دوره‌های بازگشت در شهر بوشهر به ترتیب برابر با $0.073g$ ، $0.22g$ ، $0.323g$ و $0.48g$ خواهد بود. همین‌طور که از داده‌های این جدول مشخص است، از بین شهرهای مهم استان، با استفاده از روش تعیینی، شهر دیر دارای بحرانی‌ترین حالت است. علت این امر نزدیکی این شهر به گسل‌های MFF-4 و ZFF-5 است. در روش تحلیل احتمالی نیز بالاترین مقادیر شتاب مربوط به شهر اهرم است که می‌توان آن را به عنوان یکی از شهرهای پرخطر لرزه‌ای منطقه به شمار آورد.

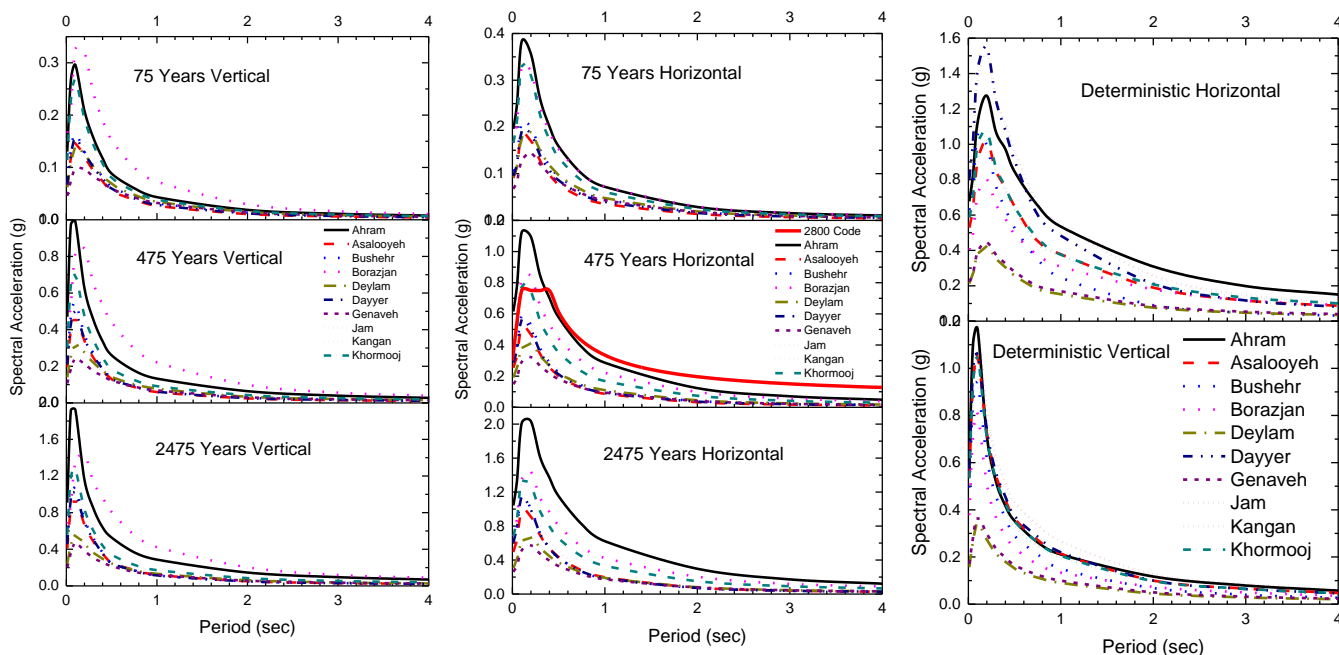
جدول ۲: مقادیر بیشینه مؤلفه افقی شتاب برای شهرهای مهم استان

شهر	روش تعیینی		روش احتمالی	
	۵۰ %	۸۴ %	۷۵ سال	۴۷۵ سال
بوشهر	۰٫۶۳	۰٫۹۹	۰٫۱۱	۰٫۶۱
بrazجان	۰٫۴	۰٫۶۴	۰٫۱۷	۰٫۶۸
گناوه	۰٫۲۲	۰٫۳۶	۰٫۰۷	۰٫۲۶
کنگان	۰٫۵۱	۰٫۸۲	۰٫۰۹	۰٫۳۸
خورموج	۰٫۵۹	۰٫۹۳	۰٫۱۷	۰٫۶۸
ديلم	۰٫۲۱	۰٫۳۴	۰٫۰۹	۰٫۱۹
جم	۰٫۷۹	۱٫۲۷	۰٫۱۲	۰٫۳۱
دیر	۰٫۸	۱٫۳	۰٫۱	۰٫۲۹
اهرم	۰٫۶۸	۱٫۰۸	۰٫۲	۰٫۶۱
عسلویه	۰٫۵۳	۰٫۸۴	۰٫۰۹	۰٫۲۵

طیف پاسخ شتاب افقی و عمودی زمین با فرض میرایی ۵ درصد، برای شهرهای مهم استان بوشهر، به دو روش تعیینی و احتمالاتی تهیه شد. طیف شتاب افقی و عمودی به روش تعیینی در سطح ۵۰ درصد در شهرهای مختلف استان، در شکل ۵ نشان داده شده است. همچنین طیف شتاب افقی به روش احتمالاتی با دوره‌های بازگشت ۴۷۵، ۷۵ و ۲۴۷۵ سال در شکل ۶ نشان داده شده است. به همین ترتیب شکل ۷ برای طیف پاسخ عمودی تهیه شد.

در شکل ۶، در دوره بازگشت ۴۷۵ سال، طیف آیین‌نامه ۲۸۰۰ با فرض خاک نوع I، نیز نشان داده شده است. همان‌طور که دیده می‌شود، به جز شهرهای اهرم و برازجان، در سایر شهرها، طیف آیین‌نامه ۲۸۰۰ بالاتر از طیف خطر احتمالی به دست آمده است. در زمان‌های تناوب متوسط و بلند، طیف‌های به دست آمده و طیف ۲۸۰۰، به نحو محسوسی از یکدیگر فاصله گرفته و مقادیر دامنه طیفی این طیف‌ها، تفاوت قابل توجهی با هم پیدا می‌کنند. علت این قضیه را باید در ماهیت طیف طرح مقیاس شده و عدم توانایی آن در ایجاد یک سطح خطر یکنواخت در تمام زمان‌های تناوب جستجو کرد. به عبارت دیگر، اگرچه طیف آیین‌نامه ایران به خوبی شتاب را برای زمان تناوب کوتاه تخمین می‌زند، اما به علت حاکم نبودن پارامتر مقیاس کننده آن در تمام زمان‌های تناوب طیفی، نمی‌تواند همین دقت مطلوب را به تمام نواحی طیف منتقل کند. به عنوان مثال، در طیف‌هایی که از طریق پارامتر شتاب حداکثر زمین (PGA) مقیاس می‌شوند (مانند طیف طرح آیین‌نامه ۲۸۰۰)، این‌گونه فرض می‌شود که احتمال وقوع پارامتر PGA ، در تمام زمان‌های تناوب مختلف هم معتبر است؛ در حالی که تحقیقات نشان داده است چنین فرضی صحیح نیست. در واقع PGA ، یک پارامتر با زمان تناوب کوتاه و عموماً زیر 0.2 ثانیه و حتی کمتر از 0.1 ثانیه است، بنابراین نمی‌توان انتظار داشت که احتمال وقوع این پارامتر با زمان تناوب کوتاه، در تمام نواحی طیف حاکم باشد و قطعاً احتمال وقوع

پارامترهای طیفی در زمان‌های تناوب متوسط و بلند از احتمال وقوع مورد نظر فاصله می‌گیرند [۳۷]. چنین مسئله‌ای باعث می‌شود که استفاده از طیف طرح آیین‌نامه برای برقراری سطح مطلوب ایمنی در سازه‌های کوتاه مرتبه با پیوند کم منطقی باشد، ولی به کار بردن آن در سازه‌های میان‌مرتبه و بلندمرتبه با زمان‌های تناوب متوسط و بلند و برای ایجاد همین سطح ایمنی دست بالا محسوب شود.

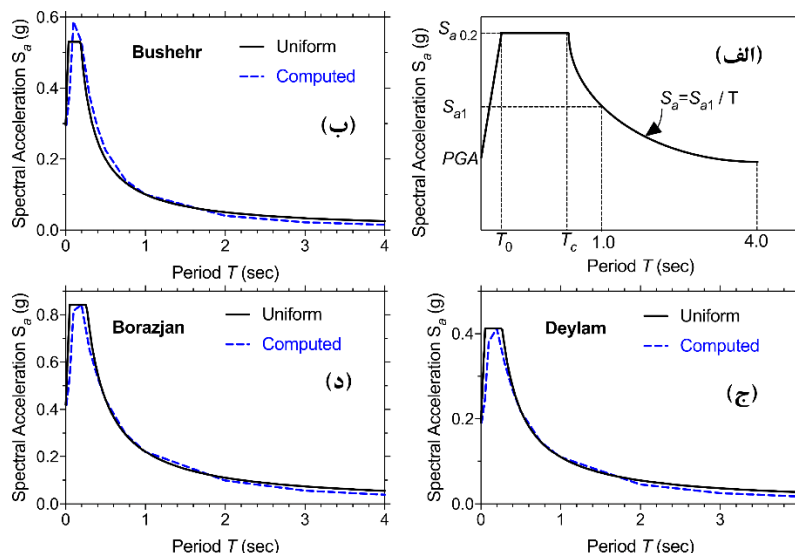


شکل ۵: طیف پاسخ شتاب افقی و عمودی در پیوندهای مختلف به روش تعیینی سطح ۵۰٪ در شهرهای مختلف استان بوشهر

شکل ۶: طیف پاسخ شتاب افقی در شهرهای مختلف استان بوشهر به روش احتمالاتی در دوره‌های بازگشت ۷۵، ۴۷۵ و ۲۴۷۵ سال

شکل ۷: طیف پاسخ شتاب عمودی در شهرهای مختلف استان بوشهر به روش احتمالاتی در دوره‌های بازگشت ۷۵، ۴۷۵ و ۲۴۷۵ سال

برای آسان‌تر کردن استفاده از طیف‌های به‌دست آمده در این مقاله، شیوه‌ای برای هموار کردن این طیف‌ها انتخاب گردید. شیوه انتخاب شده، شبیه آیین‌نامه IBC [۳۸] می‌باشد و در شکل ۸ الف نشان داده شده است. برای رسم طیف هموار شده، تنها به سه پارامتر نیاز است: شتاب ماکزیمم (PGA)، مقدار طیف در پیوند 0.2 ثانیه $S_{a(0.2)}$ و مقدار طیف در پیوند 1 ثانیه $S_{a(1)}$. همچنین $T_c = S_{a(1)} / S_{a(0.2)}$ و $T_0 = 0.2T_c$ می‌باشند. نمونه مقایسه طیف افقی محاسبه شده در دوره بازگشت ۴۷۵ سال و طیف هموار شده به شیوه ارائه شده، در شکل ۸ ب، ج و د به ترتیب برای شهرهای بوشهر، دیلم و برازجان ارائه شده است. همان‌گونه که ملاحظه می‌شود، طیف هموار شده به خوبی به طیف محاسبه شده نزدیک است. در جدول ۳ مقادیر $S_{a(1)}$ و $S_{a(0.2)}$ برای دوره‌های بازگشت مختلف در شهرهای استان ارائه شده است. با استفاده از این جدول و جدول ۲ به راحتی می‌توان طیف‌های هموار شده را ترسیم نمود.



شکل ۸: (الف) شیوه رسم طیف هموار شده و مقایسه طیف به دست آمده و طیف هموار شده برای دوره بازگشت ۴۷۵ سال برای (ب) بوشهر، (ج) دیلم و (د) برازجان

جدول ۳: مقادیر $S_{a0.2}$ و S_{a1} برای رسم طیف هموار شده برای شهرهای مختلف استان بوشهر

		اهرم	عسلویه	بوشهر	برازجان	دیلم	دیر	گناوه	جم	کنگان	خورموج
دوره بازگشت ۷۵ سال	$S_{a0.2}$	۰٫۳۶	۰٫۱۷	۰٫۲۰	۰٫۳۲	۰٫۱۹	۰٫۱۹	۰٫۱۴	۰٫۲۲	۰٫۱۸	۰٫۳۱
	S_{a1}	۰٫۰۷۲	۰٫۰۳۵	۰٫۰۴۵	۰٫۰۷۳	۰٫۰۴۸	۰٫۰۴۰	۰٫۰۴۳	۰٫۰۴۳	۰٫۰۳۸	۰٫۰۶۱
دوره بازگشت ۴۷۵ سال	$S_{a0.2}$	۱٫۰۹	۰٫۴۷	۰٫۵۳	۰٫۸۴	۰٫۴۱	۰٫۵۰	۰٫۳۲	۰٫۵۸	۰٫۴۱	۰٫۷۴
	S_{a1}	۰٫۲۸۶	۰٫۰۸۶	۰٫۱۰۰	۰٫۲۲۱	۰٫۱۱۰	۰٫۰۹۲	۰٫۰۹۵	۰٫۱۰۲	۰٫۰۸۴	۰٫۱۶۸
دوره بازگشت ۲۴۷۵ سال	$S_{a0.2}$	۲٫۰۳	۰٫۹۲	۱٫۰۰	۱٫۴۴	۰٫۶۸	۰٫۹۹	۰٫۵۸	۱٫۱۵	۰٫۷۶	۱٫۲۸
	S_{a1}	۰٫۶۲۲	۰٫۱۹۷	۰٫۱۸۴	۰٫۴۲۴	۰٫۱۸۹	۰٫۱۸۶	۰٫۱۷۳	۰٫۲۱۸	۰٫۱۶۵	۰٫۳۳۲
روش تعیینی	$S_{a0.2}$	۱٫۲۷	۱٫۰۲	۰٫۹۹	۰٫۸۰	۰٫۴۳	۱٫۵۵	۰٫۴۵	۱٫۵۱	۱٫۰۲	۱٫۰۷
	S_{a1}	۰٫۵۲۴	۰٫۳۷۸	۰٫۲۴۶	۰٫۳۰۸	۰٫۱۵۲	۰٫۴۸۳	۰٫۱۶۹	۰٫۵۴۷	۰٫۳۶۷	۰٫۲۷۶

۴- نتیجه گیری

مطالعه حاضر، نتایج تحلیل خطر لرزه‌ای را به منظور بررسی وضعیت لرزه‌خیزی در استان بوشهر و با انتخاب گستره طرحی به شعاع ۱۵۰ کیلومتر از مرزهای این استان ارائه می‌دهد. این نتایج با استفاده از رهیافت احتمالی و در مواردی رهیافت تعیینی و بر اساس اطلاعات لرزه‌ای تاریخی و دستگامی و بررسی‌های ساینموتکتونیک ارائه شده است. به منظور تحلیل خطر زمین‌لرزه و تعیین نحوه پاسخ هر ناحیه از استان، به بارگذاری لرزه‌ای، اطلاعاتی نظیر داده‌های رویداد زمین‌لرزه‌ها، دستیابی به توزیع پواسونی زمین‌لرزه‌ها، پارامترهای لرزه‌خیزی ساختگاه، توصیف کمی گسل‌ها، عمق لایه لرزه‌زا و روابط کاهندگی سازگار با منطقه نیاز است. بدین منظور پس از تعیین منابع لرزه‌زا در منطقه و گردآوری داده‌های لرزه‌ای رویداده در گستره طرح، به پردازش کاتالوگ پرداخته شده است. در این پژوهش، حذف پس‌لرزه‌ها و پیش‌لرزه‌ها از طریق نرم‌افزار ZMAP و روش گاردنر و نویوف انجام شده است. با استفاده از روش‌های کیکو-سلوول و گوتنبرگ-ریشتر، پارامترهای لرزه‌خیزی محاسبه و پس از انجام بررسی‌هایی، بهترین نتایج انتخاب شده‌اند. در نهایت پس از ترکیب منابع لرزه‌زا و با استفاده از روابط کاهندگی مناسب تحلیل خطر لرزه‌ای انجام شد. خروجی‌های به صورت طیف‌های خطر یکنواخت مؤلفه افقی و قائم شتاب بیشینه زمین با استفاده از روش‌های تعیینی و احتمالی خطر لرزه‌ای، برای شهرهای مهم استان در نمودارهایی ارائه شده است. در نهایت نقشه پهنه‌بندی

خطر لرزه‌ای برای بیشینه شتاب زمین (PGA)، و برای دوره بازگشت‌های ۴۷۵، ۷۵ و ۲۴۷۵ سال ترسیم شده است. برخی از نتایج کلی به شرح زیر است:

- با بررسی کاتالوگ تهیه شده زمین‌لرزه‌ها، مشاهده گردید که بزرگ‌ترین زمین‌لرزه تاریخی رویداده در گستره طرح، زمین‌لرزه تاریخی قیر و کارزین سال ۱۴۴۰ با بزرگای موج سطحی $۷/۱$ و بزرگ‌ترین زمین‌لرزه دستگامی با بزرگای گشتاور $۶/۸$ می‌باشد. بنابراین بیشینه بزرگای پذیرفتنی برای زمین‌لرزه محتمل در گستره طرح برابر $۷/۱$ به دست آمد.
- با استفاده از روش کیکو و گوتنبرگ-ریشتر، پارامترهای لرزه‌خیزی محاسبه گردید. نتایج نشان داد که پارامتر b در رابطه گوتنبرگ-ریشتر، مقداری بالاتر از میانگین جهانی دارد. لذا می‌توان به این نتیجه رسید که در منطقه مورد مطالعه، رخداد زلزله‌های با بزرگای کم تا متوسط، محتمل‌تر است. مقدار پارامترهای به‌دست آمده بیانگر آن است که منطقه مورد مطالعه دارای پتانسیل بالای خطرپذیری است.
- بر اساس روش کیکو-سلوول برای دوره بازگشت‌های ۴۷۵، ۷۵ و ۱۰۰۰ سال، بزرگای زمین‌لرزه به ترتیب $۶/۵۲$ ، $۶/۹۸$ و $۷/۰۹۸$ برآورد می‌گردد. در حالی که در روش گوتنبرگ-ریشتر برای همین دوره‌های بازگشت، بزرگای زمین‌لرزه‌ها به ترتیب معادل $۶/۶۵$ ، $۷/۱$ و $۷/۱$ تخمین زده شده است.
- بیشتر نواحی استان در پهنه‌های با خطر نسبی زلزله متوسط و زیاد با شتابی در محدوده $۰/۲g$ تا $۰/۳۲g$ قرار دارند. با این حال در مناطقی این شتاب به نحو محسوسی افزایش یافته به طوری که ماکزیمم شتاب در امتداد شهرهای برازجان-اهرم به $۰/۶g$ می‌رسد.
- شهر دیر از بین مراکز شهرستان‌های استان دارای مقادیر بیشینه مؤلفه افقی شتاب با استفاده از روش تعیینی است. در روش تحلیل احتمالی بالاترین مقادیر شتاب مربوط به شهر اهرم است که می‌توان آن را به عنوان یکی از شهرهای پرخطر لرزه‌ای منطقه به شمار آورد.
- آیین‌نامه ۲۸۰۰ برای بسیاری از مناطق استان در مقایسه با نتایج این تحقیق، شتاب مبنای کمتری تخمین می‌زند. طیف شتاب افقی آیین‌نامه ۲۸۰۰ به جز چند شهر، در بقیه شهرها بالاتر از طیف به دست آمده از این مقاله است.

سپاسگزاری

از اداره کل راه و شهرسازی استان بوشهر جهت حمایت‌های مادی و معنوی به عمل آمده جهت انجام این پژوهش، سپاسگزاری می‌شود.

مراجع

- [1] Kramer, S.L. (1996). *Geotechnical earthquake engineering*. Pearson Education India.
- [2] Wiemer, S., Giardini, D., Fäh, D., Deichmann, N. and Sellami, S. (2009). Probabilistic seismic hazard assessment of Switzerland: best estimates and uncertainties. *Journal of Seismology*, 13(4), 449-478.
- [3] Khan, Z., El-Emam, M., Irfan, M. and Abdalla, J. (2013). Probabilistic seismic hazard analysis and spectral accelerations for United Arab Emirates. *Natural hazards*, 67(2), 569-589.
- [4] Trianni, S.C.T., Lai, C.G. and Pasqualini, E. (2014). Probabilistic seismic hazard analysis at a strategic site in the Bay of Bengal. *Natural Hazards*, 74(3), 1683-1705.
- [5] Ashadi, A.L., Harmoko, U., Yuliyanto, G. and Kaka, S.I. (2015). Probabilistic Seismic-Hazard Analysis for Central Java Province, Indonesia. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 105(3), 1711-1720.
- [6] Mcguire, R.K. (2008). Probabilistic seismic hazard analysis: Early history. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 37(3), 329-338.
- [7] پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله. (۱۳۸۵). *مطالعات برآورد خطر و ریزپهنه‌بندی ژئوتکنیک لرزه‌ای شهر بوشهر*. استانداری بوشهر.
- [8] Ambraseys, N.N., Simpson, K.U. and Bommer, J.J. (1996). Prediction of horizontal response spectra in Europe. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 25(4), 371-400.
- [9] Boore, D.M., Joyner, W.B. and Fumal, T.E. (1997). Equations for estimating horizontal response spectra and peak acceleration from western North American earthquakes: a summary of recent work. *Seismological research letters*, 68(1), 128-153.

- [10] Campbell, K.W. and Bozorgnia, Y. (2003). Updated near-source ground-motion (attenuation) relations for the horizontal and vertical components of peak ground acceleration and acceleration response spectra. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 93(1), 314-331.
- [11] Zare, M. (1999). *Contribution à l'étude de mouvements forts en iran. du catalogue aux lois d'atténuation*.
- [۱۲] قلی‌پور، ی.، بزرگ‌نیا، ع.، رهنما، م. و همکاران. (۱۳۸۹). گزارش نهایی تحلیل خطر لرزه ای ایران- فازیک محدوده تهران بزرگ. معاونت برنامه ریزی و نظارت راهبردی ریاست جمهوری، دفتر فنی و تدوین معیارها و کاهش خطرپذیری زلزله، دانشگاه تهران.
- [۱۳] پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله. (۱۳۸۵). *مطالعات برآورد خطر و پهنه‌بندی ژئوتکنیک لرزه‌ای در ساختمان‌های سایت ۳ پارس*، جلد اول.
- [۱۴] منصوری‌مقدم، ب. (۱۳۹۱). *تحلیل احتمالی خطر لرزه‌ای در استان بوشهر*. پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه خلیج فارس، بوشهر، ایران.
- [15] Wells, D.L. and Coppersmith, K.J. (1994). New empirical relationships among magnitude, rupture length, rupture width, rupture area, and surface displacement. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 84(4), 974-1002.
- [16] Mohajer-Ashjai, A. and Nowroozi, A.A. (1978). Observed and probable intensity zoning of Iran, *Tectonophysics*, 49, 149-150.
- [17] Nowroozi, A.A. (1985). Empirical relations between magnitudes and fault parameters for earthquakes in Iran. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 75(5), 1327-1338.
- [18] Ambraseys, N.N. and Melville, C.P. (1982). *A history of Persian earthquakes*. Cambridge University press.
- [19] Engdahl, E.R., Van Der Hilst, R. and Buland, R. (1998). Global teleseismic earthquake relocation with improved travel times and procedures for depth determination. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 88(3), 722-743.
- [۲۰] کمیته ملی سدهای بلند ایران (۱۹۹۴). *رابطه میان بزرگی امواج سطحی و بزرگی امواج حجمی*. تهران، ایران.
- [21] Papazachos, V., Papazachos, B., Papazachou, C. and Papazachou, K. (1997). *The earthquakes of Greece*. Editions Ziti.
- [22] Heaton, T.H., Tajima, F. and Mori, A.W. (1986). Estimating ground motions using recorded accelerograms. *Surveys in Geophysics*, 8(1), 25-83.
- [23] Gardner, J. and Knopoff, L. (1974). Is the sequence of earthquakes in southern California, with aftershocks removed, poissonian. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 64(5), 1363-1367.
- [24] Wiemer, S. (2001). A software package to analyze seismicity: ZMAP. *Seismological Research Letters*, 72(3), 373-382.
- [25] Gutenberg, B. and Richter, C.F. (1956). Earthquake magnitude, intensity, energy, and acceleration (second paper). *Bulletin of the seismological society of America*, 46(2), 105-145.
- [26] Kijko, A. and Sellevoll, M. (1992). Estimation of earthquake hazard parameters from incomplete data files. Part II. Incorporation of magnitude heterogeneity, *Bulletin of the Seismological Society of America*, 82(1), 120-134.
- [27] Kijko, A. (2001). *HN2.FOR Program: Seismic Hazard Assessment from Incomplete & Uncertain Data, Version B: Lambda and Beta are Calculated Simultaneously*. Written by A. Kijko on 24 June 1988, Revised by P. Mantyiemi on 2 Dec. 1990, Realesded 2/08/04 Nov. 2001.
- [28] Kijko, A. (2004). Estimation of the maximum earthquake magnitude, mmax. *Pure and Applied Geophysics*, 161(8), 1655-1681.
- [29] Boore, D.M. and Atkinson, G.M. (2008). Ground-motion prediction equations for the average horizontal component of PGA, PGV, and 5%-damped PSA at spectral periods between 0.01 s and 10.0 s. *Earthquake Spectra*, 24, 99-138.
- [30] Campbell, K.W. and Bozorgnia, Y. (2008). NGA ground motion model for the geometric mean horizontal component of PGA, PGV, PGD and 5% damped linear elastic response spectra for periods ranging from 0.01 to 10 s, *Earthquake Spectra*, 24, 139-171.
- [31] Chiou, B.S.J. and Youngs, R.R. (2008). An NGA model for the average horizontal component of peak ground motion and response spectra. *Earthquake Spectra*, 24, 173-215.
- [32] Shoja-Taheri, J., Naserieh, S. and Hadi, G. (2010). A test of the applicability of NGA models to the strong ground-motion data in the Iranian plateau. *Journal of Earthquake Engineering*, 14(2), 278-292.
- [33] Ghasemi, H., Zare, M., Fukushima, Y. and Koketsu, K. (2009). An empirical spectral ground-motion model for Iran. *Journal of seismology*, 13(4), 499-515.
- [34] Abrahamson, N. and Silva, W. (1997). Empirical response spectral attenuation relations for shallow crustal earthquakes. *Seismological Research Letters*, 68(1), 94-127.
- [35] Ambraseys, N., Douglas, J., Sarma, S. and Smit, P. (2005). Equations for the estimation of strong ground motions from shallow crustal earthquakes using data from Europe and the Middle East: Vertical peak ground acceleration and spectral acceleration. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 3(1), 55-73.
- [36] Kakkamanos, J., Baise, L.G. and Boore, D.M. (2011). Estimating unknown input parameters when implementing the NGA ground-motion prediction equations in engineering practice. *Earthquake Spectra*, 27(4), 1219-1235.
- [37] Shapira, A. and Van Eck, T. (1993). Synthetic uniform-hazard site specific response spectrum. *Natural Hazards*, 8(3), 201-215.
- [38] IBC, (2006). *International Building Code*, International Code Council, Inc.