

تحلیل خطر لرزه ای با مدل گوتنبرگ-ریشر و پواسون، رسم نقشه b-value و محاسبه مقادیر DBE&MCE، در استان خراسان رضوی

*موسی الرضا سعیدنژاد، سوفیا کشاورزی پورتنقی

*کارشناسی ارشد ژئوفیزیک، دانشگاه تهران، ایران Saeidnejad.m@gmail.com
کارشناسی ارشد ژئوفیزیک، دانشگاه تهران، ایران Sophia.keshavarz@gmail.com

چکیده:

برای انجام این مقاله پژوهشی ابتدا به مطالعه و آنالیز تکنونیک و زمین شناسی استان خراسان رضوی به عنوان مقدمات امر پرداخته ایم که منتج به رسم نقشه لرزه زمین ساخت استان شده است. سپس تحلیل خطر لرزه ای استان و محاسبه مقادیر و معیارهای مربوطه را با دو روش گوتنبرگ-ریشر و پواسون انجام داده ایم. پدیده زلزله، هم از نظر بزرگا و هم از نظر زمان وقوع آن یک فرآیند تصادفی است. بنابراین به منظور تجزیه و تحلیل بانک داده ای و پیش بینی وضعیت آینده استان از نظر زلزله خیزی، لازم است پس از دسته بندی و مرتب نمودن داده ها، تابع توزیع مناسب برای محاسبه بزرگای زلزله و همچنین برای تخمین زمان وقوع آن و یا تابع توزیعی که هم شامل محاسبه بزرگا و هم زمان وقوع زلزله باشد، انتخاب شود. در این زمینه دو مدل گوتنبرگ-ریشر و پواسون از مشهورترین و پرکاربردترین مدل ها هستند که در این مقاله نیز به عنوان مبنا به کار رفته اند. داده های زلزله ای استان در بازه ۱۱۲ ساله (۱۹۰۳-۲۰۱۵) از پایگاه های معتبر داخلی و خارجی جمع آوری گردیده اند که شامل بزرگی، طول و عرض جغرافیایی و مرکزی، زمان وقوع و عمق زلزله ها هستند. پس از ادغام زلزله ها، حذف زلزله های تکراری و پس لرزه ها و همچنین هم مقیاس کردن این بانک داده ای، در این مقاله مورد استفاده قرار گرفته اند. نتایج حاصل به صورت نمودارهای درصد احتمال وقوع و دوره بازگشت زلزله های مختلف، در متن مقاله نشان داده شده است. برای رسم نقشه های b-value، ابتدا استان را با نقشه های ۱:۲۵۰۰۰۰ سازمان زمین شناسی کشوری پوشش داده و چشمه های لرزه زا در هر چهار گوش مشخص شده اند. این چشمه ها را می توان با تطابق رومرکز زلزله های استان بر روی نقشه گسل-های منطقه مشخص کرد. در مرحله بعد، با توجه به پراکنندگی زلزله ها در چهار گوش های ذکر شده، میزان پارامترهای لرزه ای (a-value & b-value) را در هر چهار گوش از طریق رابطه گوتنبرگ-ریشر تعیین می کنیم. سپس نقشه توزیع b-value در استان را بر اساس میانگین مقدار آن در چهار گوش های زمین شناسی مرتبط رسم می کنیم. در ادامه، همان طور که می دانیم به منظور تأمین پایداری سازه ها در مقابل زمین لرزه های احتمالی، معمولاً دو مقدار بزرگا، زمین لرزه مبنای طرح (DBE) و حداکثر زمین لرزه قابل انتظار (MCE)، ملاک محاسبات قرار می گیرند که محاسبه این مقادیر با توجه به روابط مربوطه انجام شده است. لازم به ذکر است که با توجه به زلزله خیزی بودن استان و قرارگیری آن به عنوان اولین مقصد زیارتی و سیاحتی کشور، این پژوهش با هدف ایجاد نگاهی جامع و کامل از وضعیت لرزه خیزی و تکنونیک استان انجام شده تا منبعی مناسب برای استفاده متخصصان و محققان بحث زلزله و مدیران بحران استان در امر پیشگیری و کاهش بلایا و مخاطرات زمین لرزه قرار گیرد.

کلیدواژه ها: خراسان رضوی، b-value، گوتنبرگ-ریشر، پواسون، زلزله مبنای طرح، حداکثر زمین لرزه قابل انتظار

مقدمه :

استان پهناور خراسان در خاور و شمال خاوری ایران، به عنوان بزرگترین استان کشور، منطقه‌ای متنوع و پراهمیت در مباحث زمین‌شناسی، زمین‌ساخت، لرزه‌خیزی و صنایع - معادن محسوب می‌شد که تفکیک آن به سه استان شمالی - جنوبی و رضوی سبب شد تا کارشناسان و محققین با تمرکز بیشتر بتوانند روی بخش‌های مختلف آن مطالعه کرده و اهمیت استان خراسان رضوی را به عنوان اولین قطب گردشگری کشور، بیش از پیش بر همگان و مسئولین آشکار سازند.

فلات ایران از نظر زمین‌ساختی یکی از فعال‌ترین مناطق جهان است و به عنوان بخشی از کمربند کوهزایی آلپ - هیمالیا همواره لرزه‌خیزی بالایی در طول تاریخ داشته است؛ به گونه‌ای که بخش‌های مختلف کشور از جمله مرکز و شرق ایران توسط زلزله‌های ویرانگر متعددی پیوسته تخریب شده است و این پدیده طبیعی، به عنوان مهمترین بلایای طبیعی کشور، تلفات و خسارات سنگینی را به بار آورده است (جکسون و همکاران، ۱۹۹۵؛ جکسون و همکاران، ۲۰۰۲؛ هالینگ ورت و همکاران، ۲۰۰۸، ۲۰۰۶).

عامل فراوانی زمین‌لرزه‌ها در ایران، بازشدگی دریای سرخ (۱/۵ تا ۲ سانتی‌متر در سال) و حرکت صفحه آفریقا - عربستان در راستای شمال و یا شمال-شمال خاوری و همچنین حرکت صفحه هند در راستای شمال یا شمال-باختری است (آقنابتی، ۱۳۸۳). مطالعات GPS انجام شده نیز نشان دهنده کوتاه‌شدگی فلات ایران بین دو فلات عربستان و اوراسیا (۲۰ میلی‌متر در سال) است (ورننت و همکاران، ۲۰۰۴؛ ماسون و همکاران، ۲۰۰۷).

زلزله مهم‌ترین خطر طبیعی در ایران است. بنابراین، ضروری است در احداث (سد‌ها، نیروگاه‌ها و ...) و ساختمان‌ها خطر زلزله برآورد شود. اولین گام در تحلیل خطر زلزله، تعیین گسل‌های فعال (چشمه‌های لرزه‌ای) و

اندازه‌گیری میزان فعالیت آنهاست (فتاحی و همکاران، ۲۰۰۷).

بطور کلی شرق ایران از شمال به جنوب طبق تقسیم بندی میرزائی و همکاران (۱۹۹۸) به ترتیب در سه بلوک لرزه زمین‌ساختی کپه داغ، ایران مرکزی و شرق ایران و مکران قرار می‌گیرد که استان خراسان رضوی به جز قسمت‌هایی از شمال آن (جزء ایالت کپه داغ است). غالباً در ایالت لرزه زمین‌ساختی ایران مرکزی و شرق ایران واقع می‌شود. این ایالت، پهنه‌ای درون صفحه‌ای است که از شمال به مناطق برخوردی البرز - آذربایجان و کپه داغ، از غرب و جنوب غرب به منطقه برخورد قاره‌ای زاگرس، از جنوب شرق به منطقه فرورانش اقیانوسی - قاره‌ای مکران و از شرق به بلوک هیلمند محدود است. بخش شرقی ایران مرکزی و شرق ایران لرزه‌خیزی بسیار شدیدتری را نشان می‌دهد. نتایج مدل‌سازی شکل امواج و مطالعات خردزمین‌لرزه‌ها نشان می‌دهد که بیشتر زمین‌لرزه‌ها در ایران مرکزی و شرق ایران از عمق ۸ تا ۲۰ کیلومتر نشأت می‌گیرند (بربریان، ۱۹۸۱).

برخلاف ایالت‌های لرزه زمین‌ساختی زاگرس و البرز - آذربایجان، لرزه‌خیزی در ایران مرکزی و شرق ایران بطور عمده به زون‌های گسلی لرزه‌زا که خردقاره‌های نسبتاً پایدار را احاطه کرده‌اند، محدود می‌باشد (اشتوکلین، ۱۹۷۴).

استان خراسان رضوی که منطقه مورد بحث ما است، منطقه‌ای نسبتاً پست از لحاظ توپوگرافی بوده که تنها ارتفاعات آن قسمتی از رشته کوه بینالود در شمال آن است. این استان از لحاظ لرزه‌خیزی منطقه‌ای نسبتاً پایدار بوده که در مناطق جنوبی آن زلزله‌های مخربی تجربه شده - است (شکل ۱). نکته حائز اهمیت در این استان خراسان رضوی، وجود طولانی‌ترین گسل کشور (گسل درونه) در آن است، که تقریباً تمامی عرض استان را پوشش می‌دهد. گسل درونه به عنوان بلندترین گسل ایران مرکزی نیز منطقه را به دو قسمت تقسیم کرده است (سعیدنژاد، ۱۳۹۱).

چشمه های لرزه‌زا استان خراسان رضوی:

تعریف از چشمه های لرزه‌زا همان گسل های فعال در عصر حاضر هستند. از مهم ترین این گسل‌ها، می‌توان به موارد زیر اشاره داشت:

گسل کشف‌رودبا مکانیزم فشاری با راستای خم‌دار در شمال‌باختری - جنوب‌خاوری به طول ۱۲۰ کیلومتر با شیب به سمت شمال‌خاوری که به موازات کپه داغ در کنار شمالی دشت مشهد، رسوبات آبرفتی کواترنری را می‌برد. زمین-لرزه‌های ۱۶۷۳/۷/۳ میلادی با بزرگی در مقیاس امواج-سطحی ۶/۶ ریشتر و شدت $I_0 = VIII$ و نیز آوریل ۱۶۸۷ مشهد به این گسل نسبت داده شده‌اند (بربریان، ۱۹۸۱).

گسل نیشابوربا مکانیزم فشاری دارای راستای شمال-باختری - جنوب‌خاوری که از ۳ کیلومتری شمال‌غرب نیشابور می‌گذرد. این گسل به طول ۵۲ کیلومتر دارای شیب به سمت شمال‌خاوری است. زمین لرزه‌های ۱۲۰۹ میلادی با بزرگی در مقیاس امواج سطحی ۷/۶ ریشتر، ۲۳ نوامبر ۱۴۰۵ میلادی ۷/۶ ریشتر، ۱۷ اکتبر ۱۲۷۰ میلادی ۷/۱ ریشتر و فوریه ۱۳۸۹ میلادی ۷/۶ ریشتر به این گسل نسبت داده شده‌اند (بربریان، و قریشی، ۱۹۸۱).

گسل درونه با طول ۹۰۰ - ۶۰۰ کیلومتر، طویل ترین گسل ایران است. طول این گسل را ۷۰۰ کیلومتر از مرز ایران و افغانستان تا نائین، این گسل را دارای ساختار قوسی با طول ۶۵۰ کیلومتر، همچنین استرایی و همکاران (۱۳۸۴)، طول این گسل را ۸۰۰ کیلومتر ذکر کرده‌اند. اینگسل رشته کوه‌های شمال خراسان در قائنات و بلوگ لوت را از دره فروافتاده درونه-کاشمر-رشتخوار جدا می‌کند.

این گسل از شهرهای تربت حیدریه-کاشمر-خلیل آباد-بردسکن-خواف و رشتخوار عبور می‌کند. این گسل بصورت ساعتگرد به دور محور قائم خود چرخیده است که این نتیجه ای از تمرکز حرکات برشی در راستای بخش خاوری ناحیه لوت است (واکر و جکسون، ۲۰۰۶).

این گسل با روند شمال‌شرقی - جنوب‌غربی در اثر رخداد زمین‌ساختی کالدونین که غالباً از آن به عنوان راست‌لغز چپ‌بر عنوان شده‌است، بوجود آمده‌است. با توجه به نقشه لرزه زمین‌ساخت منطقه، مشاهده می‌شود که تمرکز زمین لرزه‌های دستگاهی در منطقه دشت بیاض به طور خاص روی قسمت شرقی گسل دشت بیاض قرار دارد. مشخصات این گسل در سه بخش آن مطابق جدول ۱ است:

جدول ۱: مشخصات بخش های مختلف گسل درونه

بخش	تعداد ریزگسل‌ها	فراوانی گسل‌ها (مکانیزم)	شیب گسل‌ها
خاوری	۱۱۲	راست لغز چپ بر	NE - SW
میانی	۴۵	راست لغز	ENE - WSW
باختری	۴۶	راست لغز چپ بر	NE - SW

گسل فردوسدگرشکلی حاصل از یک زون بالاآمدگی و چین‌خوردگی در اواخر تشریری و کواترنری است که زلزله‌های ۱ سپتامبر ۱۹۶۸ و ۴ سپتامبر ۱۹۶۸ به آن نسبت داده می‌شود. گسیختگی سطحی ناشی از زمین‌لرزه ۳۱ اوت ۱۹۶۸ که به گسل دشت بیاض منتسب است، با سازوکار

گسل دشت بیاض با راستای شرقی-غربی، با مکانیزم امتدادلغز و چپ‌گرد است. تقریباً روی مدار ۳۴ درجه و بین نصب النهارهای ۵۸ - ۶۰ درجه قرار دارد. همچنین دارای دوگسلش سطحی به طول‌های ۸۰ و ۶۰ کیلومتر است که هر یک به ترتیب ۳۱ آگوست ۱۹۶۸ طی زلزله با بزرگی در مقیاس امواج سطحی ۷/۳ ریشتر و ۲۷ نوامبر ۱۹۷۹ طی زلزله با بزرگی در مقیاس امواج سطحی ۷/۱ ریشتر در منطقه کولی و بنیاباد ایجاد شده‌اند (آمبراسیز و چالکنو، حقی پور و عمیدی، ۱۹۸۰).

امتداد لغز چپ گرد، موجب فعال کردن چین خوردگی های منطبق بر گسل معکوس فردوس شده است (واکر و همکاران، ۲۰۰۴، ۲۰۰۵).

تاریخچه لرزه خیزی استان:

در سال ۱۲۳۸ میلادی زلزله ای با بزرگی ۵/۳ ریشتر در مقیاس امواج سطحی به مرکز ۱۰ کیلومتر در جنوب گناباد و همچنین در همان گسل و محل، سال ۱۶۷۸، زلزله ای با بزرگی ۶/۵ ریشتر در مقیاس امواج سطحی شهر گناباد را به کل ویران کرد (آمبراسیز و ملویل، ۱۹۸۲).

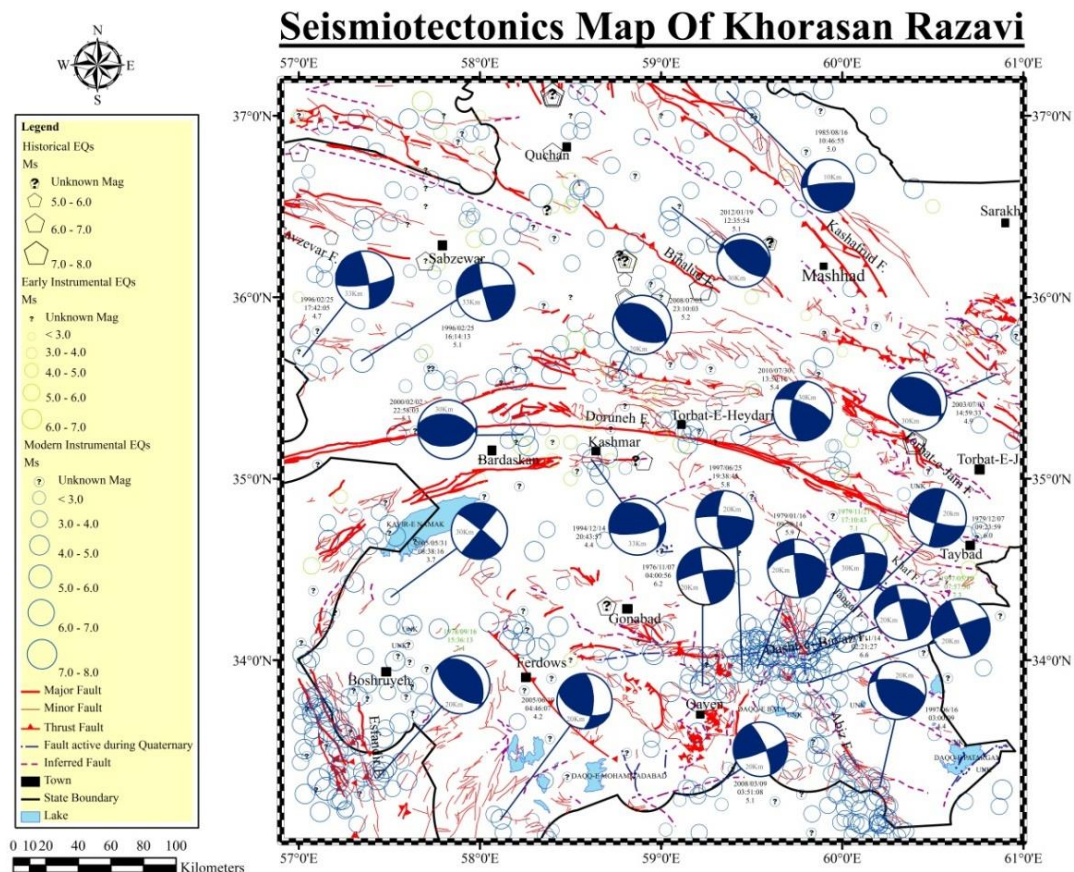
در ۱۵ فوریه ۱۵۴۹ میلادی، در شب ۱۷ محرم ۹۵۶ زمین لرزه بزرگی در منطقه قائن روی داد. زمین لرزه پنج روستا را، احتمالاً در منطقه زیرکوه، کاملاً ویران کرد و ۳۰۰۰ تن جان باختند. خود قائن، که گمان می رود از منطقه رومرکزی زمین لرزه قدری فاصله داشته است، به نظر نمی رسد که از این زمین لرزه آسیب سختی دیده باشد. این رویداد را یک اختراگی محلی، که خود نیز در جریان آن کشته شد، پیشگویی کرده بود (آمبراسیز و ملویل، ۱۹۸۲).

در سال ۱۶۷۸ میلادی زمین لرزه ویرانگری در خراسان روستاهای بسیاری را ویران کرد. شهر گناباد به طور کامل ویران شد و تلفات بسیار زیاد بود. تنها مسجد جامع قدیمی پس از لرزه برپا ماند و تنها یک تن جان بدر برد. بازماندگان روستاهای حومه شهر بار دیگر شهر را سامان دادند (آمبراسیز و ملویل، ۱۹۸۲).

در ۳۱ اوت ۱۹۶۸، زلزله ای با بزرگی ۷/۴ ریشتر در مقیاس امواج سطحی در منطقه دشت بیاض رخ داد که با مرگ حدود ۱۰۰۰۰ نفر از روستاهای دشت بیاض - خضری - میم - بیک - آباد - بیناوج و چرمه همراه بود، حدود ۸۰ کیلومتر گسلش سطحی با مکانیزم جنبش کلی چپ گرد و جابجایی افقی ۴/۵ متر و قائم ۲/۱ متر که پهلوی شمالی گسل را بالا آورد، رخ داد (افتخارنژاد و همکاران، ۱۳۴۷).

در ۱ آوریل ۱۹۶۸، (۲۱ ساعت بعد از زلزله دشت بیاض) زلزله ای با بزرگی در مقیاس امواج سطحی ۶/۴ شهر فردوس را به کل ویران کرد. که نتیجه وابستگی تکتونیکی این دو گسل (دشت بیاض و فردوس) به هم است (افتخارنژاد و همکاران، ۱۳۴۷).

در ۱۰ می ۱۹۹۷ (۲۰ اردیبهشت ۱۳۷۶) زیرکوه قائن با گسلش سطحی ۵۰ کیلومتر با بزرگی در مقیاس امواج سطحی ۷/۳ با راستای گسله N20W و شیب ۸۸ درجه و عمق ۱۰ کیلومتر که توانست گسل های آبیض و دشت بیاض را هم تحت تأثیر قرار دهد. گسل مسبب آن در نیمه جنوب - جنوب خاوری که از آبیض به سمت شرق گسترش دارد. رومرکز این زمین لرزه بین حاجی آباد و اردکول در نزدیکی روستای اسفرق بود. مکانیزم آن راست لغز راست بر با مؤلفه معکوس که ۱ متر جابجایی راست بر و ۰/۵ متر جابجایی قائم را همراه داشت (مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن، ۱۳۷۶).



شکل ۱. نقشه لرزه زمین ساخت استان خراسان رضوی.

روش کار:

در هر پروژه علمی صحت کار و نتایج مطلوب آن اثر، مبتنی بر گستردگی و جامعیت داده های اولیه است. بنابراین، داده های اولیه این مقاله از پایگاه های مختلف و معتبر جهانی و داخلی در بازه ای ۱۱۲ ساله (۲۰۱۵-۱۹۰۳) جمع آوری شده است و پس از ادغام و فیلتر کردن مناسب (حذف) رخدادهایی با بزرگی کوچک تر از ۳/۵ ریشتر و زلزله های تکراری، از آنها در انجام محاسبات استفاده شده است. لیست این پایگاه ها در بخش منابع ذکر شده است.

فرآیند کار چنین است که با استفاده از آمار زلزله های رخ داده در گستره یک ساختگاه و انتخاب یک مدل ریاضی، احتمال وقوع زلزله هایی با بزرگی مشخص در آینده برآورد می گردد. پدیده زلزله، هم از نظر بزرگی و هم از نظر زمان وقوع آن یک فرآیند تصادفی است. بنابراین به منظور تجزیه و تحلیل داده های بانک اطلاعاتی و پیش بینی وضعیت آینده از رخداد زلزله، لازم است پس از دسته بندی و مرتب نمودن داده ها، توابع توزیع مناسب برای

بزرگی زلزله و همچنین برای زمان وقوع آن و یا توابع توزیعی که هم شامل بزرگی و هم زمان وقوع زلزله باشد، انتخاب شوند. بنابراین از دو مدل گوتنبرگ-ریشتر و پواسون در این مقاله بهره برده شده است.

برای رسم نقشه های توزیع b -value، با مطالعه تکنیک و زمین شناسی استان، ابتدا استان را با توجه به نقشه های ۱:۲۵۰،۰۰۰ سازمان زمین شناسی تقسیم بندی کرده و چشمه های لرزه زا را در هر صفحه مشخص می کنیم. تعریف از چشمه های لرزه زا همان گسل های فعال در عصر حاضر هستند. این چشمه ها را با هم پوشانی زلزله های استان از سال ۱۹۶۴ تا ۲۰۱۵ (بدون محدودیت بزرگی) بر روی نقشه گسل های منطقه مشخص می کنیم. نقشه گسل های استان و نقشه پراکندگی زلزله های منطقه در شکل های ۲ و ۳ نشان داده شده است. در مرحله بعد، با توجه به پراکندگی زلزله ها در چهار گوشه های ذکر شده، میزان فراسنج های لرزه ای در هر چهار گوشه را از طریق رابطه گوتنبرگ-ریشتر تعیین می کنیم. برای محاسبه این پارامترها، داده های زلزله های استان

پس از حذف پس‌لرزه‌ها است. فرآیند حذف پس‌لرزه‌ها (Declustering) در این پژوهش به کمک نرم افزار Z-map و به روش Reasenberg انجام شده است. تنها تفاوت این دو مدل (گوتنبرگ-ریشتر و پواسون) در این است که در مدل گوتنبرگ-ریشتر عامل مؤثری از عمر سازه (زمان) دخیل نبوده اما در مدل پواسون این عامل نقش اساسی دارد.

در ابتدا رابطه خطی بین مقیاس های M_b و M_s را برپایه داده های خام بوسیله نرم افزار Excel بدست آورده که بشرح زیر است:

$$M_s = 1.1636M_b - 1.2164 \quad (2)$$

سپس داده‌ها براساس بزرگی دسته بندی کرده و در هر دسته تعداد زلزله های رخ داده را محاسبه کرده و حاصل جمع تجمعی آنها را به دست می‌آوریم. در مرحله بعد مقدار لگاریتم حاصل جمع تجمعی هر دسته را به منظور محاسبه فراسنج‌های لرزه ای و رابطه گوتنبرگ-ریشتر در منطقه بدست می‌آوریم. نتایج این محاسبات در جدول ۳ آمده است.

جدول ۳. فراوانی زلزله های منطقه ۲۰۱۵-۱۹۰۰ میلادی.

Ms	فراوانی (N)	فراوانی تجمعی (Nc)	Log Nc
$6/5 \leq M_s < 7/0$	1	1	0/000
$6/0 \leq M_s < 6/5$	2	3	0/477
$5/5 \leq M_s < 6/0$	5	8	0/903
$5/0 \leq M_s < 5/5$	3	11	1/041
$4/5 \leq M_s < 5/0$	16	27	1/431
$4/0 \leq M_s < 4/5$	17	44	1/643
$3/5 \leq M_s < 4/0$	30	74	1/869
$3/0 \leq M_s < 3/5$	47	121	2/083

شامل بزرگی، طول و عرض جغرافیایی، زمان وقوع و عمق زلزله‌ها را نیاز داریم. چون هر کدام از پایگاه‌های اعلام و ثبت زلزله‌ها، بزرگی را در مقیاسی خاص بیان می‌کنند، مجبور به یکسان‌سازی بزرگی‌ها بودیم که این کار را مطابق رابطه ۱ انجام داده ایم (میرزایی، ۱۳۸۱):

$$M_s = 2.0m_b - 5.28 \quad (1)$$

بعد از هم مقیاس کردن داده‌ها، محاسبه پارامترهای موردنظر را به کمک نرم‌افزار Z-map با حدود ۱۶۰۰ زلزله در بزرگای ۱/۷ ریشتر در مقیاس امواج سطحی (M_s) و بیشتر، انجام دادیم که نتایج آن برای ۱۰ صفحه ۱:۲۵۰۰۰۰ که تمامی استان را پوشش می‌دهند، مطابق جدول ۲ ارائه شده است.

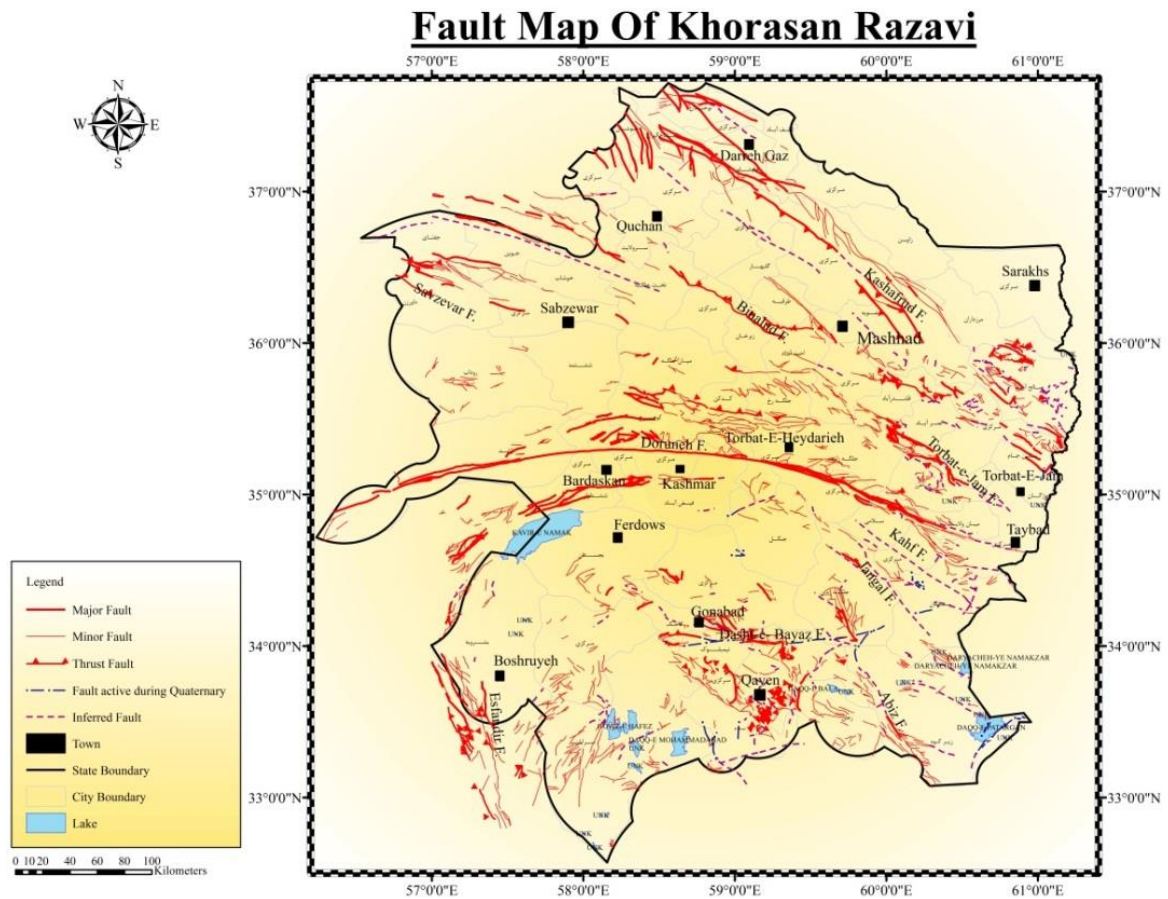
جدول ۲. پارامترهای لرزه خیزی استان خراسان رضوی.

Sheet	a-Value	b-Value
Dargaz	2/61	0/505
Ferdows	2/42	0/343
Gonabad	2/41	0/304
Kashmar	2/73	0/448
Mashhad	3/32	0/634
Sabzevar	3/20	0/587
Sarakhs	2/04	0/507
Torbat-H	3/12	0/563
Torbat-J	2/80	0/513
Taybad	3/68	0/916

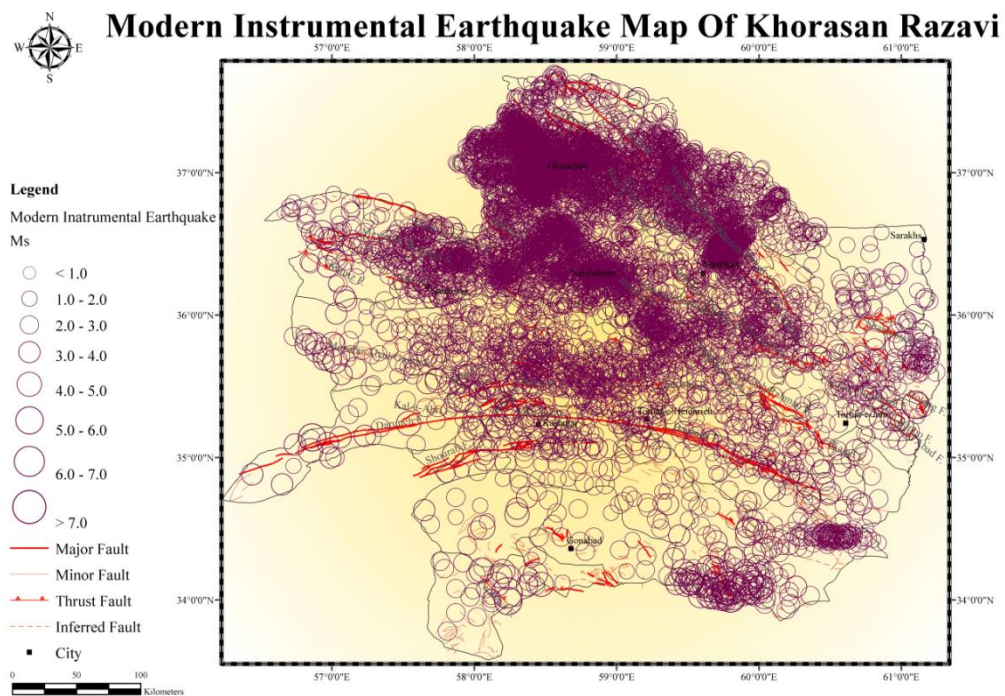
بحث:

الف: مدل گوتنبرگ-ریشتر

مقدمات در کار با هر دو مدل مبتنی بر محاسبه رابطه ای منطقی و لگاریتمی بین بزرگی های مختلف با تعداد آنها



شکل ۲. گسل های استان خراسان رضوی.



شکل ۳. پراکندگی زلزله های استان خراسان رضوی؛ با توجه به نواحی تمرکز زلزله ها بر روی نقشه، مناطق زلزله خیز شامل مناطق شمالی گسل کشف رود (حوالی درگز و قوچان)، حوالی گسل بینالود (حوالی نیشابور)، مناطق مرکزی گسل درونه (حوالی تربت حیدریه و کاشمر) و منطقه دشت بیاض (حوالی جنوب و شرق گناباد) در جنوب استان به وضوح دیده می شود.

رابطه گوتنبرگ-ریشتر به شکل زیر است:

$$\text{Log } N_c = a - bM(3)$$

N_c : فراوانی تجمعی زلزله های رخ داده در طول زمان بررسی برای زلزله ای با بزرگی خاص.

a : پارامتر لرزه خیزی منطقه که مقدار آن بستگی به تعداد زلزله های رخ داده در منطقه دارد.

b : پارامتر لرزه خیزی منطقه که مقدار آن بستگی به وضعیت تکتونیکی منطقه دارد.

میزان a رابطه مستقیم با استعداد لرزه خیزیخاستگاه مورد مطالعه دارد. به عبارت دیگر هرچه مقدار آن بیشتر باشد، تعداد زلزله های منطقه در بازه زمانی موردنظر بیشتر است. اما میزان b رابطه معکوس با مقدار تنش تجمع یافته در ناحیه دارد و کم بودن آن نشانگر نسبت بالای تعداد زلزله های بزرگ به کوچک در منطقه خواهد بود (نولوکاسانووا و همکاران، ۲۰۰۶).

مقدار این پارامتر معمولاً بین ۰/۵ تا ۱ است.

بعد از انجام محاسبات بالا، نمودار $\text{Log } N_c$ محاسبه شده را براساس بزرگی (M_s) رسم کرده و بهترین رابطه خطی برازش داده شده بر آن را به عنوان معادله گوتنبرگ-ریشتر

منطقه معرفی می کنیم. نمودار رسم شده و رابطه موردنظر، در شکل ۴ نمایش داده شده است.

با توجه به رابطه بدست آمده، پارامترهای لرزه منطقه (b -Value& a -Value) به شرح زیر تعیین می شود:

$$a\text{-Value: } 3/9124$$

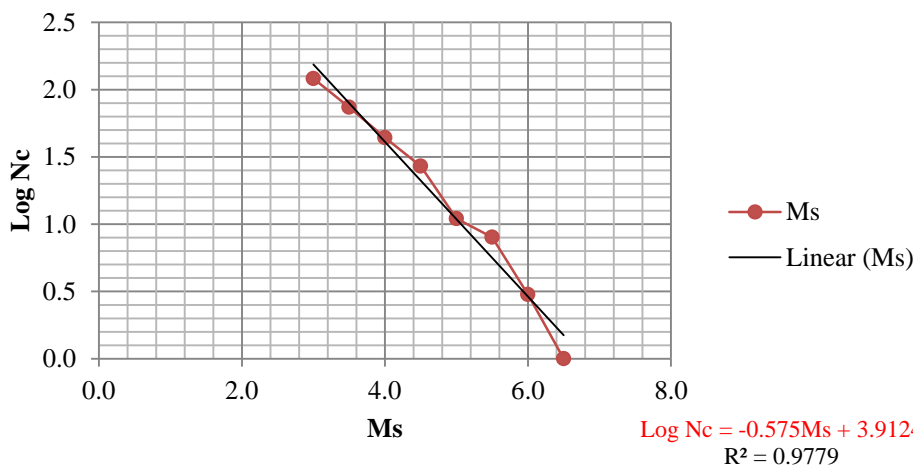
$$b\text{-Value: } 0/575$$

طبق رابطه گوتنبرگ-ریشتر بدست آمده (شکل ۴)، شیب نمودار مقدار a و عرض از مبدأ مقدار b ، است.

در این مرحله، لازم است تا تصحیحات مکانی و زمانی مناسب را بر روی پارامترهای لرزه ای محاسبه شده اعمال کنیم، بدین منظور با توجه به اینکه بازه زمانی مورد بررسی نگارنده، ۱۱۲ سال بوده و همچنین هر ضلع از منطقه را به ۸ قسمت مساوی تقسیم کرده است؛ مقدار $\text{Log}8$ و $\text{Log}112$ را از a -Value محاسبه شده کسر نموده و سپس از آن در ادامه کار استفاده می کنیم.

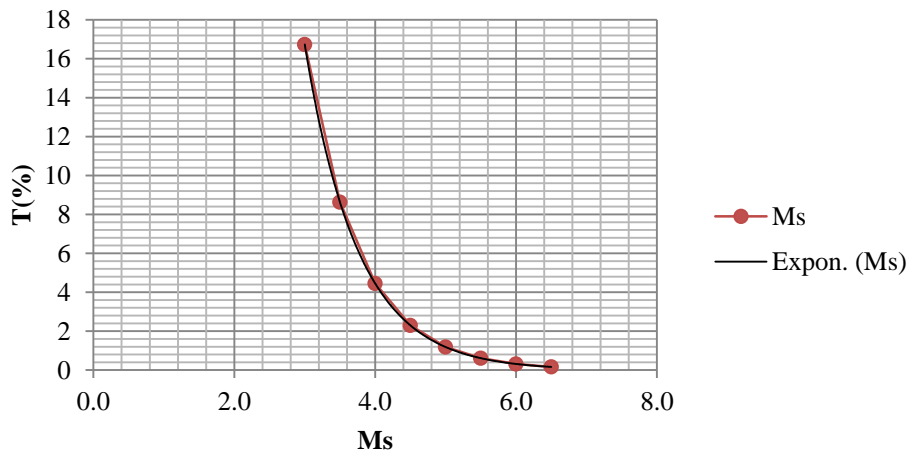
$$\begin{aligned} \text{Corrected } a\text{-Value} &= 3.9124 - \text{Log}8 - \text{Log}112 \\ &= 0.9486122 \end{aligned}$$

برای محاسبه احتمال وقوع زلزله های با بزرگی های مختلف، از رابطه زیر بهره می بریم:

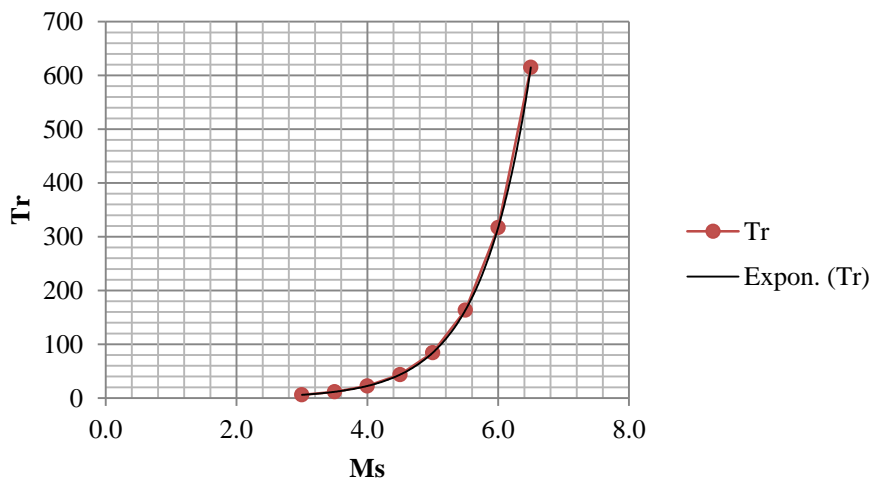


شکل ۴. رابطه گوتنبرگ-ریشتر منطقه.

T



شکل ۵. درصد احتمال وقوع زلزله‌ها در منطقه (در بازه زمانی ۱۹۰۳-۲۰۱۵).



شکل ۶. دوره بازگشت زلزله‌ها در منطقه (در بازه زمانی ۱۹۰۳-۲۰۱۵)

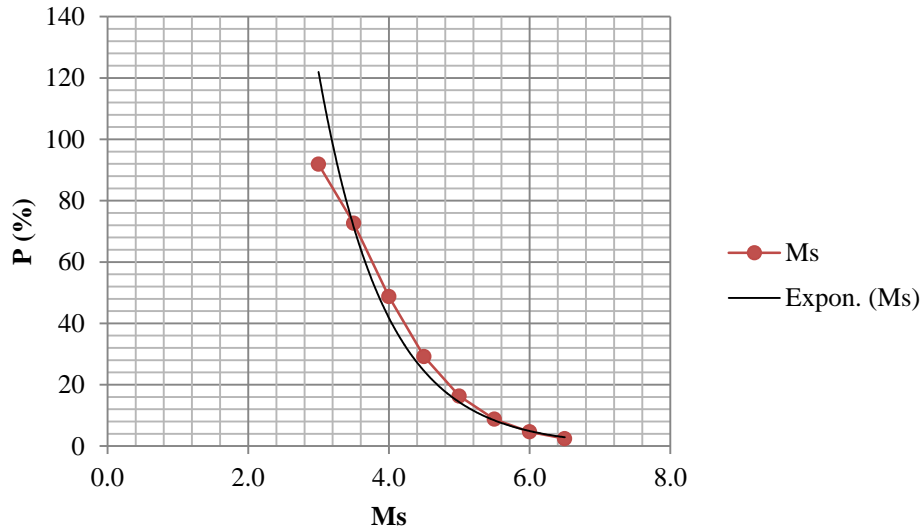
$$T = 10^{a-bM_s}$$

$$P_t = 1 - \exp(-Tt) \quad (5)$$

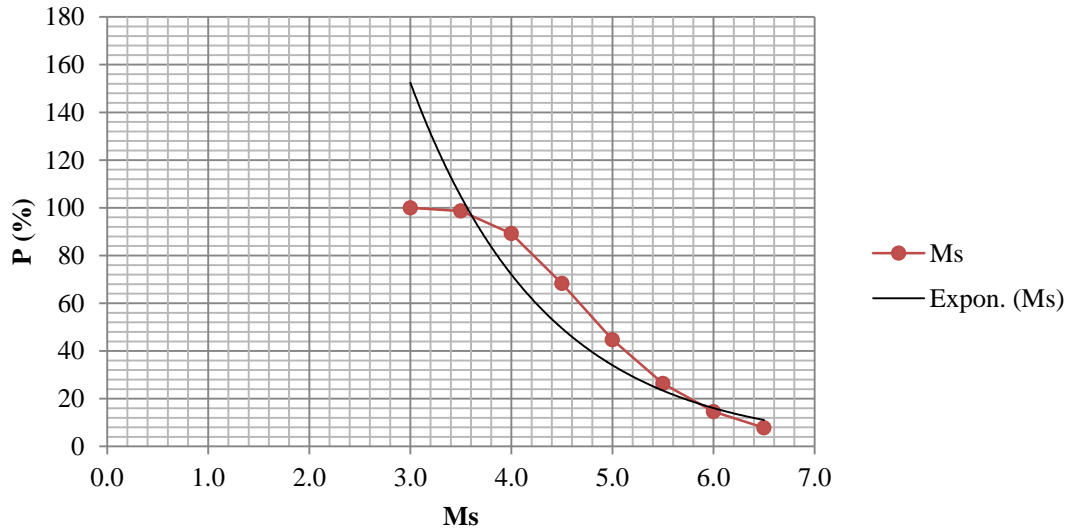
$$t = 15 \text{ year}$$

ب: مدل پواسون

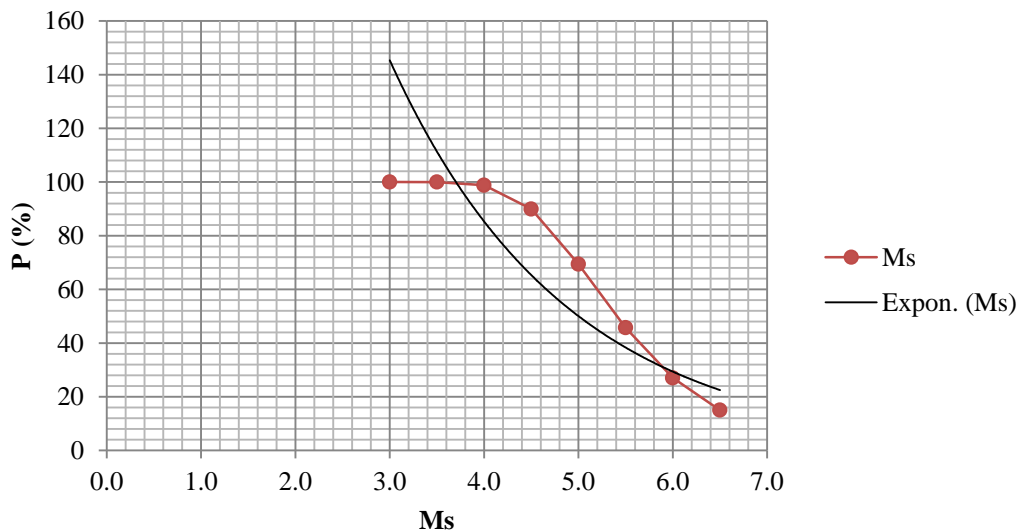
در این مدل پس از انجام فرآیند مدل گوتنبرگ-ریشتر از رابطه ۵ احتمال وقوع زلزله با بزرگی M_s در مدت t سال، بدست می‌آید (شکل ۷، ۸ و ۹). ($t = 15, 50, 100$ سال)



شکل ۷. درصد احتمال وقوع زلزله با بزرگی های مختلف (در بازه زمانی ۱۵ سال).



شکل ۸. درصد احتمال وقوع زلزله با بزرگی های مختلف (در بازه زمانی ۵۰ سال).



شکل ۹. درصد احتمال وقوع زلزله با بزرگی های مختلف (در بازه زمانی ۱۰۰ سال).

محاسبه DBE و MCE:

به منظور تأمین پایداری سازه ها در مقابل زمین لرزه - های احتمالی، معمولاً دو زلزله ذیل ملاک محاسبات قرار می گیرد.

الف) زمین لرزه مبنای طرح (Design BaseEarthquake, DBE):

زمین لرزه ای است که حداقل یکبار در مدت عمر مفید سازه روی می دهد و نباید سبب هیچگونه خسارتی به سازه گردد و خطر وقوع آن ۶۴ درصد انتخاب می شود. در حقیقت این زمین لرزه حداقل یکبار در طول عمر مفید سازه روی می دهد، بنابراین دوره بازگشت آن برابر عمر مفید سازه یعنی $T_r = t$ خواهد بود و داریم:

$$P = \frac{1}{T_R} = \frac{1}{t} \Rightarrow P_t = 1 - \exp\left[-\frac{1}{t}\right] = 1 - \exp(-1) \quad (۶)$$

$$P_t = 0.632$$

که حدوداً همان ۶۴ درصد در نظر گرفته می شود.

ب) حداکثر زمین لرزه قابل انتظار (Maximum Credible Earthquake, MCE):

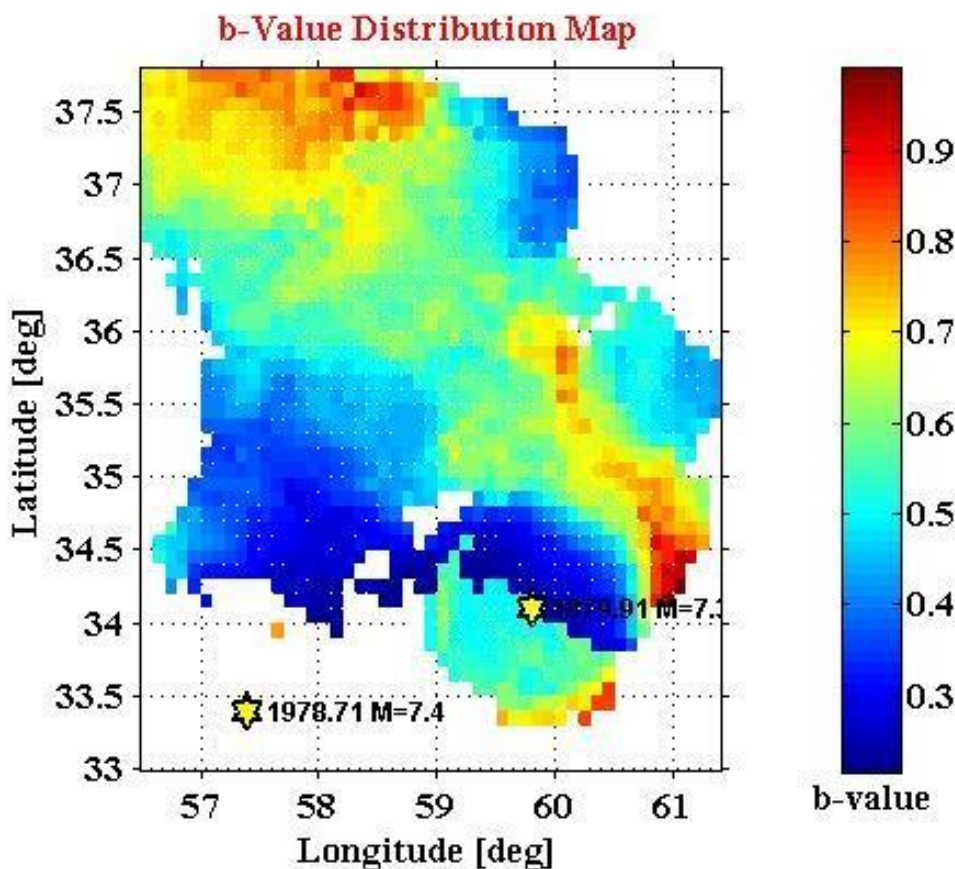
حداکثر زمین لرزه ای که احتمال وقوع آن در ساختگاه قابل انتظار است و در اثر رویداد آن امکان آسیب سازه وجود دارد، لیکن نباید سبب فروریختن آن گردد و خطر (ریسک) وقوع این زمین لرزه ۱۰ درصد انتخاب می گردد. در جدول ۴، مقادیر ذکر شده در بالا برای منطقه مورد بررسی، محاسبه و نشان داده شده است.

جدول ۴. مقادیر DBE و MCE.

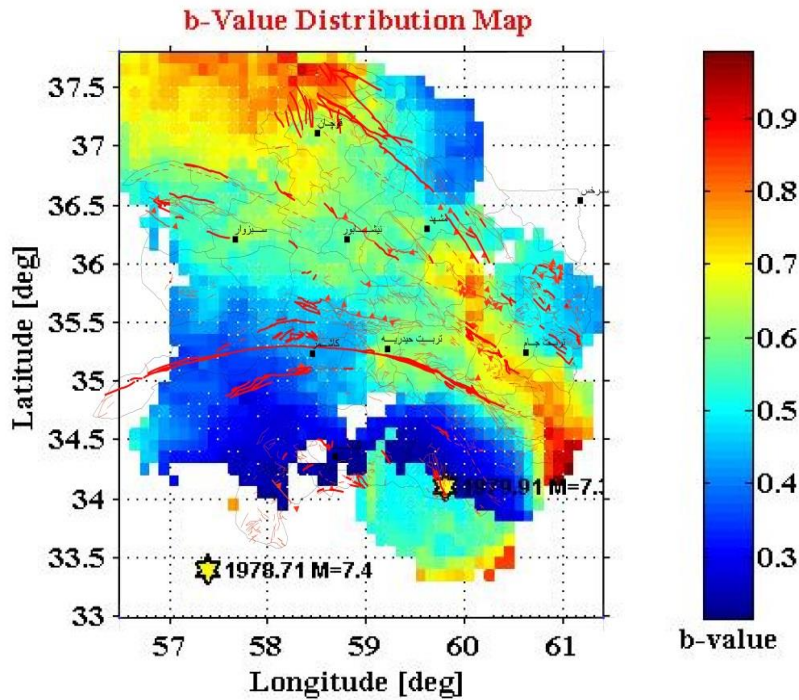
Pt	T=15	T=50	T=100
DBE (64%)	3/7	4/6	5/1
MCE (10%)	3/1	4/0	4/5

نتیجه گیری:

در این مرحله نقشه های توزیع b-value در استان را با توجه به میانگین میزان آن در ورقه های زمین شناسی منطقه رسم می کنیم (شکل ۱۰ و ۱۱).



شکل ۱۰. نقشه توزیع b-value در استان خراسان رضوی.



شکل ۱۱. نقشه توزیع b-value در استان خراسان رضوی با تطابق بر چشمه های لرزه زا (گسل های فعال عصر حاضر).

های معتبر داخلی و خارجی که در این مقاله از آنها استفاده شده، می توان دریافت. داده های این کاتالوگ پس از حذف پس لرزه ها به روش Reasenberg و نرمال سازی مقیاس ها با روابط مذکور، مورد استفاده قرار گرفته است. به طور کلی می توان گفت مناطقی که میزان b-value کمتری را نشان می دهند، از لحاظ کیفی مستعد رخداد زلزله های بزرگتری هستند، برای صحت این ادعا می توان به زلزله ۷/۳ ریشتری سال ۱۹۷۹ رخ داده در جنوب استان خراسان رضوی (کولی و بنیاداد) اشاره کرد (با ستاره زرد رنگ مشخص شده است) که در منطقه ای با b-value پایین اتفاق افتاده است. در مقابل مناطق با میزان b-value بیشتر، از نظر کمی تعداد زلزله های بالایی را به خود دیده اند.

باتوجه به نقشه پراکندگی و گسل های استان که چشمه های بالقوه (گسل های فعال عصر حاضر که باتوجه به رومرکز زمین لرزه های رخ داده، انتخاب شده اند.) در منطقه محسوب می شوند، می توان دید که در مناطق پرخطر استان (مناطق جنوبی) میزان b-value پایین است. به عبارت دیگر نسبت زمین لرزه های بزرگ به کوچک در این ناحیه بیشتر است. با نگاهی کوتاه به زلزله های تاریخی ذکر شده در بخش های قبل می توان به صحت این ادعا پی برد.

همچنین در مناطق مرکزی استان که زلزله بزرگ تاریخی هم موجود نیست و دوره بازگشت زلزله ها زیاد می باشد، میزان b-value مقیدار بیشتری را نشان می دهد. در این مناطق میزان a-value با توجه به جدول ۲ به نسبت بیشتر بوده که نشانگر تعداد بالاتری از زلزله ها در ناحیه است. این ادعا را با نگاهی به کاتالوگ لرزه ای جمع آوری شده از پایگاه-

منابع:

- Mirzaei, N., Mengtan, G., & Yuntai, C., 1998: *Seismic Source Regionalization for Seismic Zoning of Iran: Major Seismotectonic Provinces*. Journal of Earthquake Prediction Research 7, 465-495.
- Masson, F., Anvari, M., Djamour, Y., Walpersdorf, A., Tavakoli, F., Daignieres, M., Nankalim H. & Van Gorp, S., 2007: Large-scale velocity field and strain tensor in Iran inferred from GPS measurement: new insight for the present-day deformation pattern within NE Iran, Geophysical J. Int. 170, 436-440.
- Novelo-Casanova, D.A., Martinez-Bringas, A., Valdés-González, C., 2006: *Temporal variations of $Q_c - 1$ and b values associated to the December 2000–January 2001, volcanic activity at the Popocatepetl, Mexico, volcano*. J. Volcanol. Geotherm. Res. 152, 347–358.
- Vernant, Ph., Nilforoushan, F., Hatzfeld, D., Abbasi, M. R., Vigny, C., Masson, F., Nankali, H., Martinod, J., Ashtiani, A., Tavakoli, F., & Chery, J., 2004: Present-day crustal deformation and plate kinematics in the Middle East constrained by GPS measurement in Iran and Northern Oman. Geophysics J. Int. 157, 381-398.
- Walker, J., Jackson, J. & Bacer, C., 2003: *Surface expression of thrust faulting in eastern Iran source: parameters and surface deformation of the 1978 Tabas and 1968 Ferdows earthquake sequences*. Geophysics J. Int. 152, 749–765.
- Walker, J. & Jackson, J. & Bacer, C., 2004: *Active faulting and seismicity of Dasht-e-Bayaz region, eastern Iran*. Geophysics J. Int. 157, 265-282.
- Walker, J. & Jackson, J., 2004: *Activetectonics and late Cenozoic strain distribution in central and eastern Iran*. Tectonic, Vol. 23.
- <http://earthquake.usgs.gov>
<http://www.isc.ac.uk>
<http://www.globalcmt.org>
<http://www.iiees.ac.ir>
- آقناباتی، س. ع.، ۱۳۸۳، زمین شناسی ایران، انتشارات سازمان زمین شناسی کشور، ۵۸۶.
- آمبراسیز، ن. ن. و ملویل، چ. ب.، ۱۹۸۲، تاریخ زمین لرزه های ایران، ترجمه رده، ا. ۱۳۷۰، مؤسسه انتشارات آگاه، تهران.
- افتخارنژاد، ج. ج.، حقی پور، ع.، داوودنژاد، م.، ۱۳۴۷، گزارش بررسی زلزله خراسان.
- سعیدنژاد، م.، ۱۳۹۱، برآورد تحلیل خطر و تهیه طیف پاسخ به روش احتمالاتی در شمال شرق ایران، هفدهمین همایش انجمن زمین شناسی ایران، دانشگاه شهیدبهشتی.
- میرزائی، ن.، ۱۳۸۱، پارامترهای مبنایی زمین لرزه های ایران. مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن، گزارش زمین لرزه ۲۰ اردیبهشت ۱۳۷۶ زیرکوه قائن.
- Berberian, M., 1981: *Active Faulting and Tectonics of Iran*, Geol. Sur. of Iran. Rep. No. 52.
- Fattahi, M., Walker, R.T., Khatib, M. M., Dolati, A., & Bahroudi A., 2007: *Slip-rate estimate and past earthquakes on the Doruneh fault, eastern Iran*. Geophysics J. Int. 168, 691–709.
- Hollingsworth, J., Jackson, J., Walker, R., Gheitanchi, M., & Bolourchi, M., 2006: *Skip-rate faulting, rotation, and along-strike elongation in the KopehDagh mountains, NE Iran*, Geophysical J. Int. 166, 1161-1177.
- Hollingsworth, J., Jackson, J., Walker, R. & Nazari, H., 2008: *Extrusion tectonics and subduction in Eastern South Caspian region since 10 Ma*, Geology, 36(10), 763-766.
- Jackson, J., Haines, J. & Holt, W., 1995: *The accommodation of Arabia-Eurasia plate convergence in Iran*, J. of Geophysical Research, 100(B8), 15205-15219.
- Jackson, J., Priestley, K., Allen, M. & Berberian, M., 2002: *Active tectonics of the South Caspian Basin*, Geophysical J. Int. 148, 214-245.