

ارزیابی نیاز به ریزپهنه‌بندی لرزه‌ای در شهرستان بناب براساس ملاحظات منطقه‌ای و تحلیل احتمالی خطر زلزله از مجاورت دریاچه ارومیه تا دامنه کوه سهند

پیمان نرج‌آبادی فام^{۱*}، ایرج چائی اصل تبریزی^۲ و مینا باقری ملاحجلو^۳

^۱ استادیار گروه عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه بناب

^۲ کارشناس ارشد مهندسی عمران- زلزله، پژوهشکده ساختمان و مسکن، مرکز تحقیقات راه و مسکن و شهرسازی

^۳ دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده تحصیلات تکمیلی محیط زیست، دانشگاه تهران

(دریافت: ۹۶/۴/۲۰، پذیرش: ۹۷/۱۱/۲، نشر آنلاین: ۹۷/۱۱/۲)

چکیده

ریزپهنه‌بندی لرزه‌ای شهرستان بناب با مختصات مرکزی $37^{\circ}34'03''N$ و $46^{\circ}05'16''E$ از طریق انجام تحلیل احتمالی خطر زلزله در محدوده‌ای به شعاع ۱۵۰ کیلومتر از مرکز شهر و اعمال تأثیرات شرایط ساختمانی از مجاورت دریاچه ارومیه تا دامنه کوه‌های سهند نیازسنجی گردیده است. به این منظور، اطلاعات لرزه‌ای و مه‌لرزه‌ای منطقه بررسی شده‌اند. تحلیل‌های آماری پس از یکسان‌سازی داده‌ها انجام و عمق ساینموتیک^۱ منطقه بر اساس فراوانی زلزله‌ها تعیین شده است. چشمه‌های لرزه‌ای با مطالعه گسل‌های فعال منطقه و نیز زلزله‌های روی داده در آن شناسایی شده‌اند. توان لرزه‌ای چشمه‌ها محاسبه و پارامترهای لرزه‌ای به کمک نرم‌افزارهای Zmap و Kijko به ترتیب با دو روش Gutenberg-Richter و Kijko-Sellevoll تعیین گردیده‌اند. تحلیل خطر با استفاده از نرم‌افزار EZ-FRISK برای دوره‌های بازگشت ۱۰، ۴۷۵، ۹۷۵ و ۲۴۷۵ سال انجام و شتاب‌های حداکثر سنگ‌بستر در این دوره‌های بازگشت به دست آمده‌اند. عوامل ژئوتکنیک و توپوگرافی منطقه بررسی و تأثیرات آن‌ها در شتاب زمین ارزیابی شده‌اند. بر اساس نتایج، بیشینه شتاب سنگ‌بستر در منطقه تقریباً به طور ثابت $0.35g$ برای زلزله‌های با احتمال فراگذشت $99/5\%$ در ۵۰ سال، $0.21g$ برای زلزله‌های با احتمال فراگذشت 10% در ۵۰ سال، $0.28g$ برای زلزله‌های با احتمال فراگذشت 5% در ۵۰ سال و $0.39g$ برای زلزله‌های با احتمال فراگذشت 2% در ۵۰ سال به دست آمده‌اند. شتاب مبنای ویرایش چهارم استاندارد ۲۸۰۰ با توجه به مطالعات لرزه‌ای جدید هم مورد قبول ارزیابی گردیده، ریزپهنه‌بندی لرزه‌ای به علت تغییرات بارز شتاب زمین در اثر اعمال ملاحظات ژئوتکنیک و توپوگرافی منطقه مورد نیاز تشخیص داده شده و ۶ ریزپهنه پیشنهاد شده‌اند.

کلیدواژه‌ها: ریزپهنه‌بندی لرزه‌ای، تحلیل خطر زلزله، روش احتمالی، Zmap، Kijko، EZ-FRISK.

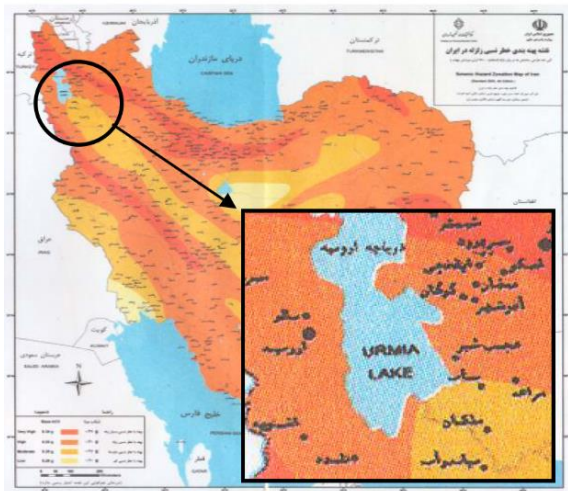
۱- مقدمه

ساز ایمن است. یکی از اولین گام‌ها برای اجرای ایمن‌سازی سازه‌ها در برابر زلزله چه به صورت مقاوم‌سازی و چه به صورت بهسازی یا بازسازی و یا نوسازی، تخمین زلزله‌های محتمل می‌باشد. این مرحله از ایمن‌سازی لرزه‌ای، تحت عنوان برآورد خطر زمین‌لرزه، بیشینه مقدار جنبش سنگ‌بستر که انتظار می‌رود در منطقه مورد نظر و شاید در زمانی مشخص معروف به دوره بازگشت برابر با معکوس نرخ وقوع سالانه (Campbell و Thenhaus، ۲۰۰۳) به وقوع بپیوندد را تخمین می‌زند. به این منظور، دو روش تحلیل قطعی و تحلیل احتمالی خطر لرزه‌ای مورد استفاده قرار می‌گیرند (Kramer، ۱۹۹۶). در روش قطعی چشمه‌های لرزه‌ای مؤثر بر

زلزله را می‌توان با توجه به قابلیت ایجاد بیشترین خسارت در کم‌ترین زمان مؤثر و همچنین عدم تأثیر عملی پیش‌بینی آن به عنوان مهم‌ترین حادثه طبیعی از منظر مهندسی سازه و مدیریت بحران دانست. پژوهشگران متعددی درصدد پیش‌بینی زلزله برآمده و مطالعات بسیاری انجام داده‌اند اما با وجود برخی موفقیت‌ها هنوز روشی مشخص معرفی نشده است (Wang، ۲۰۱۵). این در حالی است که حتی اگر پیش‌بینی زلزله میسر باشد نیز جلوگیری از تخریب ابنیه مستلزم مهندسی زلزله سازه‌ها خواهد بود تا ملاحظات اجتماعی و اقتصادی هم ارضاء گردند. بنابراین مطمئن‌ترین و مؤثرترین راه برای مقابله با زلزله ساخت و



(الف)



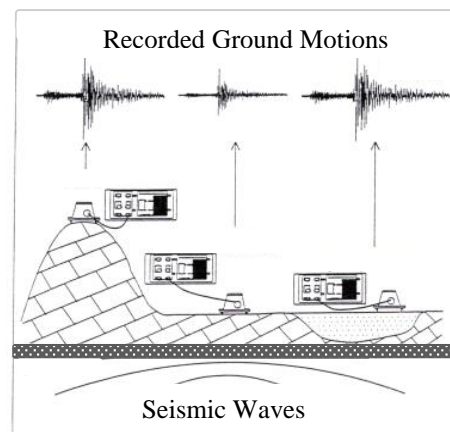
(ب)

شکل ۲- نقشه‌های پهنه‌بندی خطر زلزله در ایران: (الف) در ویرایش ۳ استاندارد ۲۸۰۰ (Standard No. 2800, ۱۳۸۶)، (ب) در ویرایش ۴ آن (استاندارد ۲۸۰۰، ۱۳۹۳)

در هر دوی ویرایش‌های سوم و چهارم استاندارد ۲۸۰۰، شهر بناب در قالب یک پهنه‌بندی کلی در نقشه پهنه‌بندی خطر زلزله، در پهنه با خطر نسبی متوسط قرار دارد. اما اگر در ویرایش سوم طبق مطالعات پیشین (Tavakkoli و Ghafori-Ashtiany, ۱۹۹۹) منطقه بناب به طور مشخص در پهنه با خطر نسبی متوسط قرار گرفته بود این منطقه در ویرایش چهارم با توجه به مطالعات جدید (مانند Karimiparidari و همکاران، ۲۰۱۱) در مرز بین پهنه‌های با خطرهای متوسط و زیاد قرار دارد. شهرهای مجاور شهرستان بناب مثل مراغه، ارومیه و عجب‌شیر نیز که در ویرایش سوم در پهنه با خطر نسبی متوسط قرار می‌گرفتند در ویرایش چهارم در پهنه با خطر نسبی زیاد قرار دارند. البته مطالعات جدید دیگر (Zare, ۲۰۱۲) نیز مقادیر متفاوتی از شتاب زمین برای زلزله طرح را نشان می‌دهند (شکل (۳)). بنابراین، مطالعات مختص منطقه ضرورت می‌یابند.

محل پروژه مشخص، به صورت نقطه‌ای یا خطی و یا سطحی مدل‌سازی، فواصل چشمه‌ها از ساختگاه تعیین، بزرگای زلزله‌های محتمل چشمه‌ها محاسبه، روابط کاهندگی سازگار با لرزه‌زمین-ساخت منطقه انتخاب و مقدار بیشینه شتاب زمین برآورد می‌شوند. در روش احتمالی نیز چشمه‌های لرزه‌ای مؤثر بر محل پروژه مشخص شده و مدل‌سازی می‌شوند، توابع چگالی احتمال فواصل چشمه‌ها از ساختگاه و نیز بزرگای زلزله‌ها تعیین می‌گردند، روابط کاهندگی انتخاب می‌شوند و در نهایت با اعمال عدم قطعیت‌های ذاتی و تصادفی مقدار شتاب بیشینه زمین برآورد می‌گردد (نشریه ۶۲۶، ۱۳۹۲). اگرچه هر یک از روش‌های قطعی و احتمالی دارای قابلیت‌های مشخصی می‌باشند اما با توجه به بررسی‌های صورت گرفته روش تحلیل احتمالی خطر زلزله از ارزش بیشتری در شرایط و مطالعات پیچیده مهندسی برخوردار می‌باشد (Bommer, ۲۰۰۲).

اعمال تفاوت‌های محلی در پاسخ به زلزله نیز در کیفیت ایمن‌سازی لرزه‌ای مؤثر است. این امر با ریزپهنه‌بندی لرزه‌ای لحاظ می‌گردد و عوامل متعددی از قبیل خصوصیات ژئوتکنیک (مانند تأثیر خاک نرم در تشدید امواج لرزه‌ای- در شکل (۱)) و توپوگرافی (مانند تشدید امواج لرزه‌ای در ارتفاع- در شکل (۱)) منطقه در آن مؤثر می‌باشند (Haukaas, ۲۰۰۴؛ Duval و همکاران، ۱۹۹۴).



شکل ۱- تأثیر مشخصات ژئوتکنیک و توپوگرافی محل بر امواج لرزه‌ای (Haukaas, ۲۰۰۴)

در این ریزپهنه‌بندی در حقیقت میزان خطر در محدوده‌های کوچک داخلی یک منطقه مشخص می‌گردد. از آنجاکه فلات ایران در کمربند زلزله آلپ- هیمالیا قرار داشته و بناب نیز جزو مناطق مهم استان آذربایجان شرقی از نظر اقتصادی و فرهنگی به شمار می‌آید، تحلیل خطر زلزله و ارزیابی نیاز به ریزپهنه‌بندی در آن اهمیت می‌یابد. این اهمیت طبق شکل (۲) با مقایسه ویرایش‌های ۳ و ۴ آیین‌نامه طراحی ساختمان‌ها در برابر زلزله (استاندارد ۲۸۰۰ ایران) که نشان از تغییراتی در پهنه‌بندی منطقه دارد بیش‌تر مشخص می‌گردد.

هدف از پژوهش حاضر، با توجه به دلایلی که توضیح داده شدند، به صورت تحلیل خطر زلزله برای منطقه مورد مطالعه در دوره‌های بازگشت متفاوت جهت مقایسه با شرایط آیین‌نامه‌ای و ارزیابی نیاز به ریزپهنه‌بندی با توجه به تحلیل خطر انجام شده، ملاحظات ژئوتکنیک و توپوگرافی منطقه شکل می‌گیرد. این پژوهش در گام‌های:

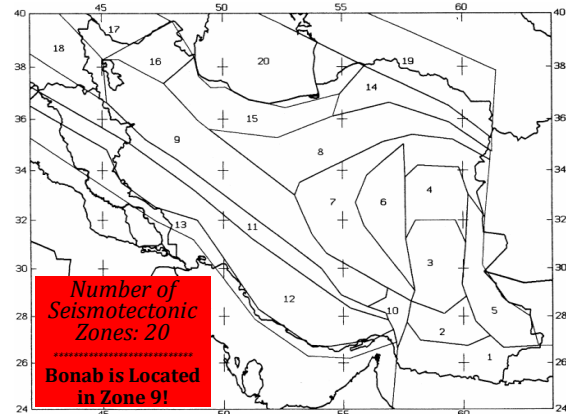
- ۱- جمع‌آوری و بررسی داده‌های لرزه‌ای منطقه
 - ۲- تحلیل آماری داده‌ها
 - ۳- بررسی عدم قطعیت
 - ۴- شناسایی و تعیین چشمه‌های لرزه‌ای
 - ۵- محاسبه توان لرزه‌ای چشمه‌ها
 - ۶- تعیین پارامترهای لرزه‌خیزی منطقه
 - ۷- برآورد خطر زلزله بر اساس شتاب حداکثر زمین در سنگ‌بستر
 - ۸- بررسی خصوصیات ژئوتکنیک و توپوگرافی منطقه
 - ۹- پیش‌گویی شتاب در سطح زمین
 - ۱۰- ارزیابی نیاز به ریزپهنه‌بندی لرزه‌ای
- انجام شده است که در بخش‌های بعدی مقاله بحث می‌گردند.

۲- داده‌های لرزه‌ای

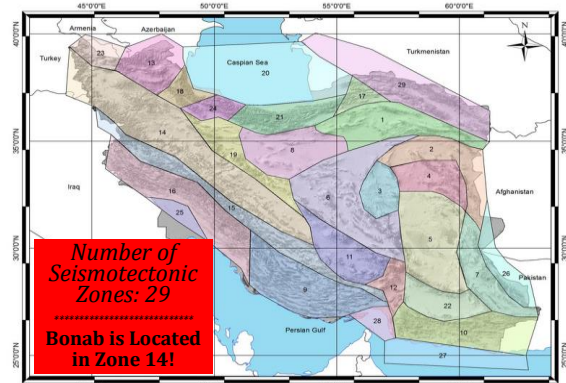
داده‌های لرزه‌ای حاصل از اطلاعات ثبت‌شده زلزله‌ها که از ملزومات مهندسی زلزله سازه‌ها هستند به لحاظ نوع ثبت متفاوت می‌باشند. دلیل این تفاوت آن است که اگرچه اختراع اولین زلزله‌نگار در سال ۱۳۲ بعد از میلاد مسیح به چینی‌ها منسوب بوده و لرزه‌نگارهای آبی و جیوه‌ای در سال ۱۸۵۵ میلادی توسط ایتالیایی‌ها ابداع شده‌اند اما ثبت دستگاهی زلزله‌ها سال‌ها بعد از اختراع لرزه‌نگارهای مدرن در حوالی سال ۱۸۸۰ میلادی توسط بریتانیایی‌ها و عملاً از حوالی سال ۱۹۰۰ میلادی شروع شده است که البته تا اختراع لرزه‌نگارهای الکترونیک در حوالی سال ۱۹۷۰ میلادی کم‌تر و نه به صورت دیجیتال بلکه به صورت آنالوگ بوده‌اند (Bellis, ۲۰۱۵؛ Albini و همکاران، ۲۰۱۳؛ Storchak و همکاران، ۲۰۱۲). به این ترتیب، داده‌های لرزه‌ای عملاً می‌توانند مه‌لرزه‌ای (مربوط به زلزله‌های تاریخی بزرگ با اطلاعات غیر دستگاهی) و یا دستگاهی باشند که ارزش‌های متفاوتی داشته و می‌بایست متمایز گردند.

۲-۱- جمع‌آوری و بررسی داده‌های لرزه‌ای منطقه

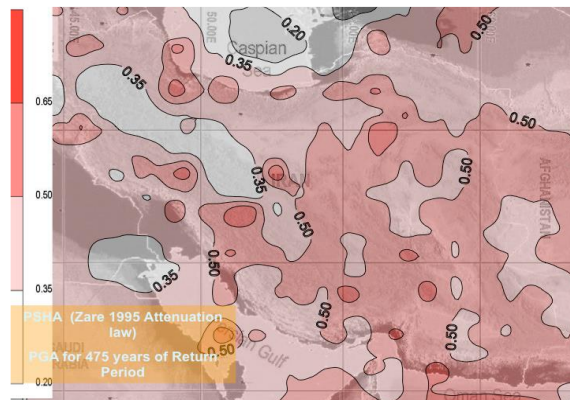
اطلاعات لرزه‌ای منطقه مورد مطالعه در محدوده‌ای به شعاع ۱۵۰ کیلومتر از مرکز شهر بناب جمع‌آوری شده‌اند. برای زلزله‌های تاریخی (زلزله‌های روی داده تا سال ۱۹۰۰ میلادی) از دو مرجع معتبر تاریخ زمین‌لرزه‌های ایران (Ambrasays و Melville, ۱۹۸۲) و کاتالوگ زمین‌لرزه‌های ایران (Berberian, ۱۹۹۵) استفاده شده است. اطلاعات زلزله‌های دستگاهی (زلزله‌های روی



(الف)



(ب)



(ج)

شکل ۳- تقسیم‌بندی ایران به نواحی مختلف با توجه به ساختار لرزه‌ای آن‌ها: الف) توسط Ghafari-Ashtiany و Tavakkoli و همکاران (۲۰۱۱) و ب) طبق مطالعات Karimiparidari و همکاران (۱۹۹۹)، ج) به همراه مقادیر پیشنهادی جدید برای شتاب حداکثر زمین بر اساس مطالعات پارامتریک Zare (۲۰۱۲)

چنین مطالعاتی برای شهرهایی مثل اصفهان (Tajmir Riahi و Ajallooian, ۲۰۱۴) و اراک (Ghodrati Amiri و همکاران، ۲۰۱۰) به خطر نسبی یکسان با شهر بناب و همچنین تبریز (Hoseinpour و Zare, ۲۰۰۹)، ارومیه (قلندرزاده و همکاران، ۱۳۸۲)، سمنجان (Andisheh, ۲۰۰۷)، کرمانشاه (Naeini و Zarincheh, ۲۰۱۰) و دیگر شهرها انجام شده است.

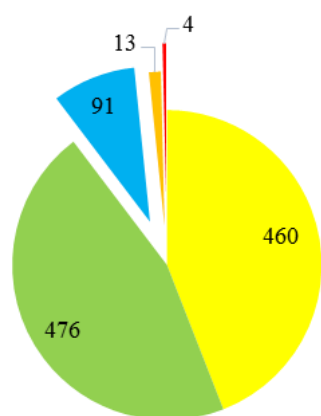
محدوده زلزله‌های متوسط تا بزرگ $6.2 \leq M_s \leq 8.2$ صادق می‌باشند.

۲-۲- تحلیل آماری داده‌ها

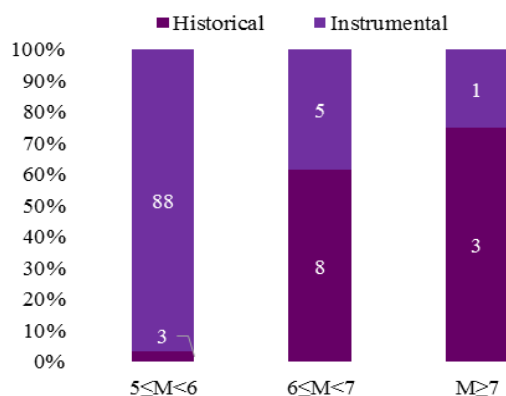
تحلیل‌های آماری داده‌های لرزه‌ای یکسان‌سازی شده جمع-آوری شده به منظور بررسی فراوانی و توزیع زلزله‌های منطقه بر اساس بزرگی، زمان وقوع و عمق آن‌ها در راستای مطالعه لرزه-خیزی منطقه با استفاده از نرم‌افزار Zmap Wyss و همکاران، (۲۰۰۱) که یکی از نرم‌افزارهای کاربردی برای تحلیل‌های گرافیکی و آماری داده‌های زمین لرزه می‌باشد انجام گرفته است.

شکل (۴) فراوانی بازه‌های بزرگی زلزله‌ها در کاتالوگ را نشان می‌دهد که چنانچه مشخص شده است زلزله‌های بزرگ ($M_w \geq 5$) جهت بررسی بیشتر جدا شده‌اند. شکل (۵) نیز توزیع این زلزله‌های بزرگ در طول زمان را ارائه می‌نماید که نظر به سهم بیشتر وقایع تاریخی طبق مفهوم دوره بازگشت نشان از اهمیت مطالعات لرزه‌ای در منطقه دارد.

■ $M < 3$ ■ $3 \leq M < 5$ ■ $5 \leq M < 6$ ■ $6 \leq M < 7$ ■ $M \geq 7$



شکل ۴- فراوانی بزرگی زلزله‌های روی داده در شعاع ۱۵۰ کیلومتری منطقه مورد مطالعه تا سال ۲۰۱۵ میلادی



شکل ۵- توزیع زلزله‌های بزرگ‌تر از ۵ ریشتر ($M_w \geq 5$) کاتالوگ در طول زمان

داده از سال ۱۹۰۰ میلادی به بعد) اساساً از پایگاه‌های ثبت داده-های لرزه‌ای پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله (IIEES، ۲۰۱۶) به دست آمده و تکمیل بودن آن بر اساس اطلاعات موجود در پایگاه‌های سازمان زمین‌شناسی آمریکا (USGS، ۲۰۱۶)، مؤسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران (IRSC، ۲۰۱۶) و مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی (BHRC، ۲۰۱۶) کنترل شده است. با توجه به مشخص بودن مرجع کاتالوگ (IIEES، ۲۰۱۶) و قابلیت بدون محدودیت دستیابی به آن، جدول (۱) مشخصات کلی کاتالوگ تهیه‌شده را نشان می‌دهد.

جدول ۱- مشخصات کلی کاتالوگ تهیه‌شده برای زلزله‌های روی داده در محدوده مورد مطالعه تا سال ۲۰۱۵ میلادی

طول و عرض جغرافیایی محدوده مورد مطالعه		تعداد	تعداد	تعداد
طول جغرافیایی	عرض جغرافیایی	زلزله‌های تاریخی	زلزله‌های دستگاهی	زلزله‌های رخ داده
ابتدا ۴۴/۴۰°	ابتدا ۴۷/۷۰°	۱۴	۱۰۳۰	۱۰۴۴
انتهای ۳۹/۰۰°	انتهای ۳۵/۷۰°			

چنانچه ملاحظه می‌گردد، در محدوده مورد مطالعه تا سال ۲۰۱۵ میلادی ۱۴ زلزله به صورت تاریخی، ۱۰۳۰ زلزله به صورت دستگاهی و در مجموع ۱۰۴۴ زلزله ثبت شده‌اند. برای یکسان‌سازی بزرگ‌های ثبت‌شده و یک‌دست شدن داده-های لرزه‌ای، از بزرگای M_w استفاده شده است که به عنوان معیاری مناسب دارای ماهیت فیزیکی و مستقل از تجهیزات لرزه‌ای می‌باشد. بدین منظور نیز روابط (۱) تا (۵) برای تبدیل بزرگ‌های مختلف به M_w مدنظر قرار گرفته‌اند (نشریه ۶۲۶، ۱۳۹۲؛ Karimiparidari و همکاران، ۲۰۱۳؛ UP-Seis، ۲۰۱۶).

$$M_w = 0.85 \times m_b + 1.03 \quad (۱)$$

$$M_w = 0.67 \times M_N + 1.73 \quad (۲)$$

$$M_I = 3.73 \times \ln M_w - 0.51 \quad (۳)$$

$$M_w = 0.66 \times M_S + 2.11 \quad (۴)$$

$$M_w = 0.93 \times M_S + 0.45 \quad (۵)$$

در این روابط M_w بزرگی گشتاور زلزله، m_b بزرگی موج حجمی، M_I بزرگی محلی (ریشتر)، M_N بزرگی Nuttli یا در حقیقت همان m_{bLg} و M_S بزرگی امواج سطحی بوده و رابطه (۱) در محدوده $3.5 \leq m_b \leq 6.2$ ، رابطه (۲) در بازه $3.5 \leq M_N \leq 6.3$ ، رابطه (۳) در بازه $4.5 \leq M_I \leq 7.5$ ، رابطه (۴) در محدوده تقریبی زلزله‌های ضعیف تا متوسط $2.8 \leq M_S < 6.2$ و رابطه (۵) نیز در

۲-۳- بررسی عدم قطعیت

عواملی همچون تعداد کم ایستگاه‌های لرزه‌نگاری، توزیع نامناسب ایستگاه‌ها و عدم تناسب مدل‌های سرعت از عواملی هستند که موجب عدم قطعیت (U) پارامترهای لرزه‌ای ایران می‌شوند. نظر به اینکه بزرگی زلزله (M) از معیارهای مهم ارزیابی پارامترهای لرزه‌ای است، عدم قطعیت نیز بر این اساس بیان (UM) و لحاظ ($M \pm UM$) می‌گردد (دهقان و همکاران، ۱۳۹۱).

اکثر پژوهشگران نشان داده‌اند که در بهترین حالت برای ثبت دستگاهی زمین‌لرزه‌ها حداقل به اندازه 0.2 واحد بزرگی عدم قطعیت وجود دارد (Bath، ۱۹۷۹؛ Kasahara، ۱۹۸۵). در مورد زلزله‌های تاریخی نیز که بزرگی تخمینی آن‌ها متأثر از نوع و کیفیت اطلاعات لرزه‌ای مورد استفاده (Melville و Ambrasays، ۱۹۸۲؛ Berberian، ۱۹۹۵) می‌باشد با توجه به پژوهش‌های Mirzaei و همکاران (۱۹۹۷) این عدم قطعیت را می‌توان بین 0.4 تا 0.8 واحد بزرگی در نظر گرفت.

در پژوهش حاضر، طبق راهنمای تحلیل خطر تحت عنوان نشریه ۶۲۶ معاونت برنامه‌ریزی (۱۳۹۲) عدم قطعیت UM برای زلزله‌های تاریخی برابر 0.5 واحد، برای زلزله‌های دستگاهی ثبت‌شده تا سال ۱۹۶۳ میلادی برابر 0.3 واحد و برای زلزله‌های دستگاهی بعد از این تاریخ برابر 0.1 واحد در نظر گرفته شده‌اند. این مقادیر با توجه به هدف پژوهش در جهت افزایش ($M+UM$) تعیین کننده (ایجاد توان لرزه‌ای بیشینه) اعمال و به کار رفته‌اند.

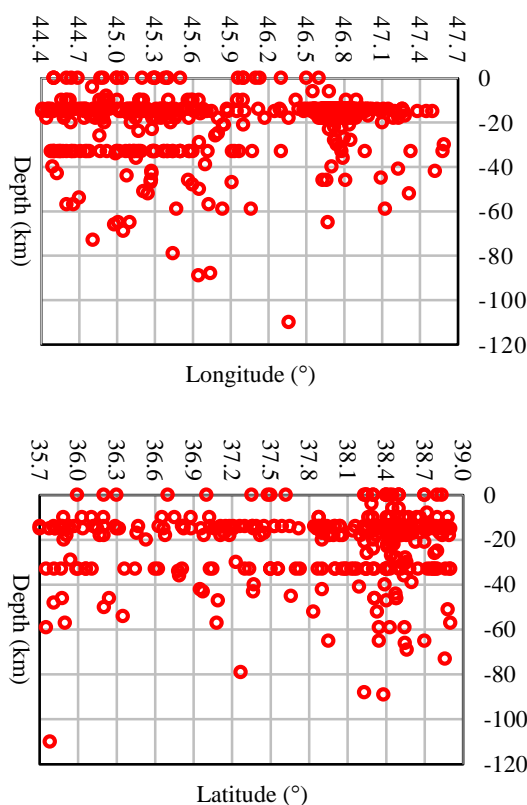
۳- چشمه‌های لرزه‌ای

چشمه عارضه‌ای نقطه‌ای، خطی و یا ناحیه‌ای است که یک یا چند زمین‌لرزه و یا زمین‌لرزه‌های متعددی را می‌توان به آن مرتبط دانست. به عبارت دیگر زمین‌لرزه‌ها در اثر فعالیت همین چشمه‌های لرزه‌ای رخ می‌دهند و به طور کلی چشمه‌های لرزه‌ای از دیدگاه زمین‌شناسی با واژه شناخته‌شده گسل مرتبط می‌شوند که البته یک چشمه می‌تواند شامل چندین گسل نیز باشد. بنابراین، شناسایی و بررسی چشمه‌ها اهمیت می‌یابند.

۳-۱- شناسایی چشمه‌های لرزه‌ای

برای شناسایی چشمه‌های لرزه‌ای مؤثر بر منطقه در محدوده مورد مطالعه نقشه گسل‌های فعال ایران (حسامی و همکاران، ۱۳۸۲) در مقیاس ۱:۲۵۰۰۰۰۰ و نتایج تحقیقات مربوط اخیر (Solaymani Azad، ۲۰۱۰) بررسی شده‌اند.

شکل (۷-الف) نقشه گسل‌های فعال ایران (حسامی و همکاران، ۱۳۸۲) و قسمت شکل (۷-ب) آن اطلاعات به‌روز شده (Solaymani Azad، ۲۰۱۰) را نشان می‌دهند که در هر دو قسمت محدوده مورد مطالعه (شعاع ۱۵۰ km از مرکز شهر بناب) بزرگ‌نمایی شده است.



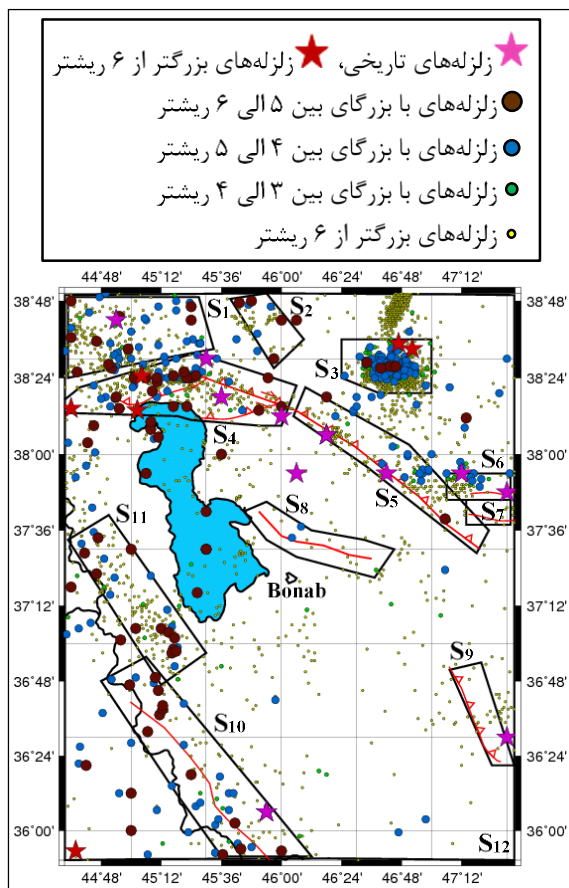
شکل ۶- عمق رخدادهای لرزه‌ای محدوده مورد مطالعه

جدول ۲- توزیع فراوانی زلزله‌های دارای بزرگی مختلف

بیشتر از ۳ ریشتر در عمق زمین

عمق رخدادها (km)	تعداد رخدادها	حداقل بزرگی (M_w)	حداکثر بزرگی (M_w)
۰ تا ۲۰	۴۴۳	۳/۱	۷/۳
۲۰ تا ۴۰	۸۷	۳/۳	۷/۷
۴۰ تا ۶۰	۳۰	۳/۲	۵/۳
۶۰ تا ۸۰	۷	۴/۶	۵
۸۰ تا ۱۰۰	۲	۴/۶	۴
۱۰۰ تا ۱۲۰	۱	۴/۵	۴/۵

در شکل (۶) اما گستره عمق‌های مراکز درونی زلزله‌های بزرگ‌تر از ۳ ریشتر کاتالوگ بر اساس طول و عرض جغرافیایی محل رخداد نشان داده می‌شود. چنانچه ملاحظه می‌گردد با توجه به تعداد زلزله‌های روی داده در حوالی عمق ۲۰ کیلومتری زمین می‌توان عمق سائیزموتیک منطقه مورد مطالعه را در این حدود در نظر گرفت، طوری که طبق جدول (۲) تعداد زلزله‌های رخ داده تا این عمق به مراتب بیشتر از سایر اعماق و بنا بر حداقل و حداکثر بزرگی‌های مربوط مشتمل بر زلزله‌های دارای بزرگی‌های مختلف می‌باشد.

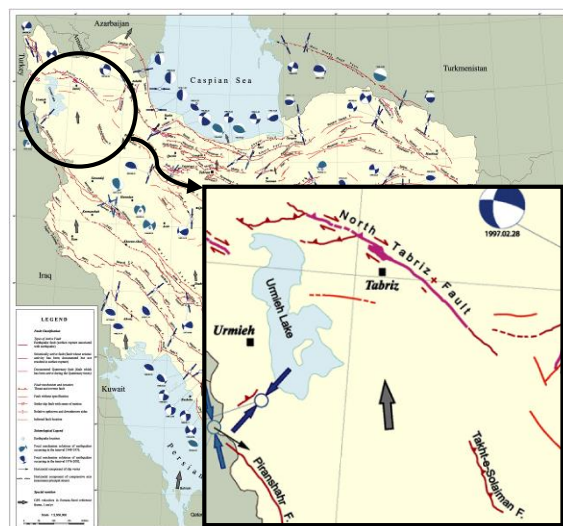


شکل ۸- چشمه‌های لرزه‌ای محدوده مورد مطالعه

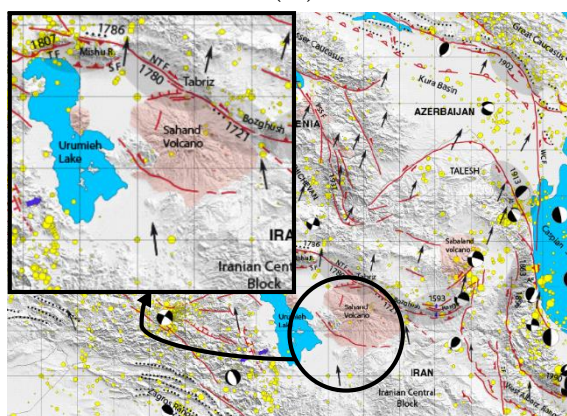
با توجه به این که گسل‌های چشمه‌های ۱، ۲، ۳ و ۱۱ نامشخص می‌باشند عملکرد آن‌ها نظر به ایجاد بحرانی‌ترین حالت در تخمین توان لرزه‌ای که موضوع زیربخش بعد می‌باشد فشاری در نظر گرفته می‌شود. عملکرد گسل‌های میشو، تسوج، صوفیان، و شمال تبریز که چشمه‌های ۴ و ۵ را به وجود می‌آورند مرکب از فشاری و امتداد لغز می‌باشند. گسل‌های شمال و جنوب بزگوش که چشمه‌های ۶ و ۷ را به وجود می‌آورند از نوع نرمال می‌باشند. گسل مراغه در چشمه ۸ امتداد لغز می‌باشد. گسل تخت سلیمان در چشمه ۹ فشاری و گسل پیرانشهر در چشمه ۱۰ نرمال می‌باشد. چشمه ۱۲ نیز با توجه به غلبه گسل‌های فشاری به سایر انواع گسل‌ها عملاً دارای گسل‌های فشاری فرض می‌شود. به این ترتیب اطلاعات لازم برای تخمین توان لرزه‌ای چشمه‌ها تکمیل می‌گردند و در ادامه می‌توان توان لرزه‌ای چشمه‌ها را تخمین زد.

۳-۲- تخمین توان لرزه‌ای چشمه‌ها

توان لرزه‌ای هر چشمه در حقیقت حداکثر قدرت زلزله ناشی از فعالیت آن بوده و با توجه مشخصات گسل‌های چشمه تعیین می‌گردد. روابط متعددی در پژوهش‌های متفاوت انجام گرفته برای تخمین توان لرزه‌خیزی گسل‌ها ارائه گردیده‌اند که عمدتاً بر اساس طول گسل می‌باشند. البته در برخی از این



(الف)



(ب)

شکل ۷- بررسی لرزه‌خیزی محدوده مورد مطالعه (۱۵۰ کیلومتری مرکز شهر بناب) بر اساس: الف) نقشه موجود گسل‌های فعال ایران (حسامی و همکاران، ۱۳۸۲)، ب) به کمک مطالعات جدیدتر (Solaymani Azad, ۲۰۱۰)

چنانچه ملاحظه می‌گردد، به واسطه مطالعات جدیدتر گسل‌های بیشتری در منطقه شناسایی شده‌اند که از دلایل تغییرات موضوع شکل (۲) در مقایسه ویرایش‌های سوم و چهارم استاندارد ۲۸۰۰ می‌باشند. به عنوان نمونه می‌توان به وجود گسلی در جنوب کوه‌های سهند اشاره نمود که همان گسل مراغه می‌باشد. بدین ترتیب گسل‌های شمال تبریز، میشو، تسوج، صوفیان، بزگوش، تخت سلیمان، پیرانشهر و مراغه در محدوده مورد مطالعه شناسایی و با افزودن اطلاعات زلزله‌های پیشین به مختصات این گسل‌ها چشمه‌های لرزه‌ای مشخص می‌گردند. بر این اساس، طوری که در شکل (۸) رسم شده توسط نرم‌افزار GMT (Smith و Wessel, ۲۰۱۳) نشان داده می‌شود ۱۱ چشمه قابل تشخیص می‌باشند که با فرض کل محدوده به عنوان چشمه‌ای دیگر جهت لحاظ نمودن رخداد‌های خارج این چشمه‌ها جمعاً ۱۲ چشمه در محدوده مورد مطالعه مؤثر خواهند بود.

M_S $= 0.809 + 1.341 \log L$	نرمال	(۹)	روابط نوع گسل نیز مدنظر قرار گرفته است. از جمله پژوهش‌های مطرح در این زمینه می‌توان به کارهای Mohajer Ashjaei و Nowroozi (۱۹۷۸)، Ambrasays و Melville (۱۹۸۲)، Slemmons (۱۹۸۲) و همچنین Coppersmith و Wells (۱۹۹۴) اشاره نمود. روابط (۶) تا (۱۳) به ترتیب این روابط را نشان می‌دهند. البته در دو مورد آخر (روابط Slemmons و Wells و Coppersmith) نوع گسل هم مدنظر قرار گرفته و روابط متفاوتی برای گسل‌های امتداد لغز، نرمال و فشاری ارائه شده‌اند.
$M_S = 2.02 + 1.142 \log L$	فشاری	(۱۰)	
$M_W = 5.16 + 1.12 \log L$	امتداد لغز	(۱۱)	
$M_W = 4.86 + 1.32 \log L$	نرمال	(۱۲)	
$M_W = 5 + 1.22 \log L$	فشاری	(۱۳)	

در این روابط، مقدار L با توجه به این‌که تمامی چشمه‌های شکل (۸) سطحی می‌باشند بر اساس روش Kramer (۱۹۹۶) معادل بیشترین فاصله گوشه به گوشه سطح چشمه و بر حسب متر در روابط (۸) تا (۱۰) و کیلومتر در بقیه روابط اعمال شده است. نظیر به این‌که فقط روابط (۱۱) تا (۱۳) بر اساس M_W بیان شده‌اند، رابطه (۵) نیز جهت یکسان‌سازی استفاده شده است. به این ترتیب، توان لرزه‌ای چشمه‌ها در جدول (۳) ارائه می‌گردد.

$$M_S = 5.4 + \log L \quad (۶)$$

$$M_S = 4.629 + 1.429 \log L \quad (۷)$$

$$M_S = 1.404 + 1.169 \log L \quad (۸)$$

جدول ۳- توان لرزه‌ای چشمه‌ها

بزرگی قوی‌ترین زلزله ثبت شده در چشمه (M_W)	تفاوت میانگین تخمین از حداقل تخمین (%)	تفاوت میانگین تخمین از حداکثر تخمین (%)	توان لرزه‌ای تخمینی چشمه										
			میانگین (M_W)	Wells - Coppersmith (M_W)	Slemmons (M_S)	Slemmons (M_S)	Ambreasays - Melville (M_W)	Ambreasays - Melville (M_S)	Mohajer Ashjaei - Nowroozi (M_W)	Mohajer Ashjaei - Nowroozi (M_S)	عملکرد غالب گسل - های چشمه	طول چشمه (km)	شماره چشمه
۵/۹۰	+۱/۷۷	-۲/۳۶	۷/۴۶	۷/۴۴	۷/۶۴	۷/۷۳	۷/۴۲	۷/۴۹	۷/۳۳	۷/۴۰	فشاری	۱۰۰	۱
۵/۶۰	+۰/۷۱	-۲/۸۹	۷/۰۶	۷/۰۲	۷/۲۷	۷/۳۳	۶/۹۵	۶/۹۹	۷/۰۱	۷/۰۵	فشاری	۴۵	۲
۶/۳۰	+۱/۲۶	-۲/۶۹	۷/۲۴	۷/۲۱	۷/۴۴	۷/۵۲	۷/۱۶	۷/۲۲	۷/۱۵	۷/۲۱	فشاری	۶۵	۳
۷/۷۰	+۲/۱۲	-۲/۱۶	۷/۷۰	۷/۷۰	۷/۸۷	۷/۹۸	۷/۷۰	۷/۸۰	۷/۵۴	۷/۶۲	فشاری*	۱۶۵	۴
۷/۷۰	+۲/۳۹	-۲/۰۴	۷/۶۹	۷/۷۰	۷/۸۵	۷/۹۶	۷/۶۹	۷/۷۹	۷/۵۲	۷/۶۰	فشاری*	۱۶۰	۵
۶/۲۰	+۰/۷۲	-۰/۵۷	۶/۹۶	۷/۰۰	۶/۹۷	۷/۰۱	۶/۹۱	۶/۹۵	۶/۹۸	۷/۰۲	نرمال	۴۲	۶
۶/۱۰	+۱/۰۴	-۰/۸۸	۶/۷۹	۶/۸۱	۶/۷۸	۶/۸۱	۶/۷۲	۶/۷۴	۶/۸۵	۶/۸۸	نرمال	۳۰	۷
۴/۹۰	+۱/۹۹	-۰/۹۶	۷/۱۹	۷/۲۶	۷/۰۵	۷/۱۰	۷/۲۵	۷/۳۱	۷/۲۱	۷/۲۷	امتداد لغز	۷۵	۸
۵/۶۰	+۱/۳۹	-۲/۵۴	۷/۲۸	۷/۲۵	۷/۴۷	۷/۵۵	۷/۲۱	۷/۲۷	۷/۱۸	۷/۲۴	فشاری	۷۰	۹
۶/۴۰	+۳/۳۲	-۱/۲۹	۷/۶۷	۷/۷۷	۷/۶۹	۷/۷۹	۷/۶۹	۷/۷۹	۷/۵۲	۷/۶۰	نرمال	۱۶۰	۱۰
۵/۹۰	+۱/۷۷	-۲/۳۶	۷/۴۶	۷/۴۴	۷/۶۴	۷/۷۳	۷/۴۲	۷/۴۹	۷/۳۳	۷/۴۰	فشاری	۱۰۰	۱۱
۷/۷۰	-	-	۷/۷۰	-	-	-	-	-	-	-	فشاری	-	۱۳**

* مرکب از فشاری و امتداد لغز که به نفع اطمینان با توجه به روابط (۶) تا (۱۳) فشاری در نظر گرفته شده است.

** در این چشمه، با توجه به ماهیت آن، عملکرد غالب به صورت فشاری و توان لرزه‌ای برابر با بزرگی قوی‌ترین زلزله ثبت شده در نظر گرفته شده است.

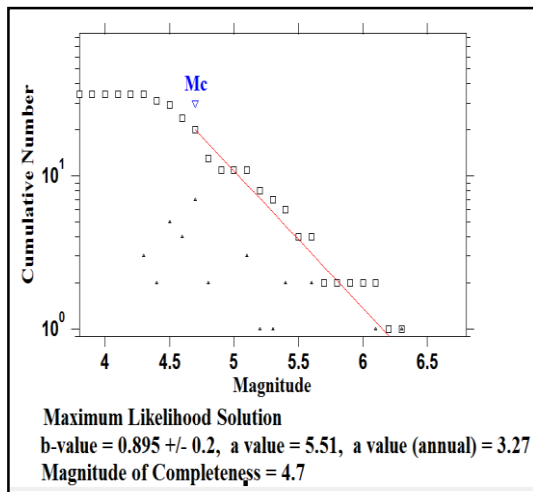
۴-۱- تعیین پارامترهای لرزه‌خیزی منطقه

لرزه‌خیزی یک منطقه علاوه بر توان لرزه‌زایی آن (M_{max}) اساساً متأثر از دو پارامتر مهم دیگر به نام‌های b -value و $Rate$ نیز می‌باشد. $Rate$ در حقیقت مشخص‌کننده آهنگ سالانه رخداد زلزله‌ها برای آن منطقه می‌باشد یعنی هرچه تعداد زلزله‌ها بیشتر

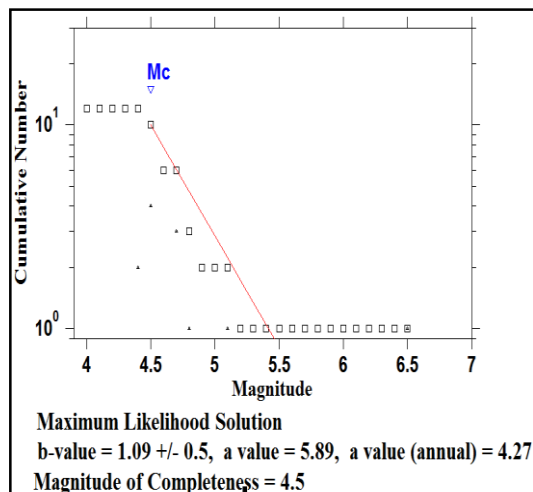
۴-۲- برآورد خطر زلزله

برآورد خطر زلزله برای منطقه پس از تعیین توان لرزه‌ای چشمه‌های موجود در محدوده مورد مطالعه نیازمند تعیین پارامترهای لرزه‌ای نیز می‌باشد. بدین صورت، خطر زلزله برای منطقه بر اساس شتاب حداکثر زمین قابل تخمین خواهد بود.

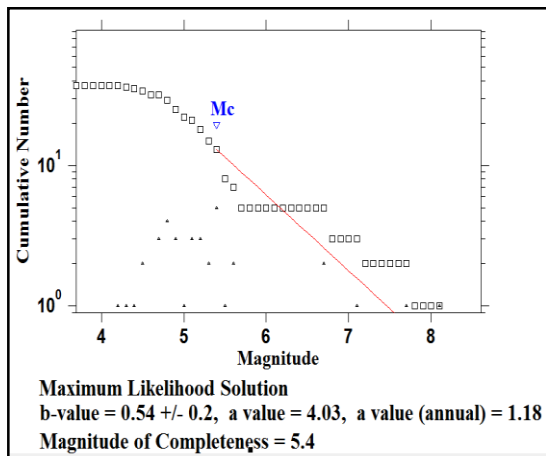
(۱۵) نشان داده می‌شوند. مقادیر a -value، b -value و M_c (بزرگی آستانه کامل بودن) روی هر شکل نشان داده شده‌اند.



شکل ۹- نمودار Gutenberg-Richter برای چشمه ۱



شکل ۱۰- نمودار Gutenberg-Richter برای چشمه ۳



شکل ۱۱- نمودار Gutenberg-Richter برای چشمه ۴

باشد مقدار پارامتر $Rate$ هم بیشتر است. b -value نیز مشخص کننده خطر آن منطقه از نظر تعداد رخداد های بزرگ لرزه‌ای است یعنی اگر در گذشته زلزله‌های بزرگ در منطقه به وقوع پیوسته باشند احتمالاً در آینده هم روی خواهند داد.

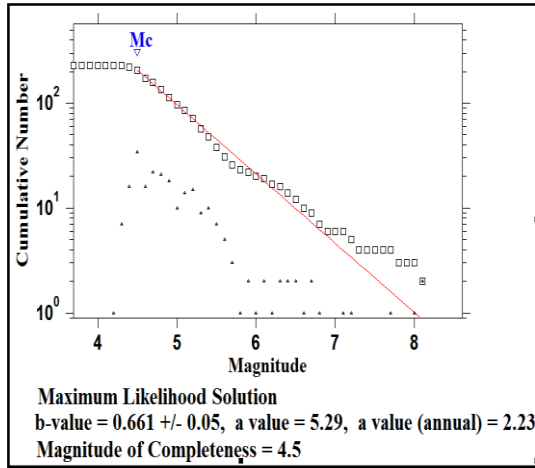
با توجه به این که تحلیل خطر لرزه‌ای جهت سهولت امر به تقریب با فرض مستقل بودن وقوع زمین لرزه‌ها انجام می‌گیرد می‌بایست پیش‌لرزه‌ها و پس‌لرزه‌های زلزله‌های بزرگ از مجموعه داده‌ها حذف گردند. به این منظور، از روش Uhrhammer (۱۹۸۶) استفاده شده و توسط نرم‌افزار Zmap اعمال می‌شود. این روش، با در نظر گرفتن بازه‌های زمانی و مکانی مشخص برای هر رخداد لرزه‌ای قبل و بعد آن را بررسی و زلزله‌های وابسته را حذف می‌نماید.

یکی از معروف‌ترین روابطی که برای اندازه‌گیری لرزه‌خیزی به کار می‌رود رابطه بازگشتی Gutenberg و Richter (۱۹۵۴) است. این رابطه که بر اساس پراکندگی فراوانی بزرگی تعریف می‌گردد به صورت رابطه (۱۴) می‌باشد:

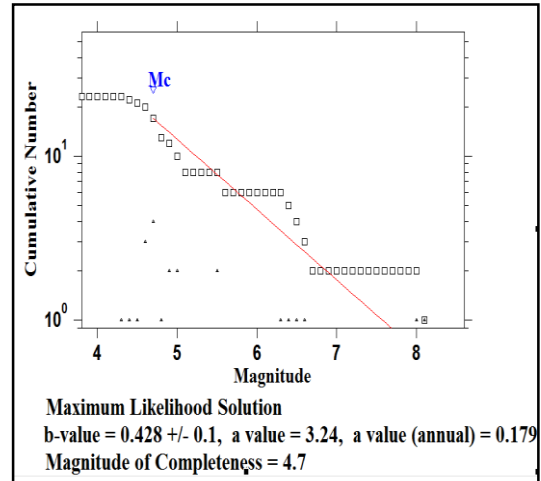
$$N = 10^{(a-bM)} \quad (14)$$

در این رابطه N تعداد زمین‌لرزه‌ها با بزرگی M یا بیشتر از آن می‌باشد و a و b پارامترهای لرزه‌خیزی منطقه می‌باشند که اولی (عرض از مبدأ مشهور به a -value) میزان لرزه‌خیزی را نشان می‌دهد (Crampin و Yuan، ۲۰۱۵) و دومی شیب خط Gutenberg-Richter است که همان b -value می‌باشد و کوچک بودن آن به معنای بالا بودن میانگین بزرگی زلزله‌های رخ داده در منطقه یا به عبارتی دیگر فزونی تعداد زمین‌لرزه‌های بزرگ به زمین‌لرزه‌های کوچک است (Wyss و Wyemer، ۲۰۰۰). این روش دارای دو نقص عمده است که عبارت‌اند از عدم توجه به زلزله‌های تاریخی و صرف‌نظر از عدم قطعیت. از این رو، در این خصوص روش‌های جدیدی مانند روش Kijko و Sellevoll (۱۹۸۹ و ۱۹۹۲) نیز مطرح هستند که عدم قطعیت‌ها را اعمال و زلزله‌های تاریخی را نیز مد نظر قرار می‌دهند. در این پژوهش، هر دو روش مورد استفاده و مقایسه قرار می‌گیرند.

در روش Gutenberg-Richter، ابتدا با استفاده از نرم‌افزار Zmap شیب خط Gutenberg-Richter برای چشمه‌ها به دست می‌آید که البته این محاسبات عملاً برای چشمه‌های دارای حداقل رخداد های ثبت شده مستقل (پس از حذف پس‌لرزه‌ها و پیش‌لرزه‌ها) قابل انجام است. بر این اساس، در اینجا پس از اعمال روش Uhrhammer برای حذف رخداد های وابسته، شیب خط Gutenberg-Richter در چشمه‌های شماره ۱، ۳، ۴، ۵، ۱۰، ۱۱ و بر اساس کل منطقه برای چشمه ۱۲ قابل محاسبه می‌باشد که البته تأثیر چشمه‌های حذف شده نیز در چشمه ۱۲ لحاظ شده خواهد بود. نتایج به دست آمده در شکل‌های (۹) تا

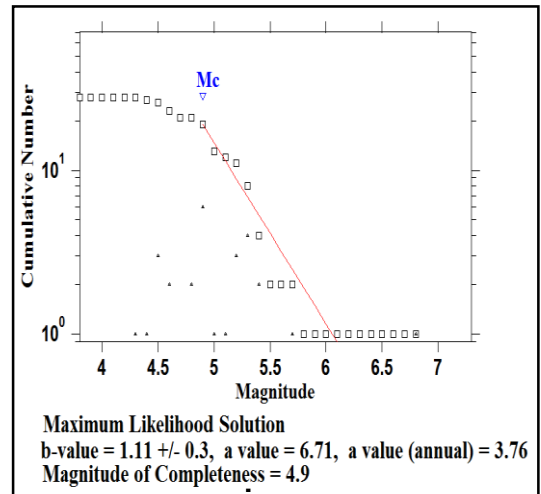


شکل ۱۵- نمودار Gutenberg-Richter برای کل منطقه

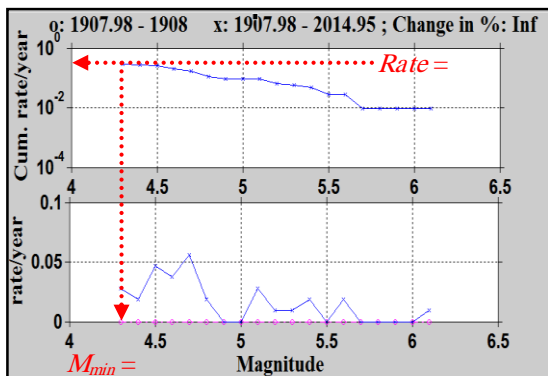


شکل ۱۲- نمودار Gutenberg-Richter برای چشمه ۵

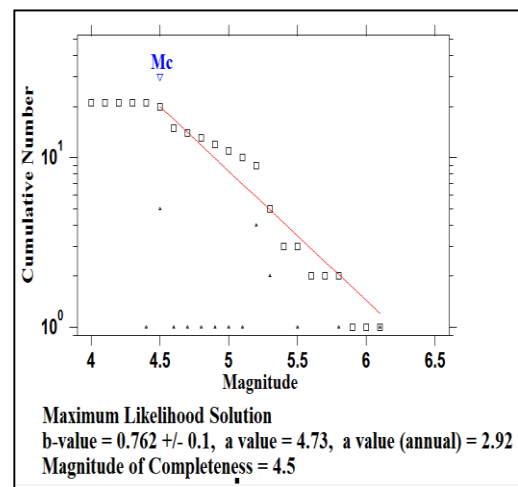
مقادیر b -value و M_c (به عنوان معیاری برای بزرگی حداقل یا همان M_{min}) به دست آمده از این نمودارها در محاسبه شتاب حداکثر زمین (زیربخش ۳-۴) به کار خواهند رفت. برای تعیین $Rate$ نیز نمودارهای غیرتجمعی و تجمعی رخدادهای سالانه زلزله‌ها در چشمه‌ها به کمک نرم‌افزار Zmap به دست آمده‌اند که شکل‌های (۱۶) تا (۲۲) این نمودارها را نشان می‌دهند.



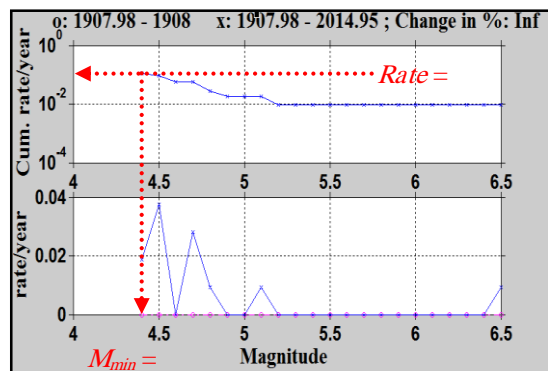
شکل ۱۳- نمودار Gutenberg-Richter برای چشمه ۱۰



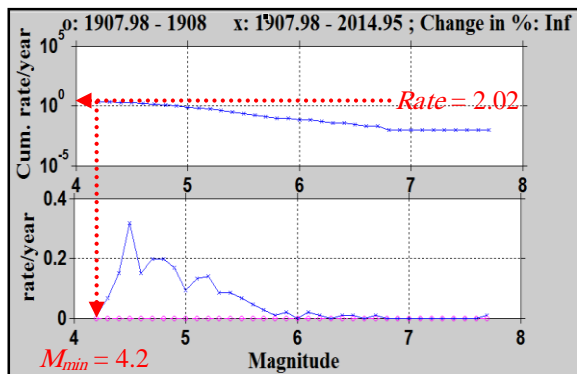
شکل ۱۶- نمودارهای غیرتجمعی و تجمعی رخدادهای چشمه ۱



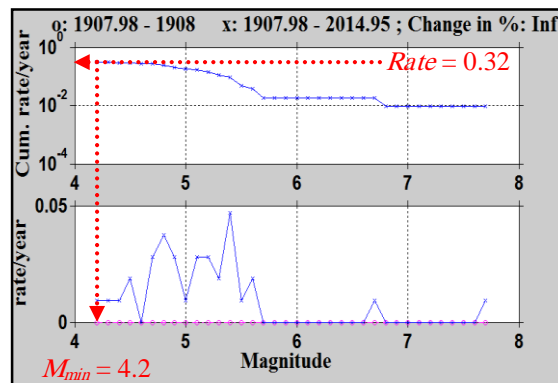
شکل ۱۴- نمودار Gutenberg-Richter برای چشمه ۱۱



شکل ۱۷- نمودارهای غیرتجمعی و تجمعی رخدادهای چشمه ۳



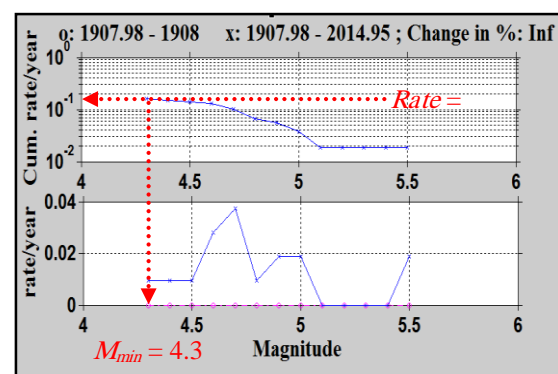
شکل ۲۲- نمودارهای غیر تجمعی و تجمعی رخدادهای کل منطقه



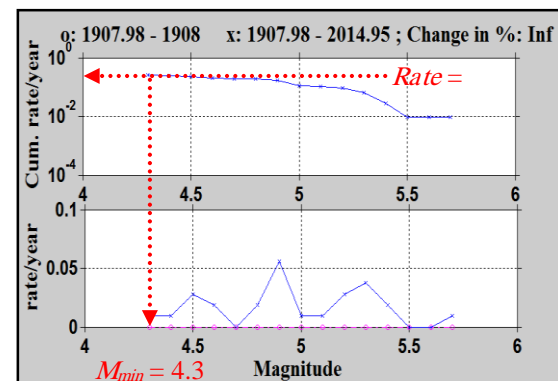
شکل ۱۸- نمودارهای غیر تجمعی و تجمعی رخدادهای چشمه ۴

مقادیر $Rate$ و M_{min} (اگر بزرگ تر از M_c نباشد) حاصل از این نمودارها روی هر شکل نشان داده شده‌اند. البته $Rate$ چشمه ۱۲ بر اساس تفاضل $Rate$ بقیه چشمه‌ها از $Rate$ کل منطقه برابر با 0.68 به دست می‌آید. به این ترتیب، تمامی پارامترهای لازم (b - $value$ و M_{min} و $Rate$ در علاوه بر عمق ساینموژنیک حاصل از شکل (۶) و نیز نوع عملکرد غالب گسل‌های هر چشمه به همراه M_{max} یا همان توان لرزه‌ای آن که هر دو در جدول (۳) گزارش شده‌اند) جهت محاسبه شتاب زمین بر اساس روش Gutenberg-Richter مشخص و محاسبات میسر می‌گردند.

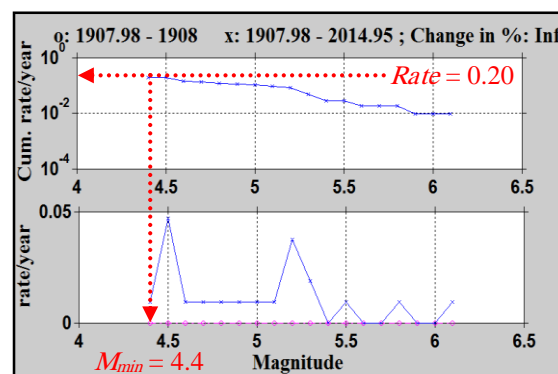
در روش Sellevoll-Kijko، ابتدا کاتالوگ یکسان‌سازی شده رخدادهای لرزه‌ای منطقه در قالب فایل متنی به نرم‌افزار Kijko (۲۰۰۱) معرفی می‌گردد. بعد از آن نوع داده‌های کاتالوگ به نرم‌افزار معرفی می‌شود (بزرگی یا شدت که در این پژوهش کاتالوگ بر اساس بزرگی می‌باشد). سپس گستره کاتالوگ تعیین می‌گردد (فقط تاریخی، فقط دستگاهی و یا هر دو که کاتالوگ این پژوهش شامل هر دوی زلزله‌های تاریخی و دستگاهی است). در ادامه نیز دوره‌های بازگشت (T_r) موردنظر مشخص می‌شوند (حداقل سه دوره بازگشت) که در این پژوهش چهار دوره بازگشت ۱۰، ۴۷۵، ۹۷۵ و ۲۴۷۵ ساله با احتمال‌های فراگذشت (P_e) به ترتیب ۰.۹۹/۵٪، ۱۰٪، ۵٪ و ۲٪ در مدت t ۵۰ سال یا طبق رابطه $T_r = t / (-\ln(1 - P_e))$ معادل به ترتیب ۰.۹/۵٪، ۰.۱/۲٪، ۰.۱٪ و ۰.۰۴٪ در مدت یک سال در نظر گرفته شده‌اند. همچنین، انحراف معیار برای داده‌های تاریخی تعریف می‌گردد (یعنی برابر با ۰/۴ که البته برای زلزله‌های دستگاهی قدیم و جدید نیز انحراف معیارهای ۰/۲ و ۰/۱ به صورت پیش فرض خود نرم‌افزار اعمال می‌شوند). مقادیر M_{min} و M_{max} کاتالوگ مشخص می‌گردند. عدم قطعیت بر اساس زیربخش (۲-۳) به طور متوسط برابر با ۰/۴ تعریف می‌شود. تحلیل‌های نرم‌افزار انجام و در نهایت پارامترهای لرزه‌ای λ (نرخ رخدادهای لرزه‌ای یا همان $Rate$) و β (همان b -value تقسیم بر لگاریتم عدد نپر) به دست می‌آیند. این نتایج و نیز مقدار b -value محاسبه شده بر اساس β در جدول (۴) ارائه شده‌اند.



شکل ۱۹- نمودارهای غیر تجمعی و تجمعی رخدادهای چشمه ۵



شکل ۲۰- نمودارهای غیر تجمعی و تجمعی رخدادهای چشمه ۱۰



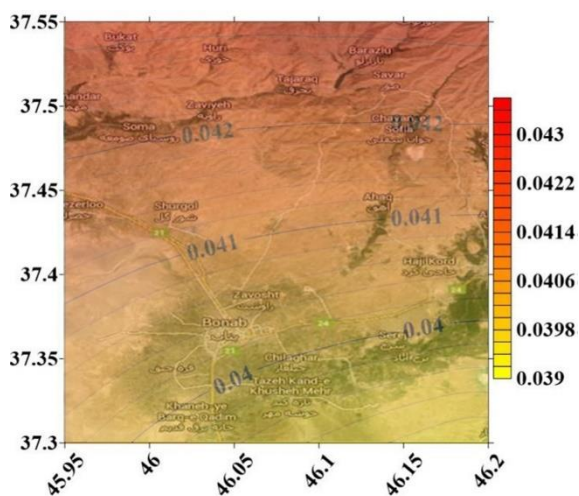
شکل ۲۱- نمودارهای غیر تجمعی و تجمعی رخدادهای چشمه ۱۱

Atkinson (۲۰۰۸) و Campbal و Bozorgnia (۲۰۰۸) با وزن-های مساوی مد نظر قرار می‌گیرند. بدین ترتیب محاسبه شتاب حداکثر زمین میسر می‌شود که گزارش آن در بخش بعد ارائه می‌گردد.

۴-۳- محاسبه شتاب حداکثر زمین در سنگ‌بستر

در این زیربخش، به دنبال تعیین عوامل مؤثر بر تخمین شتاب حداکثر زمین در سنگ‌بستر، برای محاسبه شتاب از نرم‌افزار EZ-FRISK (Risk Engineering Inc، ۲۰۱۱) استفاده می‌گردد که نرم‌افزاری کاربردی جهت تحلیل خطر زلزله می‌باشد. اطلاعاتی که برای استفاده از این نرم‌افزار جهت تحلیل خطر لرزه‌ای هر منطقه لازم می‌باشند عبارت‌اند از عمق سائیزموژنیک منطقه (زیربخش ۲-۲)، موقعیت جغرافیایی و نوع عملکرد چشمه‌های لرزه‌ای منطقه (زیربخش ۱-۳)، توان لرزه‌ای چشمه‌ها (زیربخش ۲-۳)، پارامترهای لرزه‌خیزی منطقه (زیربخش ۱-۴)، روابط کاهندگی (زیربخش ۲-۴) و دوره‌های بازگشت مفروض (که در این پژوهش چهار دوره بازگشت ۱۰، ۴۷۵، ۹۷۵ و ۲۴۷۵ سال در نظر گرفته می‌شوند).

شکل‌های (۲۳) تا (۲۶)، منحنی‌های هم‌شتاب رسم شده توسط نرم‌افزار Surfer (Golden Software، ۲۰۱۵) با استفاده از داده‌های به‌دست آمده از EZ-FRISK برای منطقه مورد مطالعه را به‌ترتیب در دوره‌های بازگشت ۱۰، ۴۷۵، ۹۷۵ و ۲۴۷۵ سال و بر اساس نتایج روش Gutenberg-Richter نشان می‌دهند. شکل‌های (۲۷) تا (۳۰) نیز این منحنی‌های هم‌شتاب را بر اساس نتایج روش Sellevoll-Kijko باز هم به ترتیب در دوره‌های بازگشت ۱۰، ۴۷۵، ۹۷۵ و ۲۴۷۵ سال نشان می‌دهند.



شکل ۲۳- نمودار خطوط هم‌شتاب سنگ‌بستر منطقه مورد مطالعه بر اساس نتایج روش Gutenberg-Richter برای زلزله‌هایی با دوره بازگشت ۱۰ سال

جدول ۴- Rate (همان λ) و b -value ضرب در لگاریتم عدد (نیر) حاصل از روش Sellevoll-Kijko برای چشمه‌های منطقه

شماره چشمه	نرخ رخدادهای لرزه‌ای (Rate یا همان λ)	پارامتر β	پارامتر b -value
۱	۰/۲۶۸	۲/۲۴۸	۰/۹۷۶
۳	۰/۱۰۰	۲/۵۸۶	۱/۱۲۳
۴	۰/۲۸۶	۱/۵۸۲	۰/۶۸۷
۵	۰/۱۴۲	۱/۳۱۴	۰/۵۷۱
۱۰	۰/۲۲۶	۲/۶۳۳	۱/۱۴۴
۱۱	۰/۱۷۶	۲/۰۲۰	۰/۸۷۷
۱۲	۰/۵۷۱	۱/۸۴۲	۰/۸۰۰

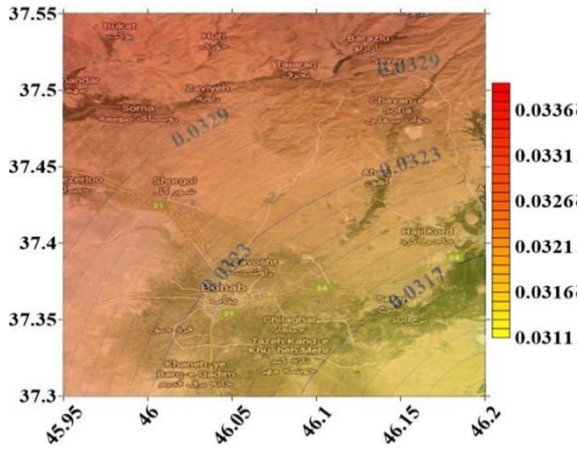
نتایج به‌دست آمده بر اساس روش Sellevoll-Kijko (جدول ۴) نیز در همان حد و اندازه‌های نتایج روش Gutenberg-Richter (شکل‌های (۹) تا (۲۲)) می‌باشند. البته چنانچه ملاحظه می‌گردد مقادیر به‌دست آمده برای b -value در روش Sellevoll-Kijko کمی بیشتر از روش Gutenberg-Richter می‌باشند و بالعکس آن نیز برای Rate صادق است اما هم‌خوانی کلی آن‌ها نشان‌دهنده صحت نتایج هر دو روش می‌باشد که برای محاسبه شتاب حداکثر زمین (موضوع زیربخش ۳-۴) مورد استفاده قرار خواهند گرفت. همچنین، مقادیر M_{max} (بزرگی حداکثر) محاسبه‌شده توسط نرم‌افزار Kijko برای کل منطقه در دوره‌های بازگشت مختلف در جدول (۵) ارائه می‌گردند تا ضمن ارزیابی توان لرزه‌ای محاسبه‌شده برای منطقه (جدول (۳)) مفاهیم لازم برای محاسبه شتاب حداکثر زمین نیز تکمیل گردند.

جدول ۵- مقادیر M_{max} حاصل از روش Sellevoll-Kijko برای دوره‌های بازگشت مختلف

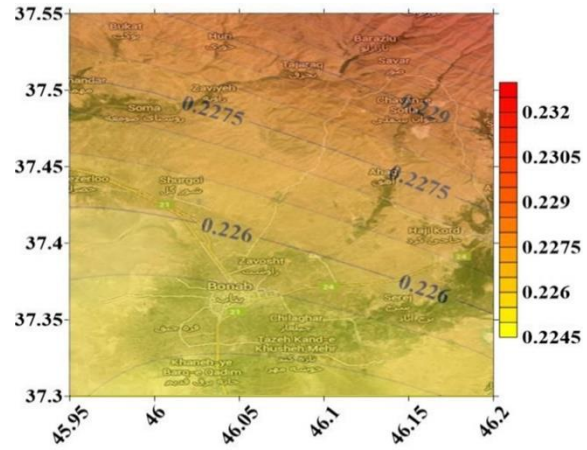
دوره بازگشت (سال)	احتمال فراگذشت سالانه (%)	احتمال فراگذشت در ۵۰ سال (%)	M_{max}
۱۰	۹/۵	۹۹/۵	۵/۵۰
۴۷۵	۰/۲	۱۰	۷/۳۵
۹۷۵	۰/۱	۵	۷/۵۵
۲۴۷۵	۰/۰۴	۲	۷/۷۰

۴-۲- روابط کاهندگی

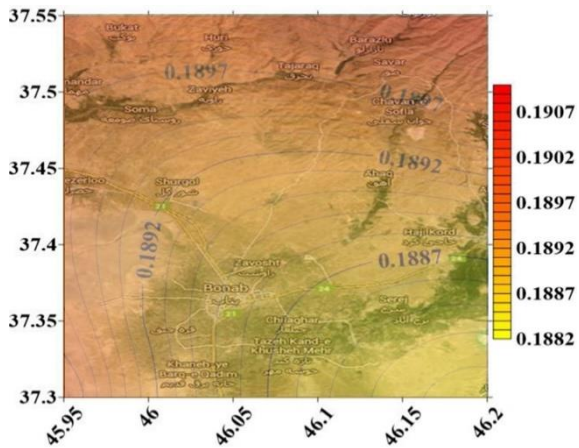
یکی دیگر از گام‌های مهم در فرآیند تحلیل خطر زلزله اعمال تأثیرات میرایی مسیر انتشار امواج لرزه‌ای در فرکانس‌ها و دامنه‌های این امواج حین انتشار آن‌ها از مرکز درونی زلزله تا ساختگاه می‌باشد که به کمک روابط کاهندگی انجام می‌گیرد و این روابط می‌بایست متناسب با ساختار تکتونیکی و لرزه‌خیزی منطقه باشند (نشریه ۶۲۶، ۱۳۹۲). از این رو، در این پژوهش نیز سه رابطه کاهندگی Abrahamson و Silva (۲۰۰۸) و Boore



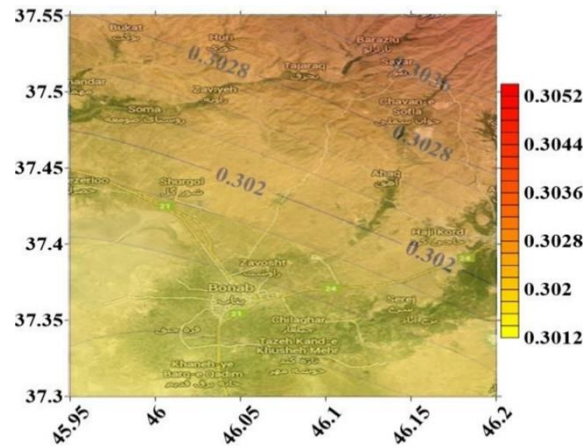
شکل ۲۷- نمودار خطوط هم‌شتاب سنگ‌بستر منطقه مورد مطالعه بر اساس نتایج روش Sellevoll-Kijko برای زلزله‌هایی با دوره بازگشت ۱۰ سال



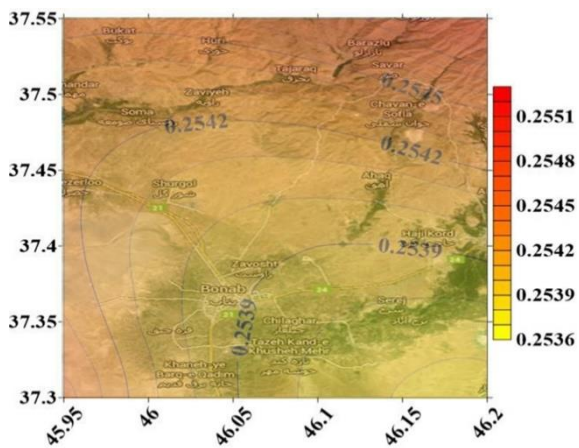
شکل ۲۴- نمودار خطوط هم‌شتاب سنگ‌بستر منطقه مورد مطالعه بر اساس نتایج روش Gutenberg-Richter برای زلزله‌هایی با دوره بازگشت ۴۷۵ سال



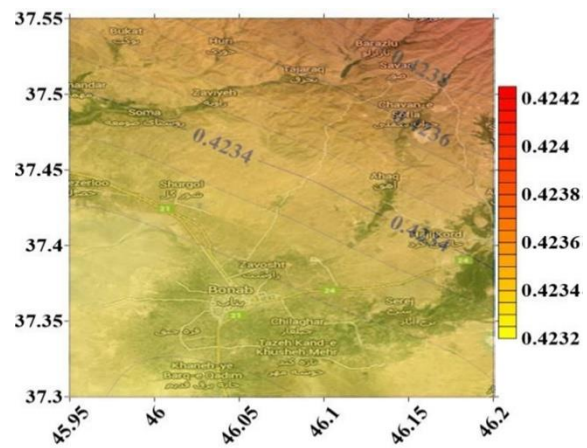
شکل ۲۸- نمودار خطوط هم‌شتاب سنگ‌بستر منطقه مورد مطالعه بر اساس نتایج روش Sellevoll-Kijko برای زلزله‌هایی با دوره بازگشت ۴۷۵ سال



شکل ۲۵- نمودار خطوط هم‌شتاب سنگ‌بستر منطقه مورد مطالعه بر اساس نتایج روش Gutenberg-Richter برای زلزله‌هایی با دوره بازگشت ۹۷۵ سال



شکل ۲۹- نمودار خطوط هم‌شتاب سنگ‌بستر منطقه مورد مطالعه بر اساس نتایج روش Sellevoll-Kijko برای زلزله‌هایی با دوره بازگشت ۹۷۵ سال



شکل ۲۶- نمودار خطوط هم‌شتاب سنگ‌بستر منطقه مورد مطالعه بر اساس نتایج روش Gutenberg-Richter برای زلزله‌هایی با دوره بازگشت ۲۴۷۵ سال

کیفیت مهندسی زلزله سازه‌ها نادیده گرفت، از دیدگاه مهندسی سازه- زلزله اقدام به بررسی خصوصیات لرزه‌ای جایگاه پروژه و در حالت کلی یک منطقه جهت افزایش کیفیت مهندسی زلزله سازه‌ها ضروری می‌نماید. در عمل، پس از ارزیابی خطر زلزله بر اساس سه عامل اول این بررسی از طریق ریزپهنه‌بندی لرزه‌ای تکمیل می‌گردد که عامل چهارم در آن مؤثر می‌باشد.

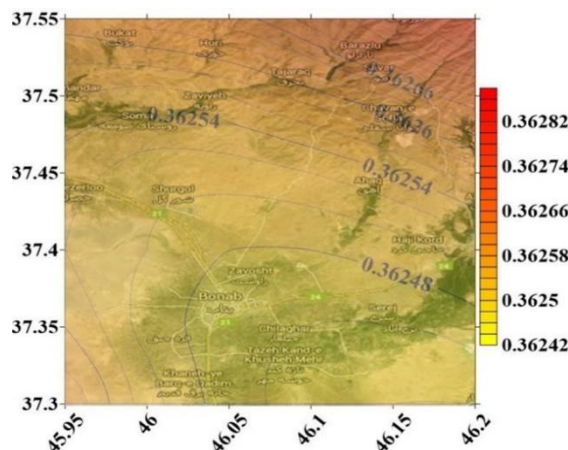
ریزپهنه‌بندی لرزه‌ای اساساً فرآیند تخمین واکنش لایه‌های خاک به زمین‌لرزه و ارزیابی تغییر خصوصیات زمین‌لرزه در واکنش به وضعیت سطح زمین است. در این فرآیند بخش‌های مختلف منطقه مورد مطالعه که به طور متفاوتی از زلزله متأثر می‌گردند مشخص می‌شوند. بدین منظور، اطلاعات متنوعی از تحلیل خطر زلزله در سنگ‌بستر منطقه، مشخصات جغرافیایی و زمین‌شناسی منطقه، واکنش ستون خاکی زمین بخش‌های مختلف منطقه به حرکات زمین‌لرزه و همچنین مواردی مانند وضعیت آب‌های زیرزمینی، استعداد روانگرایی و زمین‌لغزش در مناطق کوهستانی مورد نیاز می‌باشند. البته ریزپهنه‌بندی لرزه‌ای را می‌توان در سه سطح:

- ۱) بسیار دقیق با تحلیل دقیق پاسخ در مقیاس حداکثر ۱:۲۵۰۰۰
- ۲) دقیق با لرزه‌نگاری ابزاری به‌همراه مطالعات ساده زمین‌ساخت در مقیاس حداکثر ۱:۱۰۰۰۰۰
- ۳) کاربردی با مطالعات لرزه‌ای به کمک زلزله‌های ثبت‌شده به‌همراه مطالعات زمین‌ساخت از روی نقشه‌های زمین‌شناسی در مقیاس حداکثر ۱:۱۰۰۰۰۰۰ انجام داد (TC4، ۱۹۹۹).

در اینجا، هدف ارزیابی نیاز به ریزپهنه‌بندی برای منطقه مورد مطالعه است که به این منظور اول ملاحظات ژئوتکنیک جمع‌آوری و بررسی می‌شوند و سپس توپوگرافی منطقه مطالعه می‌شود تا ارزیابی شتاب در سطح زمین منطقه به صورت تابعی از شتاب در سنگ‌بستر میسر گردد.

۵-۱- جمع‌آوری و بررسی ملاحظات ژئوتکنیک

از آنجاکه ارزیابی شتاب حداکثر در تحلیل خطر زلزله برای سنگ‌بستر لرزه‌ای انجام می‌شود به منظور تخمین مقدار آن در سطح زمین می‌بایست خصوصیات زمین‌ساختی منطقه نیز لحاظ گردند. می‌دانیم سنگ‌بستر در دو نوع سنگ‌بستر لرزه‌ای و سنگ‌بستر مهندسی قابل تعریف است. سنگ‌بستر لرزه‌ای را می‌توان سنگی دانست که سرعت انتشار امواج برشی در آن بیش از حدود ۳۰۰۰ متر بر ثانیه می‌باشد اما از نظر کاربرد مهندسی سنگ‌بستر به لایه‌ای از زمین گفته می‌شود که سرعت امواج برشی در آن در حد ۷۰۰ متر بر ثانیه یا بیشتر باشد تا استقرار پی‌های عمیق روی آن میسر گردد و عملاً برای مطالعات لرزه‌ای اغلب پروژه‌های عمرانی می‌توان آن را همان سنگ‌بستر لرزه‌ای



شکل ۳۰- نمودار خطوط هم‌شتاب سنگ‌بستر منطقه مورد مطالعه براساس نتایج روش Sellevoll-Kijko برای زلزله-هایی با دوره بازگشت ۲۴۷۵ سال

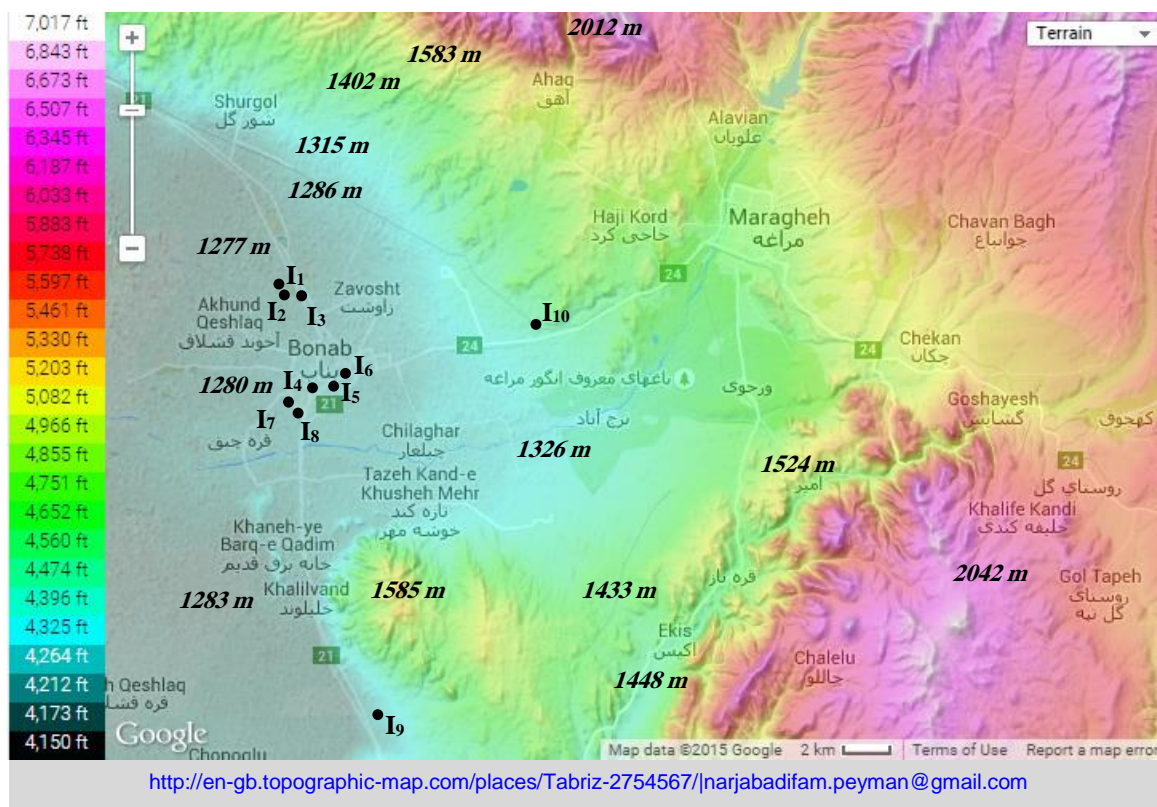
چنانچه ملاحظه می‌گردد بیشینه شتاب در سنگ‌بستر منطقه به ترتیب بر اساس روش‌های Gutenberg-Richter و Sellevoll-Kijko تقریباً به طور ثابت ۰/۴۲g و ۰/۳۶g برای زلزله‌های با احتمال فراگذشت ۲٪ در ۵۰ سال، ۰/۳۰g و ۰/۲۵g برای زلزله‌های با احتمال فراگذشت ۵٪ در ۵۰ سال، ۰/۲۳g و ۰/۱۹g برای زلزله‌های با احتمال فراگذشت ۱۰٪ در ۵۰ سال و ۰/۱۴g و ۰/۰۳g برای زلزله‌های با احتمال فراگذشت ۹۹/۵٪ در ۵۰ سال می‌باشند. در نتیجه، مقادیر میانگین از دو روش برای دوره‌های بازگشت مفروض به ترتیب عبارت خواهند بود از ۰/۳۹g، ۰/۲۸g، ۰/۲۱g و ۰/۰۳۵g. به این ترتیب، علاوه بر تعیین شتاب حداکثر سنگ‌بستر در دوره‌های بازگشت مفروض، مشخص می‌گردد شتاب مبنای ۰/۲۵g ویرایش چهارم استاندارد ۲۸۰۰ ایران برای دوره‌ی بازگشت ۴۷۵ سال با توجه به ضرایب اطمینان آئین‌نامه‌ای همانند اهمیت سیاسی- اقتصادی منطقه، جمعیت منطقه و وضعیت ساخت‌وساز در منطقه حتی با لحاظ نمودن گسل‌های جدید مانند گسل مراغه نیز تخمینی قابل اعتماد می‌باشد.

۵- ارزیابی ریزپهنه‌بندی لرزه‌ای

از نظر فنی، نتیجه مهندسی زلزله سازه‌ها عملاً متأثر از شش عامل مهم است. این عوامل عبارت‌اند از:

- ۱) خصوصیات منبع زلزله
- ۲) خصوصیات مسیر انتشار امواج لرزه‌ای
- ۳) موقعیت جایگاه پروژه نسبت به منبع زلزله
- ۴) خصوصیات ژئوتکنیک و توپوگرافی محل پروژه
- ۵) اصول و روش‌های طراحی و همچنین
- ۶) شرایط ساخت و اجرای سازه‌ها

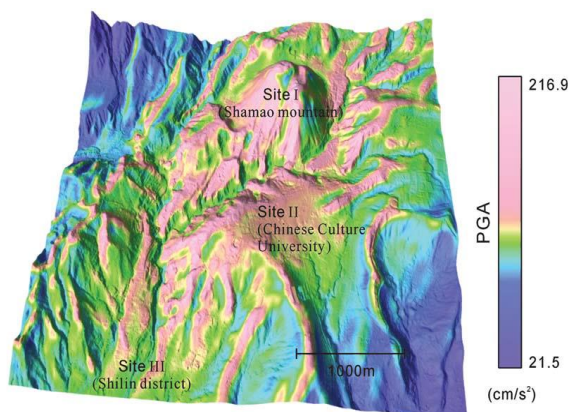
اگرچه تأثیر عوامل عمومی همچون فرهنگ جامعه، اقتصاد، آگاهی‌های علمی و توانمندی‌های اجرایی را نیز نمی‌توان در



شکل ۳۱- توزیع ایستگاه‌های مطالعاتی زمین‌ساخت منطقه روی نقشه توپوگرافی منطقه مورد مطالعه

۵-۲- توپوگرافی منطقه

مطالعات نشان داده‌اند وجود ناهمواری در منطقه موجب تغییر در آثار زلزله‌ها می‌گردد (Pitilakis و همکاران، ۲۰۰۴؛ Anggraeni، ۲۰۱۰؛ Jeong، ۲۰۱۳). آثار زلزله‌ها در بلندی‌ها افزایش، در پستی‌ها کاهش و در شیب‌های دو طرف ارتفاعات با توجه به ناهمواری‌ها تغییر می‌یابند. Lee و همکاران (۲۰۰۹) این آثار را برای منطقه‌ای کوهستانی به نام Yangminshan واقع در کشور تایوان تحت اثر زلزله‌ای روی داده در همین منطقه ارائه نموده‌اند. شکل (۳۲) این نتایج را نشان می‌دهد.



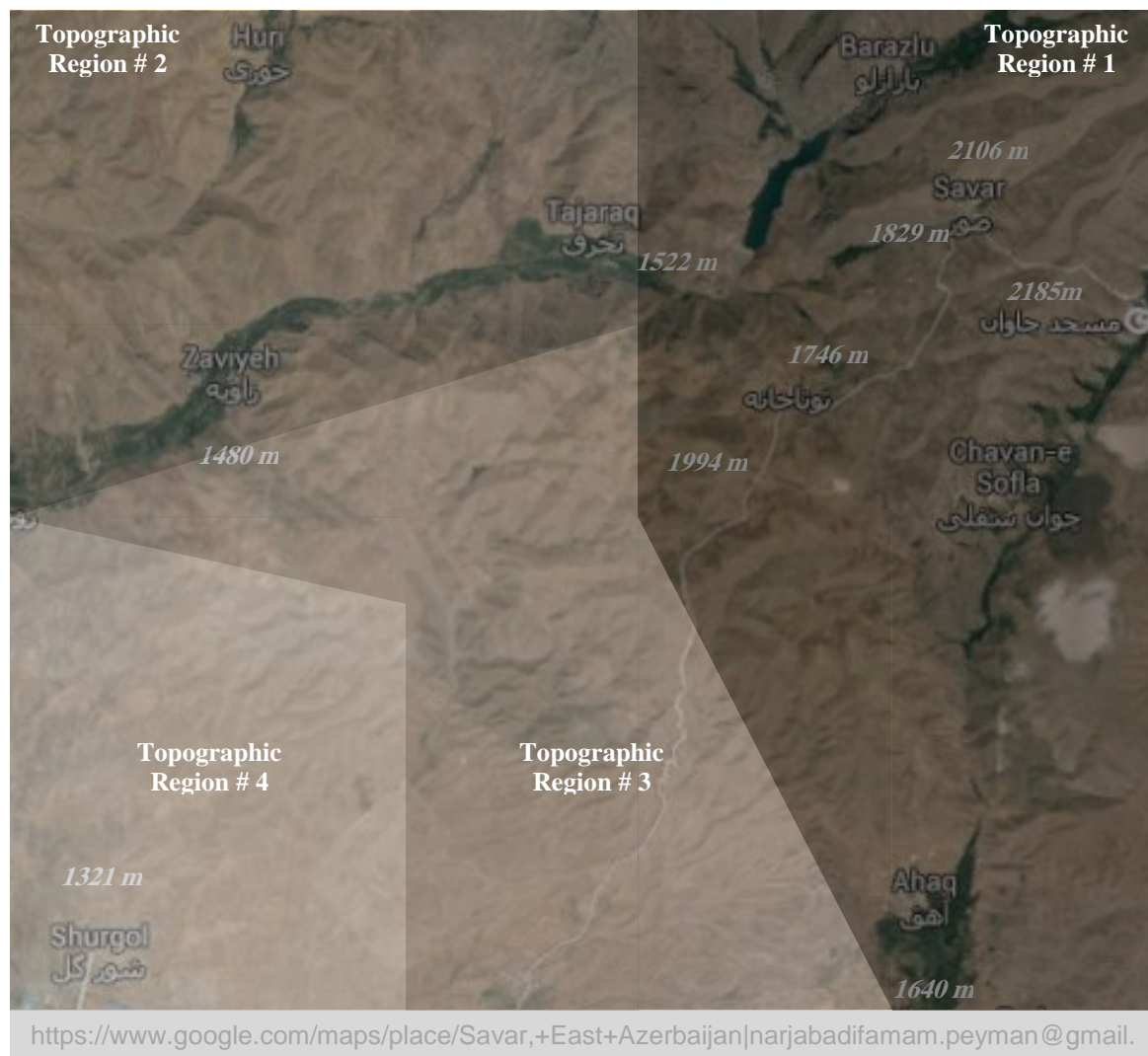
شکل ۳۲- تأثیر توپوگرافی در شتاب حداکثر زمین (Lee و همکاران، ۲۰۰۹)

با توجه به مطالعات ژئوتکنیک گزارش شده در جدول (۶) برای ایستگاه‌های نشان داده شده در شکل (۳۱) می‌توان بر اساس طبقه‌بندی استاندارد ۲۸۰۰ ایران برای کرانه غربی شهر بناب در مجاورت دریاچه ارومیه زمینی از نوع III (متماثل به IV) با ستونی نرم از خاک‌های آبرفتی ریز، برای بخش مرکزی زمینی از نوع III با ستونی نسبتاً نرم از خاک‌های آبرفتی، برای بخشی کوچک در جنوب غربی مرکز زمینی از نوع II با ستون خاکی نسبتاً سخت، برای بخش جنوبی شهر زمینی از نوع III تقریباً مشابه به مرکز شهر و برای قسمت شمال شرقی و شرق زمینی از نوع III (متماثل به II) با ستون خاکی متراکم‌تر در نظر گرفت. به این ترتیب، تشدید حرکات زمین متأثر از نوع خاک نیز با توجه به عمق نه‌چندان کم سنگ‌بستر بر اساس سرعت‌های موج برشی گزارش شده در منطقه (جدول (۶)) عملاً طبق مقادیر آئین‌نامه‌ای قابل پیش‌بینی خواهد بود (Anbazhagan و همکاران، ۲۰۱۳). با فرض تقریب میانگین مشخصات نوع خاک از زیر سازه تا سنگ‌بستر می‌توان این تشدید شتاب را در نواحی دارای خاک نوع II برابر با ۲۰٪، در نواحی دارای خاک نوع III معادل ۱۰۰٪، در نواحی دارای خاک نوع IV در حدود ۲۰۰٪ و در سایر نواحی نیز بر این اساس تقریب زد. بنابراین، کرانه باختری شهر بیش‌ترین و بخشی از جنوب غربی مرکز شهر و همچنین شمال شرقی و شرق منطقه کم‌ترین تشدید شتاب را خواهند داشت.

شرقی، شرق و جنوب شرقی منطقه مورد مطالعه (ناحیه ۱- که از مرز شهرستان مراغه در شرق و بارازلو در شمال تا به نزدیکی روشت بزرگ ادامه دارد) بیشترین، در مرکز شهرستان (ناحیه ۴- که بین مرز صومعه در شمال غربی و زاوشت در نزدیکی شرق مرکز شهر تا علی آباد قشلاق در جنوب و دریاچه ارومیه در غرب قرار دارد) کمترین و در سایر نواحی در حد متوسط نزدیک به زیاد (برای ناحیه ۲- از تجرق، زاویه و صومعه در شمال تا به خوشه مهر در جنوب شرقی) یا متوسط نزدیک به کم (برای ناحیه ۳- از مرز تجرق، زاویه و صومعه در شمال تا به خوشه مهر در جنوب شرقی) می باشد. مقادیر این افزایشها بر اساس تغییرات ارتفاعی موجود در ناحیه ۱ حدود ۱۰۰٪، در ناحیه ۲ حدود ۷۵٪ و در ناحیه ۳ حدود ۲۵٪ قابل تخمین هستند. ناحیه ۴ نیز با توجه به مسطح بودن آن عملاً فارغ از آثار توپوگرافی می باشد.

چنانچه ملاحظه می گردد شتاب حداکثر در بلندیها و پستیها می تواند تا حدود ده برابر متفاوت باشد. طبق نتایج گزارش شده، به طور میانگین، افزایش شتاب در بلندیها تا ۱۰۰٪ و کاهش آن در پستیها تا ۶۰٪ می باشد. این تغییرات در دامنه های دارای پستیها و بلندیهای نزدیک به هم در حدود $\pm 50\%$ است.

بنابر نتایج پژوهش های انجام یافته، با توجه به شکل (۳۱) می توان انتظار داشت شتاب زمین در مناطق حائز اهمیتی مانند روستاهای تاریخی-توریستی "صور" و "توتاخانا" به علت ناهمواری های زیاد دامنه کوه سهند افزایش بیشتری داشته باشد. در مقابل مناطق اصلی شهر و نوار غربی شهرستان در مجاورت دریاچه ارومیه (دانشگاهها و اغلب کارخانهها و مناطق مسکونی) نیز به علت مسطح بودن آن کمترین تأثیر از آثار توپوگرافی را خواهند داشت. چنانچه در شکل (۳۳) نشان داده می شود تشدید شتاب تحت اثر توپوگرافی به طور دقیق تر در نواحی شمال

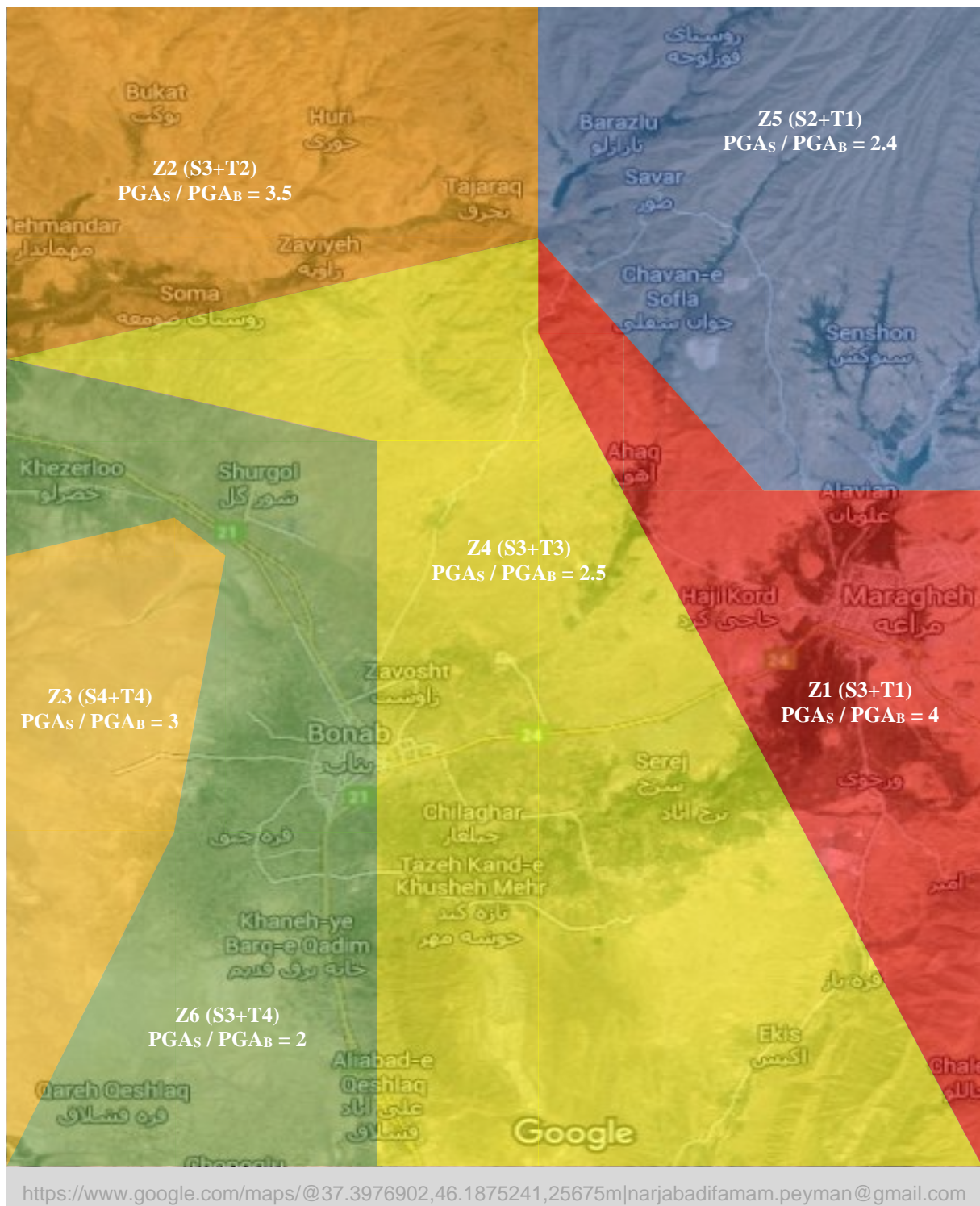


شکل ۳۳- پهنه بندی استعداد تشدید آثار زلزله در نواحی ناهموار منطقه

۵-۳- پیش‌گویی شتاب در سطح زمین

با توجه به بررسی‌های انجام‌شده در خصوص شرایط توپوگرافی و خصوصیات ژئوتکنیک، برای پیش‌گویی شتاب زلزله در سطح زمین به صورت تابعی از شتاب سنگ‌بستر که از تحلیل خطر به دست آمد می‌توان از نرم‌افزارهایی مثل EERA (Bardet و همکاران، ۲۰۰۰)، NERA (Bardet و Tobita، ۲۰۰۱) و Shake

(Ordonez، ۲۰۱۲) برای اثر ستون خاک زیر سازه و SPECFEM3D (UFS، ۲۰۱۵) برای اثر توپوگرافی منطقه و یا حتی ویرایش‌های جدید EZ-FRISK استفاده نمود. در اینجا با توجه به هدف پژوهش (ارزیابی نیاز به ریزپهنه‌بندی) نتایج حاصل در دو زیربخش قبل ترکیب می‌گردند. حاصل در شکل (۳۴) با پیش‌بینی ۶ ریزپهنه لرزه‌ای نشان داده می‌شود.



شکل ۳۴- ریز پهنه‌بندی لرزه‌ای پیش‌بینی شده منطقه بناب بر اساس تحلیل خطر زلزله و اعمال آثار نوع خاک و شرایط توپوگرافی

۶- نتیجه گیری

برای شهرستان بناب از مجاورت دریاچه ارومیه تا دامنه کوه سهند تحلیل خطر زلزله انجام و نیاز به ریزپهنه بندی لرزه ای ارزیابی شد. این پژوهش در مراحل زیر انجام گردید:

الف) بررسی پژوهش های انجام یافته در این زمینه

ب) جمع آوری داده های لرزه ای

ج) بررسی مشخصات فنی داده های لرزه ای

د) برآورد خطر زلزله

و) مطالعه ملاحظات ژئوتکنیک

ه) مطالعه تأثیر توپوگرافی بر ریزپهنه بندی لرزه ای

ی) ارزیابی نیاز به ریزپهنه بندی لرزه ای و پیش گویی آن.

نتایج حاصل از پژوهش نیز عبارت اند از:

الف) تحلیل خطر زلزله برای منطقه بناب با توجه به استقرار میراث فرهنگی و صنایع مختلف ضروری است،

ب) شبیه مربوط به احتمال تغییر شتاب مبنای پیشنهادی ویرایش چهارم استاندارد ۲۸۰۰ ایران (مشروح به شکل (۲)) با تحلیل خطر انجام یافته به روش احتمالی مرتفع می گردد،

ج) با بررسی ملاحظات ژئوتکنیک منطقه نیاز به ریزپهنه بندی مشخص و ۳ ریزپهنه ژئوتکنیک پیش بینی می گردند،

د) بررسی منطقه از نظر آثار توپوگرافی نیز ۴ ریزپهنه از این منظر را مشخص می نماید،

و) با پیش گویی شتاب در سطح زمین به کمک ترکیب آثار تقریبی ژئوتکنیک و توپوگرافی ۶ ریزپهنه قابل پیش بینی است،

ه) ضرایب تبدیل شتاب مبنای سنگ بستر به شتاب سطح زمین در ۶ ریزپهنه تعیین شده عبارت اند از: ۴ برای ریزپهنه ۱، ۳/۵ برای ریزپهنه ۲، ۳ برای ریزپهنه ۳، ۲/۵ برای ریزپهنه ۴، ۲/۴ برای ریزپهنه ۵، ۲ برای ریزپهنه ۶

ی) مقایسه ضرایب تبدیل پیش بینی شده با نتایج نرم افزاری که به عنوان نمونه برای اثر ستون خاک در ریزپهنه ۶ بررسی شده است نشان می دهد ارزیابی انجام یافته و پیش بینی های آن صحیح و دارای دقت قابل قبولی می باشند.

۷- قدردانی

این پژوهش با حمایت های تشویقی فرمانداری شهرستان بناب انجام شده است. از مهندسین مشاور تل تاو تبریز نیز بابت تهیه اطلاعات مربوط به ملاحظات ژئوتکنیک صمیمانه قدردانی می گردد.

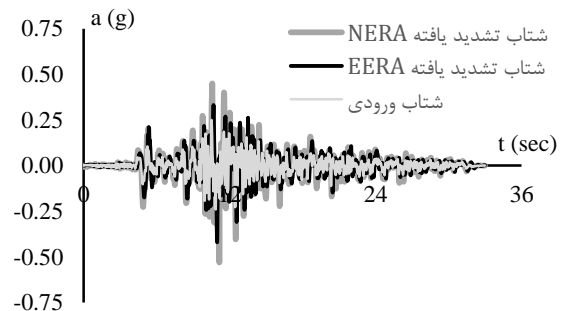
۸- مراجع

امور نظام فنی معاونت برنامه ریزی و نظارت راهبردی رئیس جمهور، "راهنمای کاربردی انجام تحلیل خطر زلزله (نشریه ۶۲۶)"، تهران، ۱۳۹۲.

ضرایب تشدید هر یک از ۶ ریزپهنه نیز بر اساس نسبت شتاب در سطح زمین به شتاب سنگ بستر (PGAs/PGA_B) تخمین زده شده اند. هر یک از ۶ ریزپهنه لرزه ای از همپوشانی نواحی ژئوتکنیک مشروح زیربخش (۱-۵) با نواحی توپوگرافیک مشروح زیربخش (۲-۵) حاصل شده اند. ضرایب هم از حاصل ضرب ضرایب تشدید ژئوتکنیک و توپوگرافیک مربوط (ضریب تشدید برابر با ۱/۲ برای S2 یعنی ناحیه ژئوتکنیک با خاک نوع II طبق تعاریف استاندارد ۲۸۰۰، ضریب ۲ برای S3 یعنی ناحیه ژئوتکنیک با خاک نوع III، ضریب ۳ برای S4 یعنی ناحیه ژئوتکنیک با خاک نوع IV، ضریب ۲ برای T1 یعنی ناحیه توپوگرافیک ۱، ضریب ۱/۷۵ برای T2 یعنی ناحیه توپوگرافیک ۲، ضریب ۱/۲۵ برای T3 یعنی ناحیه توپوگرافیک ۳ و ضریب ۱ برای T4 یعنی ناحیه توپوگرافیک ۴) به دست آمده اند. به عنوان مثال، در ریزپهنه ۶ (Z6) مقدار ۲ برای نسبت PGAs/PGA_B از حاصل ضرب ضریب تشدید ۲ مربوط به S3 و ضریب ۱ مربوط به T4 به دست آمده است. اگرچه طوری که بحث شد محاسبات نرم افزاری آثار محلی می توانند برای بهره برداری عملی و در ادامه ی این ارزیابی صورت گیرند، بررسی انجام یافته به کمک نرم افزارهای EERA و نیز NERA برای اثر ستون خاک در Z6 با سه شتاب نگاشت برگرفته از پایگاه PEER (۲۰۱۷) چنانچه در جدول (۷) دیده می شود ضریب تشدید ۲ تخمین زده شده برای این ریزپهنه را تأیید می نماید. شتاب نگاشت های ورودی و خروجی نرم افزارهای EERA و NERA برای یکی از زلزله ها (زلزله Tabas) در شکل (۳۵) نشان داده شده اند.

جدول ۷- ضرایب تشدید حاصل از EERA و NERA برای سه زلزله Tabas, LomaPrieta و Manjil در ریزپهنه ۶ (Z6)

نام زلزله	سال وقوع	ایستگاه	مؤلفه	ضریب مقیاس ضریب تشدید مبنای ۰/۲۵g	ضریب ضریب تشدید	NERA	EERA
Tabas	1978	Tabas	L1	۰/۳	۱/۹	۲/۸	۱/۹
Manjil	1990	Abbar	L	۰/۵	۱/۶	۱/۷	۱/۶
LomaPrieta	1989	LosGatos	000	۰/۶	۱/۸	۲	۱/۸



شکل ۳۵- تاریخچه زلزله ورودی مقیاس شده Tabas در مقایسه با تاریخچه های تشدید یافته EERA و NERA برای آن در اثر ستون خاک زیر ریزپهنه ۶ (Z6)

- It.aspx, 4 January, 2016.
- Bommer JJ, "Deterministic vs Probabilistic Seismic Hazard Assessment: An Exaggerated and Obstructive Dichotomy", *Journal of Earthquake Engineering*, 2002, 6 (sup001), 43-73.
- Boore D, Atkinson G, "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*, 2008, 24 (1), 99-138.
- Campbell K, Bozorgnia Y, "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*, 2008, 24, 139-171.
- Campbell KW, Thenhaus PC, "Seismic Hazard Analysis", *Earthquake Engineering Handbook*; Ed. Chen W. F., Scawthorn C.: CRC Press, 2003, Chapter 8.
- Crampin S, Yuan G, "The physics Underlying Gutenberg-Richter in the Earth and in the Moon", *Journal of Earth Science*, 2015, 26 (1), 134-139.
- Duval AM, Bard PY, Meneroud JP, Vidal S, "Usefulness of Microtremor Measurements for Site Effect Studies", *The 10th European Conference on Earthquake Engineering*, Vienna, Austria, 28 August-2 September, 1994, Vol. I, pp 521-528.
- EALG (East Azerbaijan Local Government), <http://ostan-as.gov.ir/?pageid=74#>, 6 September, 2015.
- Ghodrati Amiri G, Kazemiashtiani V, Razavian Ameri SA, "Seismic Hazard Analysis and Obtaining Peak Ground Acceleration for Arak Region, Iran", *Asian Journal of Civil Engineering (Building and Housing)*, 2010, 11 (2), 183-206.
- Golden Software, "Surfer", Golden Software LLC, Golden, CO, USA, 2015.
- Gutenberg B, Richter CF, "Seismicity of the Earth and Associated Phenomena", Princeton University Press: Princeton-New York, 1954, pp 1-310.
- Haukaas T, "Sensitivity Analysis of Soil Site Response Modelling in Seismic Microzonation for Lalitpur, Nepal", M.Sc. Thesis, International Institute for Geo-information Science and Earth Observation, Enschede, Netherlands, 2004.
- Hoseinpour M, Zare M, "Seismic Hazard Assessment of Tabriz, a City in the Northwest of Iran", *Journal of the Earth*, 2009, 4 (2), 21-35.
- IIEES (International institute of Earthquake Engineering and Seismology), "Search Earthquake Catalog", <http://www.iiees.ac.ir/en/eqcatalog/>, 4 January, 2016.
- IRSC (Iranian Seismological Center at Institute of Geophysics), University of Tehran, "Bulletin Search", <http://irsc.ut.ac.ir/bulletin.php>, 4 January, 2016.
- Jeong S, "Topographic Amplification of Seismic Motion Including Nonlinear Response", PhD Thesis, Georgia Institute of technology, USA, 2013.
- Karimiparidari S, Zare M, Memarian H, Kijko A, "Iranian Earthquakes, A Uniform Catalog with Moment Magnitudes", *Journal of Seismology*, 2013, 17 (3), 897-911.
- Karimiparidari S, Zare M, Memarian H, "New Seismotectonic Zoning Map of Iran", *The 6th International Conference on Seismology and Earthquake Engineering (SEE6)*, Tehran, Iran, 16-17 January, 2016.
- حسامی خ، جمالی ف، طبسی ه، "نقشه گسل‌های فعال ایران"، پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله، تهران، ایران، ۱۳۸۲.
- دهقان منشادی س ه، میرزائی ن، اسکندری قادی م، "بررسی لرزه‌زمین ساخت و لرزه‌خیزی منطقه اصفهان"، *مجله فیزیک زمین و فضا*، ۱۳۹۱، ۳۸ (۴)، ۱-۲۲.
- قلندرزاده ع، معتمد ر، عبدالهی ج، "بررسی خطر لرزه در شهر ارومیه، ایران"، *چهارمین کنفرانس بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله، تهران، ایران، ۲۲-۲۴ اردیبهشت، ۱۳۸۲*.
- کمیته دائمی بازنگری آئین‌نامه طراحی ساختمان‌ها در برابر زلزله مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی، "آئین‌نامه طراحی ساختمان‌ها در برابر زلزله- استاندارد ۲۸۰۰ (ویرایش ۴)"، تهران، ۱۳۹۳.
- Abrahamson N, Silva W, "Summary of the Abrahamson & Silva NGA Ground Motion Relations", *Earthquake Spectra*, 2008, 24 (1), 67-97.
- Albini P, Musson-RM W, Gomez Capera AA, Locati M, Rovida A, Stucchi M, Vigano D, "Global Historical Earthquake Archive and Catalogue (1000-1903)", *GEM Technical Report 2013-01V1.0.0*, 202 p.; *Global Earthquake Model*, Pavia, Italy, 2013.
- Ambrasays NN, Melville CP, "A History of Persian Earthquakes", Cambridge University Press, Cambridge, UK, 1982.
- Anbazhagan P, Neaz Sheikh M, Parihar A, "Influence of Rock Depth on Seismic Site Classification for Shallow Bedrock Regions", *Natural Hazards Review*, 2013, 14 (2), 108-121.
- Andisheh K, "Seismic hazard Assessment of Sanandaj City of Iran Based on PSHA", *The 4th International Conference on Geotechnical Earthquake Engineering*, Thessaloniki, Greece, 25-28 June, 2007, Paper No. 1575.
- Anggraeni D, "Modelling the Impact of Topography on Seismic Amplification at Regional Scale", M.Sc. Thesis, International Institute for Geo-information Science and Earth Observation, Enschede, Netherlands, 2010.
- Bardet JP, Ichii K, Lin CH, "EERA: A Computer program for Equivalent-linear Earthquake site Response Analysis of Layred soil deposits, Department of Civil Engineering", University of Southern California, Los Angeles, CA, 2000.
- Bardet JP, Tobita T, "NERA: A Computer program for Nonlinear Earthquake site Response Analyses of Layred soil deposits", University of Southern California, Los Angeles, CA, 2001.
- Bath M, "Introduction to seismology", 2nd Edition Springer-Birkhauser, Basel, 1979, pp 428.
- Bellis M, "History of the Innovations Surrounding Earthquake-Who Invented the Seismograph?", <http://inventors.about.com/od/sstartinventions/a/seismograph.htm>, 27 August, 2015.
- Berberian M, "Natural Hazards and the First Earthquake Catalogue of Iran", A UNESCO/IIEES Publication, Tehran, Iran, 1995.
- BHRC (Road, House, and Urban Development Research Center), "Strong Motion Network", <http://www.bhrc.ac.ir/enismn/tabid/1097/Default.aspx>

- 1 July, 1982, 1, 119-130.
- Solaymani Azad S, "Seismic Hazard Assessment for Tehran, Tabriz and Zanjan Cities Based on Morphotectonics and Paleoseismology", PhD Thesis, University of Montpellier II, France, 2010.
- Storchak DA, Di Giacomo D, Bondar I, Harris J, Engdahl ER, Lee WHK, Villasenor A, Bormann P, Ferrari G, "ISC-GEM Global Instrumental Earthquake Catalogue (1900-2009)", GEM Technical Report 2012- 01 V1.0.0, 128 p.; Global Earthquake Model (GEM), Pavia, Italy, 2012.
- Tajmir Riahi Z, Ajalloeian R, "Earthquake Hazard Zonation of the Isfahan City, Iran", Electronic Journal of Geotechnical Engineering, 2014, 19, 7141-7163.
- Tavakkoli B, Ghafori-Ashtiany M, "Seismic Hazard Analysis of Iran", Annali Di Geofisica, 1999, 42 (6), 1013-1021.
- TC4 (The Technical Committee for Earthquake Geotechnical Engineering) of the International Society for Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, "Manual for Zonation of Seismic Geotechnical Hazards", The Japanese Geotechnical Society, 1999.
- Uhrhammer RA, "Characteristics of Northern and Central California Seismicity", Earthquake Notes, 1986, 57, 1-21.
- UFS (Princeton University-USA, CNRS/University of Marseille-France, ETH Zürich-Switzerland), "SPECFEM3D", Computational Infrastructure for Geodynamics, Davis, CA, 2015.
- UP-Seis (An Educational Site for Budding Seismologists), "Earthquake Magnitude Scale", <http://www.geo.mtu.edu/UPSeis/magnitude.html>, 7 January, 2016.
- USGS (The United States Geological Survey), "Search Earthquake Catalog", <http://earthquake.usgs.gov/earthquakes/search>, 4 January, 2016.
- Wang Z, "Predicting or Forecasting Earthquakes and the Resulting Ground-Motion Hazards: A Dilemma for Earth Scientists", Seismological Research Letters, 2015, 86 (1), 1-5.
- Wells DL, Coppersmith KJ, "New Empirical Relationships among Magnitude, Rupture Length, Rupture Width, Rupture Area, and Surface Displacement", Bulletin of the Seismological Society of America, 1994, 84 (4), 974-1002.
- Wessel P, Smith WHF, "GMT-Generic Mapping Tools-Series 5", University of Hawaii at Manoa, HI, USA, 2013.
- Wyemer S, Wyss M, "Minimum Magnitude of Completeness in Earthquake Catalogs: Examples from Alaska, the Western United States, and Japan", Bulletin of the Seismological Society of America, 2000, 90 (4), 859-869.
- Wyss M, Wiemer S, Zuniga R, "Zmap-A Tool for Analyses of Seismicity Patterns Version 6.0", ETH Zurich, Zurich, Switzerland, 2001.
- Zare M, "Development of Seismic Hazard Zoning Map for Iran, Based on New Seismic Source Determination", The 15th World Conference on Earthquake Engineering (15WCEE), Lisbon, Portugal, 2012.
- 18 May, 2011, 7 p., Paper No. 11346.
- Kasahara K, "Earthquake mechanics", Cambridge University Press, Cambridge, 1985, pp 248.
- Kijko A, "HN2 program (Version 2.08): Seismic Hazard assessment from incomplete and uncertain data", Council for Geo science (Geological Survey of South Africa), Pretoria, South Africa, 2001.
- Kijko A, Sellevoll MA, "Estimation of Earthquake Hazard Parameters from Incomplete Data Files. Part I. Utilization of Extreme and Complete Catalogs with Different Threshold Magnitudes", Bulletin of the Seismological Society of America, 1989, 79 (3), 645-654.
- Kijko A, Sellevoll MA, "Estimation of Earthquake Hazard Parameters from Incomplete Data Files. Part II. Incorporation of Magnitude Heterogeneity", Bulletin of the Seismological Society of America, 1992, 82 (1), 120-134.
- Kramer SL, "Geotechnical Earthquake Engineering", Prentice Hall, New Jersey, 1996.
- Lee SJ, Chan YC, Komatitsch D, Huang BS, Tromp J, "Effects of Realistic Surface Topography on Seismic Ground Motion in the Yangminshan Region of Taiwan Based Upon the Spectral-Element Method and LiDAR DTM", Bulletin of the Seismological Society of America, 2009, 99 (2A), 681-693.
- Mirzaei N, Gao M, Chen YT, "Evaluation of Uncertainty of Earthquake Parameters for Seismic Zoning of Iran", Earthquake Research in China, 1997, 11, 197-212.
- Mohajer-Ashjai A, Nowroozi AA, "Observed and Probable Intensity Zoning of Iran", Tectonophysics, 1978, 49 (3-4), 149-160.
- Naeni SA, Zarincheh S, 'Site Effect Microzonation and Seismic Hazard Analysis of Kermanshah Region in Iran", Journal of Applied Sciences, 2010, 10 (19), 2231-2240.
- Ordonez GA, "SHAKE2000-A Computer Program for 1-D Analysis of Geotechnical Earthquake Engineering Problems", GeoMotions LLC., Lacey, Washington, USA, 2012.
- PCRIC (Permanent Committee for Revising the Iranian Code of Practice for Seismic Design of Buildings at Road, Housing and Urban Development Research Center), "Iranian Code of Practice for Seismic Design of Buildings-Standard No. 2800 (3rd Edition)", Tehran, 2007.
- PEER (The Pacific Earthquake Engineering Research Center), "PEER Ground Motion Database Beta (Software/Apps)", <http://ngawest2.berkeley.edu/spectras/14924/searches/13674/edit>, 8 February, 2017.
- Pitilakis K, Raptakis D, Makra K, Ktenidou OJ, Pandi K, Manakou M, Pitilakis D, Diagourtas D, "Effects of Surface and Subsurface Topography on Strong Ground Motion at the City of Aegion-Greece", The 13th World Conference on Earthquake Engineering, Vancouver, B.C., Canada, 1-6 August, 2004, paper No. 2821.
- Risk Engineering Inc., "EZ-FRISK 7.52", Fugro's Risk Engineering Group., Lakewood, CO, 2011.
- Slemmons DB, "Determination of Design Earthquake Magnitude for Microzonation", The 3rd International Earthquake Microzonation Conference, Seattle Washington D.C., U.S., 28 June

EXTENDED ABSTRACT

Evaluation of the Need for Seismic Microzonation in Bonab County based on Regional Considerations and Probabilistic Earthquake Hazard Analysis from the Vicinity of Urmia Lake toward the Hillsides of Sahand Mountain

Peyman Narjabadifam ^{a,*}, Iraj Chaei-Asl-Tabrizi ^b, Mina Bagheri-Mollahajlu ^c

^a Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, University of Bonab, 5551761167 Bonab, Iran

^b Building and Housing Department, BHRC, 1463917151, Tehran, Iran

^c Postgraduate School of Environmental Engineering, University of Tehran, 14155-6135, Tehran, Iran

Received: 12 July 2017; Accepted: 23 January 2019

Keywords:

Seismic microzonation, Earthquake hazard analysis, Probabilistic method, Zmap, Kijko, EZ-FRISK.

1. Introduction

Earthquake can be considered as the most important environmental excitation because of its massive destructivity within a short period of time. Prediction of earthquakes is still a dilemma (Wang, 2015). The questions are also available about the effectiveness of prediction, if possible. It is clear that the society will not be safe with only the prediction of earthquakes. Earthquake protection of structures is required as the main solution. The quality of this protection depends mainly on the quality of the estimation of possible earthquakes. In this regard, earthquake hazard analysis should be followed by seismic microzonation in order to account for the site effects. Evaluation of the need for such a detailed study is carried out for Bonab County, which is the second industrial city in the province of East Azerbaijan after the capital city (Tabriz), being also important because of its cultural heritage. The other motivation for this study comes from the change in the seismicity of the neighboring region referred to the 4th edition of the Iranian code of practice for seismic resistant design of buildings (Standard No. 2800) when compared with the 3rd edition of this standard (PCIRC, 2007).

2. Methodology

The research is carried out in two stages: (1) probabilistic seismic hazard analysis, and (2) seismic microzonation based on site effects.

For the purpose of probabilistic seismic hazard analysis, a uniform catalog is first prepared for the earthquakes occurred in a region located between 44.4°-47.7° E and 35.7°-39° N, when the center of the city of Bonab itself is located at 46.0561° E and 37.3403° N. The fault map of the region is studied and the seismogenic depth is determined. Seismic sources are detected and the maximum magnitudes likely to occur are calculated. Seismic parameters are determined using Zmap (Wyss et al., 2001) and attenuation relations are applied. The hazard analysis is performed using EZ-FRISK (Risk Engineering Inc., 2011) and peak ground accelerations are calculated in the region.

As far as the microzonation is considered, geotechnical data are first collected from the previous projects in the region. The topography of the region is then studied. The effects of topography (Jeong, 2013) and

* Corresponding Author

E-mail addresses: narjabadi@tabrizu.ac.ir (Peyman Narjabadifam), tabrizi.iraj@gmail.com (Iraj Chaei Asl Tabrizi), m.bagheri.hajlu@ut.ac.ir (Mina Bagheri-Mollahajlu).

geotechnical measures (TC4, 1999) are estimated independently. These effects are finally combined together to obtain an evaluation for microzonation.

3. Results and discussion

Based on the probabilistic seismic hazard analysis performed, peak ground accelerations are almost constant in the region. The average acceleration for the return period of 475 years is obtained as 0.21g. This estimation seems to be in accordance with the value suggested by the 4th edition of the standard No. 2800, when the code-based considerations are applied.

As the outcome of the evaluation of the need for seismic microzonation, six microzones are predicted in the region based on the application of the site effects in terms of both topographic and geotechnical measures. The minimum amplification occurs in the area near to the vicinity of Urmia Lake with the amplification ratio (defined as the ratio between peak ground acceleration in the ground surface to that on bedrock) equal to 2. The maximum amplification is obtained for the eastern part of the region in the vicinity of Maragheh with the ratio equal to 4. The amplification ratios for the other four microzones fall between 2 and 4. For example, peak ground acceleration in the surface layers of Savar (the famous touristic village near to the Bonab city) is estimated to be amplified by a value around 2.4 that should be applied on the bedrock acceleration.

4. Conclusions

The need for seismic microzonation in Bonab County was evaluated based on regional considerations in terms of topographic and geotechnical measures as the site effects. These effects were applied after the probabilistic earthquake hazard analysis carried out for the region.

The earthquake hazard analysis indicated that in spite of the changes in the design base accelerations of the vicinities of the Bonab city referred to the 4th edition of the Standard No. 2800 compared with the 3rd edition of that, the intermediate seismicity is reliably acceptable for Bonab.

The site effects applied after the probabilistic seismic hazard analysis emphasized the need for seismic microzonation with 6 microzones predicted based on the amplifications caused by topography and geotechnical measures. The microzonation can be summarized as in below:

- Microzone 1: The border area of Bonab and Maragheh with the amplification factor of around 4 estimated as the ratio between peak ground acceleration in the ground surface to that on bedrock.
- Microzone 2: The north-western vicinity of Bonab near to the neighboring city Ajabshir with an amplification factor equal to 3.5.
- Microzone 3: The vicinities of Urmia Lake with the amplification factor of around 3.
- Microzone 4: The eastern-central and north-western parts of the Bonab County with an amplification factor of around 2.5.
- Microzone 5: The north-eastern corner of the county with the amplification factor of around 2.4 for the famous touristic villages like Savar located in this area.
- Microzone 6: The city of Bonab and its surrounding area from Qareh Qeshlaq in the South near to Malekan up to Shurgol in the north near to Ajabshir with the amplification factor estimated as 2.

5. References

- Jeong S, "Topographic Amplification of Seismic Motion Including Nonlinear Response", PhD Thesis, Georgia Institute of technology, USA, 2013.
- PCRIC (Permanent Committee for Revising the Iranian Code of Practice for Seismic Design of Buildings at Road, Housing and Urban Development Research Center), "Iranian Code of Practice for Seismic Design of Buildings-Standard No. 2800 (3rd Edition)", Tehran, 2007.
- Risk Engineering Inc., "EZ-FRISK 7.52", Fugro's Risk Engineering Group., Lakewood, CO, 2011.
- TC4 (The Technical Committee for Earthquake Geotechnical Engineering) of the International Society for Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, "Manual for Zonation of Seismic Geotechnical Hazards", The Japanese Geotechnical Society, 1999.
- Wang Z, "Predicting or Forecasting Earthquakes and the Resulting Ground-Motion Hazards: A Dilemma for Earth Scientists", *Seismological Research Letters*, 2015, 86 (1), 1-5.
- Wyss M, Wiemer S, Zuniga R, "Zmap-A Tool for Analyses of Seismicity Patterns Version 6.0", ETH Zurich, Zurich, Switzerland, 2001.