



پایش ضریب لرزه خیزی در مناطق لرزه خیز ایران بعنوان پیش نشانگر زلزله های آینده

علیرضا فیروزفر^{۱*}، بهمن انصاری^۲

^{۱*} استادیار، گروه مهندسی عمران-ژئوتکنیک، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران (firoozfar@znu.ac.ir)

^۲ دانشجوی دکتری، گروه مهندسی عمران-ژئوتکنیک، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران

(تاریخ دریافت مقاله: ۹۸/۲/۱۵، تاریخ پذیرش مقاله: ۹۸/۰۶/۱۰)

چکیده

یکی از بحث‌های پیچیده و مبهم علوم مهندسی زلزله بحث پیش‌بینی زمین لرزه است و تلاش‌های صورت گرفته در این راستا در صورتیکه از یک پایه فنی مناسب برخوردار باشد با اهمیت خواهند بود. زلزله‌های متوالی بوقوع پیوسته اخیر در نواحی مختلف ایران حاکی از بروز یک رژیم لرزه‌خیزی خاص در این کشور و مشوقی جهت بررسی ابعاد مختلف این پدیده می‌باشند. در این تحقیق آنالیزهایی بر روی داده‌های کاتالوگ پژوهشگاه زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله انجام و به عنوان یک عامل تعیین کننده، پارامتر b رابطه گوتنبرگ-ریشر مورد محاسبه قرار گرفته است. از آنجا که وجود روند کاهشی در مقادیر وابسته به زمان این پارامتر لرزه‌ای می‌تواند بیانگر تجمع تنش در منطقه مورد مطالعه باشد، برای بررسی احتمال وقوع زلزله‌های حاصل از تجمع تنش در مناطق مختلف، کشور ایران به ۲۹ ناحیه تقسیم گردیده و در هر ناحیه پارامتر b در بازه زمانی بین سالهای ۱۳۸۸ الی ۱۳۹۶ محاسبه گردیده است. نتایج بدست آمده بسیار جالب توجه بوده و مطابقت کامل با آنچه اخیراً در مناطق مختلف ایران اتفاق افتاده دارد بطوریکه زلزله‌های بوقوع پیوسته بین سالهای ۱۳۹۶ الی ۱۳۹۷ همگی صدق ادعای این پهنه بندی را تایید می‌کنند و لذا این نقشه پهنه‌بندی می‌تواند نواحی مربوط به وقوع زمین لرزه‌های آینده را به نمایش گذارد.

کلمات کلیدی

زلزله، ضریب لرزه خیزی، تحلیل خطر، سطح تنش.



b-value, an Alert in Different Seismic Regions of Iran

Alireza Firoozfar^{1*}, Bahman Ansari²

^{*1} Assistant Professor, Department of Geotechnical Engineering, Zanjan University, Zanjan, Iran
(firoozfar@znu.ac.ir)

² Ph.D. Candidate, Department of Geotechnical Engineering, Zanjan University, Zanjan, Iran

(Date of received: 05/05/2019, Date of accepted: 01/09/2019)

ABSTRACT

Although Earthquake prediction studies are being widely considered their findings are uncertain and criticized regarding problem complexity and scientific content. Therefore; based on the robust analysis, the detailed investigation can be of great value. The recent triggered events in Iran reveal that this country is under pressure and contemporary tectonic stress pattern of the region changes. This motivates researchers to explore its different aspects. In this research, statistical analysis is made on the records listed in International Institution of Earthquake Engineering and Seismology (IIEES) catalog and b-value of the Gutenberg-Richter Relationship was computed. The time-dependent values of being can act as a stress accumulation indicator in a region. Therefore, Iran was subdivided into 29 zones and b-value was explored in every zone between the years 2010 and 2017. The results are in a proper agreement with the seismic regime of the regions wherein earthquakes occurred recently. Furthermore, an interesting hazard map was resulted in, introducing the regions with accumulating stresses therefore, being susceptible for experiencing future events.

Keywords:

Earthquake, b-value, Risk Analysis, Stress level.



۱- مقدمه

زلزله‌های بوقوع پیوسته اخیر ایران نشان می‌دهند بسیاری از مناطق در این کشور تحت تنش‌های تکتونیکی فعال هستند و امکان وقوع زلزله در هر ناحیه وجود دارد. بررسی امکان وقوع زلزله در سالهای اخیر با روش‌های تحلیل خطر لرزه‌ای صورت گرفته ولی در برخی موارد روش‌های مختلف دیگری نیز ارائه شده‌اند که بر پایه تغییرات پارامترهای فیزیکی قبل از وقوع زلزله استوار هستند. برای مثال در تحقیقات متعددی نشان داده شده است که برخی پارامترها نظیر گرانش محلی [۱]، میدان مغناطیسی محلی [۲]، سطح آب زیرزمینی [۳-۴]، دمای آب زیر زمینی [۵] و مقاومت الکتریکی خاک [۶-۷] قبل از وقوع زلزله دچار تغییر می‌شوند. علاوه بر این تحقیقات بسیاری به کمک تحلیل‌های آماری در راستای کسب اطلاعات مناسب از خطرات زلزله انجام یافته است [۸-۹]. یکی از پارامترهای لرزه‌ای مهم در زمینه تحلیل خطر و برآورد احتمال وقوع زلزله پارامتر b رابطه گوتنبرگ-ریشرتر می‌باشد [۱۰]. پارامتر b با سطح تنش منطقه رابطه دارد بطوریکه با افزایش تنش در منطقه مقدار پارامتر b کاهش می‌یابد [۱۱-۱۲]. برخی معتقدند که می‌توان از پارامتر b به عنوان شناساگر تنش در یک منطقه استفاده کرد [۱۳]. از آنجایی که سطح تنش در منطقه با گذشت زمان تغییر می‌کند می‌توان گفت که پارامتر b تابع زمان بوده و با گذشت آن تغییر می‌نماید. کاهش پارامتر b با زمان می‌تواند به عنوان یک ابزار مناسب جهت تحلیل خطر وقوع زلزله در یک بازه‌ی زمانی خاص مورد استفاده قرار گیرد [۱۴]. تغییرات پارامتر b در مناطق پر تنش بخصوص قبل از وقوع زلزله‌های سهمگین بارها مورد بررسی قرار گرفته است. تحقیقات صورت گرفته نشان می‌دهند که این پارامتر در مناطق پر تنش قبل از وقوع زلزله کاهش می‌یابد و این کاهش تا زمان وقوع زلزله ادامه دارد [۱۵-۱۶-۹]. افزایش دقت محاسبات در محاسبه‌ی پارامتر b نیازمند در دسترس بودن اطلاعات اولیه مناسب و کامل است که اصطلاحاً با لفظ غنی بودن کاتالوگ لرزه‌ای بیان می‌شود [۱۷]. در صورتیکه تمام رخداد‌های لرزه‌ای یک منطقه توسط سیستم‌های اندازه‌گیری کننده ثبت شوند و تعداد این رخدادها در حد مطلوبی باشد، می‌توان کاتالوگ را کامل یا غنی در نظر گرفت. معمولاً هراندازه که دقت محاسبات پارامتر b بیشتر باشد می‌توان گفت که کاتالوگ در یک منطقه کامل بوده و نتایج نهایی قابل اطمینان‌تر است. در ایران از دو موسسه پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله و موسسه ژئوفیزیک می‌توان به عنوان دو مرکز مهم ثبت داده‌های لرزه‌ای نام برد. پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله که از سال ۱۳۶۸ شروع به فعالیت نموده است، به صورت برخط اطلاعات زلزله‌های مختلف را در اختیار پژوهشگران قرار می‌دهد. بزرگای رخداد‌های ارائه شده در کاتالوگ این موسسه تا سال ۱۳۸۲ به صورت غیر یکنواخت میباشند، بدین معنا که زلزله‌های گزارش شده بر اساس مقیاس‌های مختلف بزرگا هستند ولی از سال ۱۳۸۲ به بعد اکثر زلزله‌ها در مقیاس بزرگای محلی بیان گردیده‌اند و لذا می‌توان بدون نگرانی از ناهمگنی کاتالوگ، آنالیزهای آماری را بر روی آن انجام داد.

اگرچه هنوز موضوع پیش‌بینی زمان وقوع زلزله در دنیا در ابهام است و تاکنون روش پذیرفته شده‌ای برای آن ارائه نگردیده است ولی می‌توان برخی شواهد را در ارتباط با آن در مناطق لرزه‌خیز مورد بررسی قرار داد. در این مقاله با محاسبه مقادیر وابسته به زمان پارامتر b سعی شده است با توجه به رابطه این پارامتر با سطح تنش در هر منطقه، نشانه‌هایی از امکان وقوع زلزله در مناطق مختلف ایران ارائه شود. بر این اساس و به منظور انجام آنالیزهای آماری از کاتالوگ لرزه‌ای پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله استفاده شده و از ۱۱۶۲۵ رکورد لرزه‌ای مربوط به تاریخ‌های ۱۳۸۸/۱۰/۱۱ تا ۱۳۹۶/۰۷/۰۹ بهره گرفته شده است و سپس به منظور محاسبه تغییرات پارامتر b با زمان در مناطق مختلف ایران، این مناطق به قسمت‌های مختلف ناحیه‌بندی شده‌اند. مبنای این تقسیم‌بندی توزیع و تعداد زلزله‌های اتفاق افتاده در اطراف گسل‌های فعال می‌باشد. در نهایت با ارائه یک نقشه مناطق پرخطر لرزه‌ای به صورت مناطق با تجمع تنش بالا ارائه شده‌اند. در حالت کلی می‌توان گفت که اغلب مناطق ایران تحت تجمع تنش قرار دارند.



۲- تکتونیک حوزه مطالعاتی

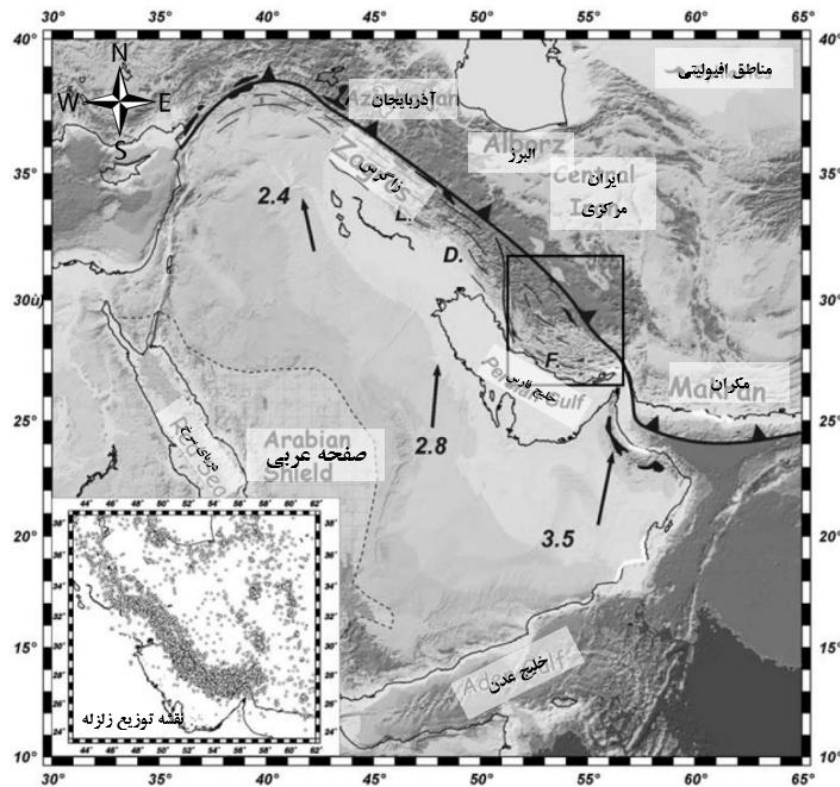
به لحاظ تکتونیکی کشور ایران قطعه‌ای بزرگ از یک صفحه تحت فشار است. ایران در بین دو صفحه اورآسیایی و عربی قرار گرفته و در نتیجه فشارهای ناشی از جابجایی این دو صفحه به سمت یکدیگر موجب شده است، صفحه ایران تحت یک حرکت دورانی تغییر شکل دهد [۱۸] که این به نوبه خود موجب ایجاد گسل‌ها و در نتیجه زلزله‌های فراوانی در ایران شده است. شکل (۱) نحوه حرکت صفحه عربی و جهت فشارهای وارده از آن را نشان می‌دهد. مطابق این شکل نواحی پر تنش شامل مناطق زاگرس، البرز، مرکز و آذربایجان است. بربریان [۱۹] کشور ایران را به چهار زون لرزه‌ای مختلف تقسیم کرده است. اولین زون شامل ناحیه آذربایجان، واقع در شمال غرب ایران و امتداد یافته تا شرق ترکیه است. این ناحیه از دو المان تکتونیکی مهم تشکیل یافته است. اولین المان، ساختار امتداد یافته اراک، زرینه رود است که در قسمت غربی دریاچه ارومیه واقع است و دومین المان ساختار امتداد یافته تبریز-زنجان است که گسل تبریز شمالی تکه‌ای از آن است. این گسل طولی برابر با ۲۵۰ کیلومتر را شامل شده و در جهت شمال غرب-جنوب شرق امتداد یافته است. این دو المان در قسمت شمالی دریاچه ارومیه با هم یکی می‌شوند و تا ترکیه ادامه می‌یابد [۱۸]. زلزله‌های تاریخی در آذربایجان نشان دهنده لرزه‌خیزی بالای منطقه و احتمال بالای وقوع زلزله است و وجود گسل‌های عمدتاً معکوس و امتداد لغز در این ناحیه خود گواه بر این موضوع است.

دومین پهنه، ناحیه تکتونیکی زاگرس است. رشته کوه‌های زاگرس در یک منطقه وسیع پرتنش می‌باشند که تا ۲۰۰۰ کیلومتر در غرب ایران از ترکیه تا جزیره هرمز امتداد یافته‌اند [۲۰]. این منطقه تحت تاثیر دو صفحه عربی و اورآسیایی واقع شده و فشارهای ناشی از حرکت این صفحات عامل اصلی شکل‌گیری گسل‌های زاگرس می‌باشد [۲۱]. ناحیه زاگرس از شمال به گسل اصلی زاگرس (MZT) منتهی است. گسل اصلی زاگرس از جنوب شرق با گسل میناب که جداکننده ناحیه فرورانشی مکران از زاگرس است برخورد کرده است. در ناحیه شمال شرق، گسل MZT به گسل آناطولی شرقی در ترکیه ملحق می‌شود. سازوکار گسل زاگرس راندگی-فشاری است. در حاشیه گسل اصلی زاگرس تعدادی گسل وجود دارند که باعث جابجایی طبقات رسوبی آهکی دوران دوم زمین شناسی شده است. مکانیزم کانونی در منطقه زاگرس بسیار متنوع بوده و عمدتاً گسهای معکوس، امتداد لغز و گاهاً نرمال را شامل می‌شوند.

ناحیه البرز حاصل از برخورد پوسته قاره‌ای البرز با قطعه لیتوسفری توران می‌باشد و بیش از ۲۰۰۰ کیلومتر از شرق تا غرب ایران امتداد یافته است. اکثر سنگ‌های یافت شده در این ناحیه شامل مجموعه‌های افیولیتی دگرگون شده و بقایای رسوبات عمیق دریایی دگرگون شده هستند. در قسمت شرقی، البرز در تماس با بخشی از قطعه توران قرار دارد که به آن کپه داغ گفته می‌شود. در قسمت غرب، البرز با فرورفتگی خزر (South Caspian Depression) در تماس است. البرز در قسمت جنوب شرقی به ناحیه ایران مرکزی متصل است. در سمت غرب و شمال غربی، البرز به مجموعه ماگمایی ارومیه — دختر متصل شده است. مجموعه ارومیه — دختر در این قسمت خود از مجموعه‌ای ماگمایی تشکیل یافته است که حاصل فرورانش پوسته اقیانوسی نئوتتیس (Neo-Tethys) طی دوره‌های کرتاسه و ترشیاری می‌باشد. مرز میان این مجموعه ماگمایی با البرز، یک ناحیه مشخص با گسل‌های عمدتاً عمیق و قائم است. مکانیزم کانونی در ناحیه البرز عمدتاً معکوس و امتداد لغز و در قسمت‌های غربی گسل‌های نرمال با دیواره قائم می‌باشد. لرزه‌خیزی بالای نواحی اطراف البرز از مهمترین ویژگی این ناحیه به خصوص در قسمت‌های غربی و مرکزی است [۲۲].



ناحیه ایران مرکزی در طول دورانهای دوم و سوم زمین شناسی به یک منطقه متحرک با کوهزایی بالا تبدیل شده است. در این ناحیه علاوه بر چندین دگرشیبی کاملاً مشخص فعالیت‌های ماگمایی به صورت سنگ‌های آتشفشانی و توده‌های گرانیت نفوذی براحتی دیده می‌شوند. مهمترین ویژگی ایران مرکزی گسل‌های مختلف و چین خوردگی می‌باشد. چین خوردگی اصلی در این ناحیه مربوط به حرکات کوهزایی آلپ است بطوریکه شواهد نشانگر پنج فاز اصلی چین خوردگی آلپ شامل تریاس - لیاس، اوایل کرتاسه، اواسط و اواخر دوران سنوزوئیک در این منطقه است. قسمت شرق ایران مرکزی شامل شرق لوت به یک خط گسلی که در جهت غربی تحدب دارد محدود می‌شود. این ناحیه در منطقه سبزواری- تربت حیدریه خیلی پهن، در نائین به طور قابل ملاحظه‌ای باریک‌تر می‌شود و به طور محلی در سطح زمین در جنوب غربی رشته‌کوه شیرکوه کاملاً باریک شده و عرض آن چند صد متر می‌گردد. مطالعات نشان می‌دهد که اغلب گسل‌های ناحیه ایران مرکزی توسط حرکات اواخر تریاس پدید آمده‌اند. از لحاظ لرزه‌خیزی، این ناحیه در استان کرمان شامل گسل‌های بسیار فعالی می‌باشد که هر ساله زلزله‌های مختلفی را در این منطقه به وجود می‌آورند. همچنین در قسمت شرقی در مناطقی نظیر خراسان و سیستان نیز فعالیت‌های لرزه‌ای فراوانی ثبت شده است. مکانیزم کانونی در این ناحیه اغلب معکوس و امتداد لغز و گاه‌ها نرمال است [۲۲].



شکل ۱: ناحیه‌های تکتونیکی ایران شامل آذربایجان، البرز، مرکزی و زاگرس. سرعت (سانتی متر در سال) و جهت حرکت صفحه عربی به کمک فلش نمایش داده شده است [۲۳].



۳- محاسبه پارامتر b

پارامتر b که در ادبیات فنی با b -value شناخته می‌شود، از ضرایب رابطه فراوانی-بزرگا است که توسط گوتنبرگ و ریشتر در سال ۱۹۴۴ میلادی ارائه شده است [۱۰]. مقدار پارامتر b با برخی مشخصات و پارامترهای فیزیکی رابطه دارد [۱۴]. موگی [۲۴] نشان داد که میزان پارامتر b تابع عمق بوده و با افزایش عمق کاهش می‌یابد. اسکولز [۱۱] بر اساس مطالعات انجام گرفته قبلی یک رابطه بین سطح تنش در یک منطقه و مقدار پارامتر b بدست آورد که بر مبنای آن سطح تنش یک منطقه با مقدار پارامتر b رابطه معکوس داشته و هر چه b کمتر باشد میزان تنش در منطقه بیشتر خواهد بود. برخی تحقیقات نشان می‌دهند که سازوکار کانونی و سطح تنش در یک منطقه مشخص توسط پارامتر b با درصد اطمینان بالایی قابل معرفی است [۱۳]. اگرچه مقدار جهانی پارامتر b واحد در نظر گرفته می‌شود ولی تغییرات محلی پارامتر b رابطه معکوسی با سطح تنش منطقه دارد [۱۲]. علاوه بر آن وقوع زلزله با سطح تنش منطقه رابطه دارد بطوریکه تجمع تنش در یک گسل و رسیدن به مرز لغزش باعث گسیختگی و آزاد شدن امواج زلزله می‌شوند. کاهش مداوم مقدار b در یک منطقه در طول زمان می‌تواند تعبیر به تجمع تنش در گسل شود [۲۵]. تحقیقات مختلفی در زمینه تغییرات زمانی پارامتر b در حین وقوع زلزله‌های بزرگ انجام شده است [۱۶-۱۵-۹]. اکثر این تحقیقات نشان می‌دهند که مقدار پارامتر b چند ماه قبل از وقوع زلزله در منطقه شروع به کاهش کرده است. برای محاسبه پارامتر b روش کمترین مربعات و روش Maximum Likelihood ارائه شده است. روش کمترین مربعات به دلیل تاثیرپذیری از زلزله‌های بزرگ نیازمند تفسیرهای آماری دقیق است ولی روش Maximum Likelihood به دلیل حصول نتایج غیرجانبدارانه و کمتر بودن اثرات زلزله‌های بزرگ بر آن، روش مورد علاقه پژوهشگران برای محاسبه پارامتر b است [۱۷]. با فرض تابع چگالی احتمال برای بزرگای زلزله برابر M به صورت یک تابع نمای با میانگین $\beta/1$:

$$F(\beta) = \beta e^{-\beta(M - M_{\min})}, M > M_{\min} \quad (1)$$

می‌توان برای یک کاتالوگ مقدار $b = \beta \log(e)$ را به کمک روش Maximum Likelihood طبق رابطه (۱) محاسبه کرد [۲۶]:

$$b = \frac{1}{M - M_{\min}} \log e \quad (2)$$

که در این رابطه e مبین عدد نپر بوده و \bar{M} بزرگای متوسط زلزله‌های موجود در کاتالوگ می‌باشد. M_{\min} کمترین بزرگای موجود است. تعیین M_{\min} به توزیع بزرگای زلزله‌ها در ناحیه مرتبط است. در بسیاری از موارد این مقدار توسط رسم نمودار فراوانی تجمعی زلزله‌ها بر حسب بزرگا حاصل می‌شود. پیشنهاد شده است با اعمال اصلاحی به شکل $M_{\min} = M_c - \frac{\Delta M}{2}$ بروی M_c محاسبه کمترین بزرگا صورت گیرد که در آن M_c معرف بزرگایی است که به ازای آن کاتالوگ کامل است [۲۷، ۲۸]. در بیشتر مواقع مقدار ΔM برابر ۰/۱ در نظر گرفته می‌شود. برای بکارگیری رابطه (۱) نیاز است که کاتالوگ لرزه‌ای منطقه کامل باشد تا خطای ناشی از محاسبات حداقل گردد. برای محاسبه میزان خطای محاسبه b می‌توان از رابطه زیر استفاده کرد [۲۹]:

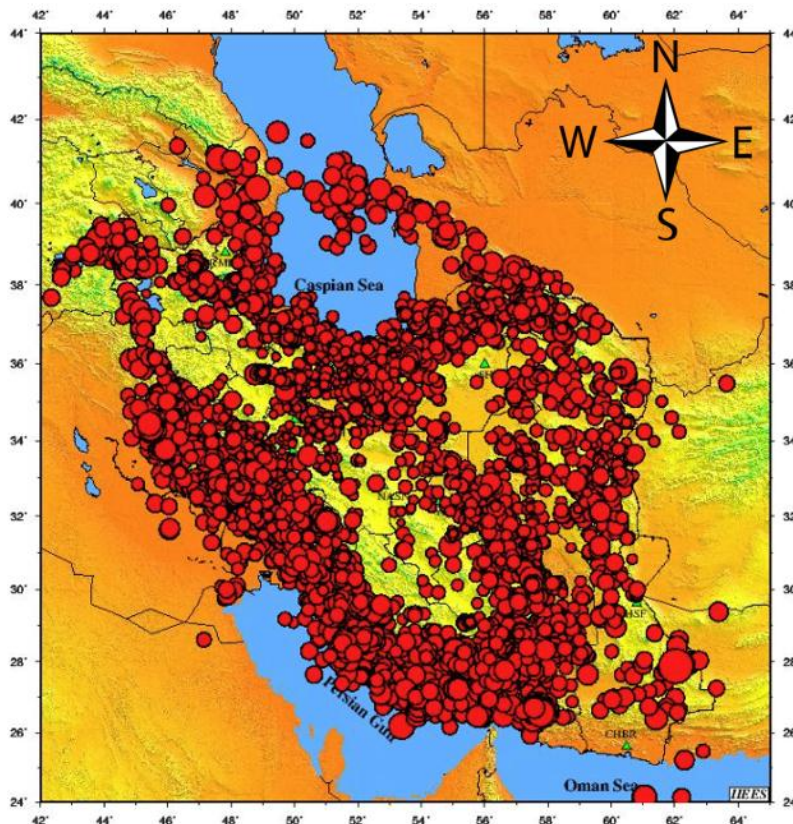


$$\delta b = 2.3b^2 \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (M_i - \bar{M})^2}{n(n-1)}} \quad (3)$$

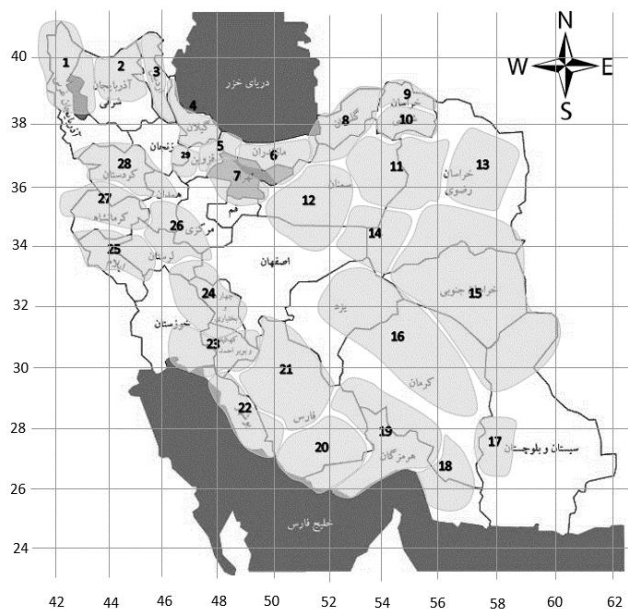
که در این رابطه n تعداد کل زلزله‌های اتفاق افتاده در منطقه، \bar{M} بزرگای متوسط کاتالوگ و M_i بزرگای زلزله نام است. رابطه (۲) میزان قابلیت اطمینان b محاسبه شده را مشخص می‌کند. به کمک رابطه (۱) می‌توان میزان پارامتر b را برای یک منطقه در یک بازه زمانی خاص محاسبه کرد که برای این کار کفایت تا داده‌های ورودی مورد نیاز رابطه (۱) برای یک بازه زمانی خاص فراهم گردد. می‌توان با تعریف پنجره‌های زمانی در بازه‌های زمانی مجاور هم مقدار پارامتر b را محاسبه کرد و در یک نمودار b - زمان ترسیم نمود. توصیه شده است برای محاسبه دقیق‌تر پارامتر b پنجره‌های زمانی با پنجره قبلی خود همپوشانی داشته باشند [۱۴]. با در دسترس بودن یک کاتالوگ کامل و تعریف پنجره‌های زمانی با همپوشانی مناسب می‌توان تغییرات پارامتر b با زمان را برای یک منطقه در یک بازه زمانی مشخص محاسبه کرد.

۴- انتخاب کاتالوگ

پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله [۳۱] به عنوان یکی از متولیان تهیه و ارائه داده‌های لرزه‌ای در ایران از سال ۱۳۶۸ شروع بکار کرده است. این پژوهشگاه با دارا بودن تجهیزات ثبت و رهگیری زلزله‌ها در مناطق مختلف ایران تامین کننده یکی از کامل‌ترین کاتالوگهای لرزه‌ای در کشور است. این سازمان امکانی فراهم ساخته است که می‌توان براحتی و با در دسترس بودن طول و عرض جغرافیایی و مشخصات زلزله مورد نظر از قبیل عمق، بزرگای و زمان وقوع برای یک منطقه در داخل ایران کاتالوگ لرزه‌ای استخراج کرد. بدین منظور برای منطقه ایران که در محدوده ۴۲ الی ۶۴ درجه شرقی-غربی و ۲۴ الی ۴۴ درجه شمالی-جنوبی قرار گرفته است، زلزله‌هایی با بزرگای بیش از ۲ در مقیاس محلی و در بازه زمانی ۱۳۸۸/۱۰/۱۱ تا ۱۳۹۶/۰۷/۰۹ استخراج شد. این کاتالوگ شامل ۱۱۶۲۵ زلزله در عمقهای ۵ الی ۱۰۰ کیلومتری را شامل می‌باشد. شکل (۲) توزیع مکانی زلزله‌های مستخرج از پایگاه داده‌های پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله را نمایش می‌دهد. عمده زلزله‌های بزرگ در مناطق لرزه‌خیز ایران شامل محدوده رشته کوه‌های زاگرس، رشته کوه‌های البرز، خراسان شمالی، کرمان و مناطق جنوبی اتفاق افتاده‌اند. علاوه بر این، زلزله‌های اتفاق افتاده با بزرگای متوسط و کم نیز در این مناطق به وفور دیده می‌شود. این توزیع زلزله موجب می‌شود که بتوان مناطق مختلف را به ناحیه‌های کوچکتر ناحیه‌بندی نمود. این نوع ناحیه‌بندی در روند محاسبات آماری پارامتر b در نواحی مختلف بسیار با اهمیت است. بنابراین در این تحقیق با لحاظ داشت سه پارامتر توزیع کلی زلزله‌ها و توزیع زلزله‌های بزرگ در سطح کشور، مناطق ایران به ۲۹ ناحیه کوچک لرزه‌خیز تقسیم‌بندی شده است. شکل (۳) این تقسیم‌بندی را به نمایش گذاشته است. برخی نواحی که در زیرمجموعه تقسیم‌بندی این شکل قرار نمی‌گیرند از آمار خوب و کاملی از وقوع زلزله‌ها برخوردار نیستند و انجام آنالیزهای آماری بر روی آنها با خطای زیادی مواجه است.



شکل ۲: زلزله های رخ داده در منطقه ایران از تاریخ ۱۳۸۸/۱۰/۱۱ تا ۱۳۹۶/۰۷/۰۹ [۳۱].

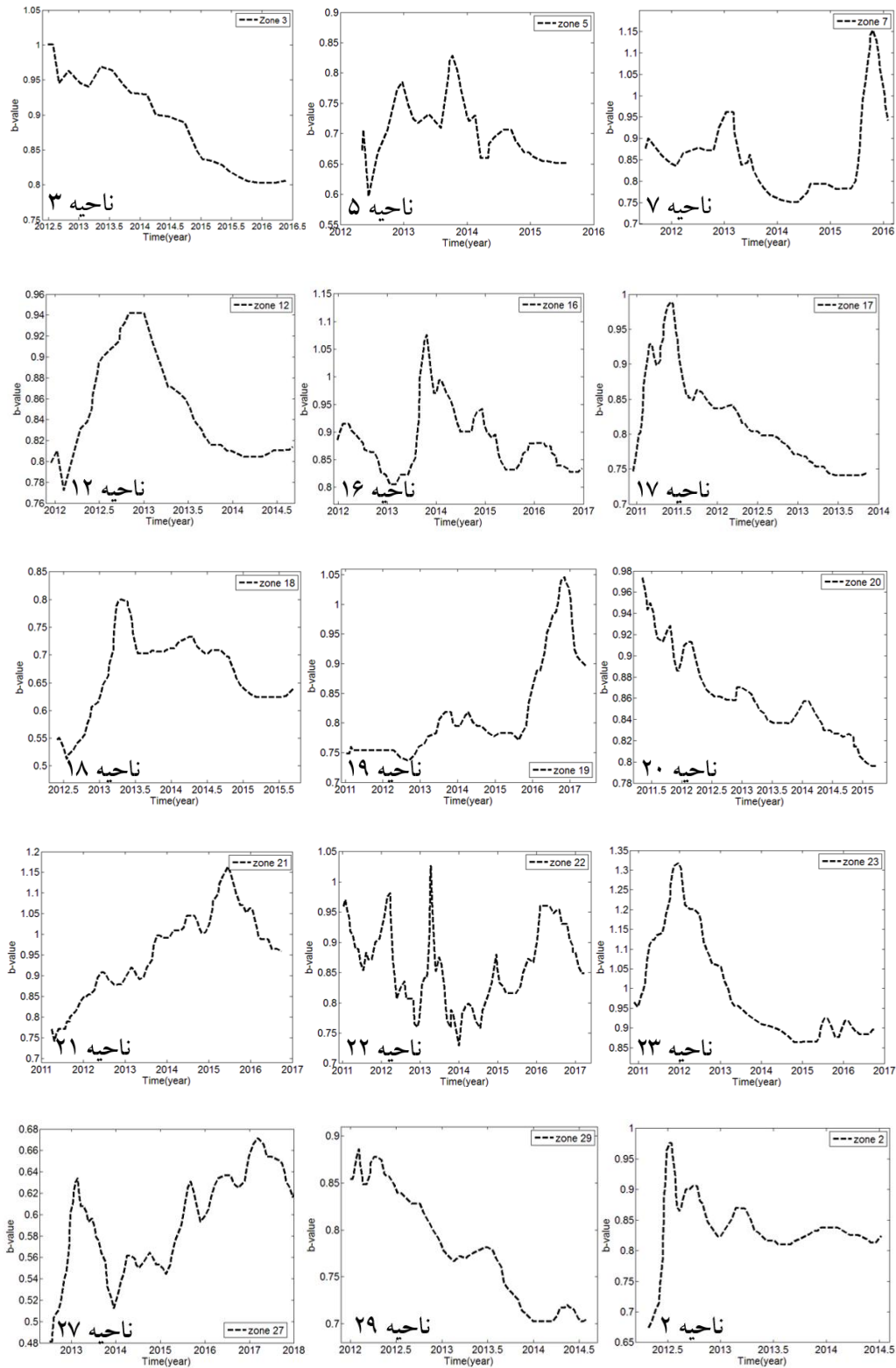


شکل ۳: ناحیه بندی ایران به ۲۹ ناحیه مختلف بر مبنای تعداد زلزله های اتفاق افتاده.

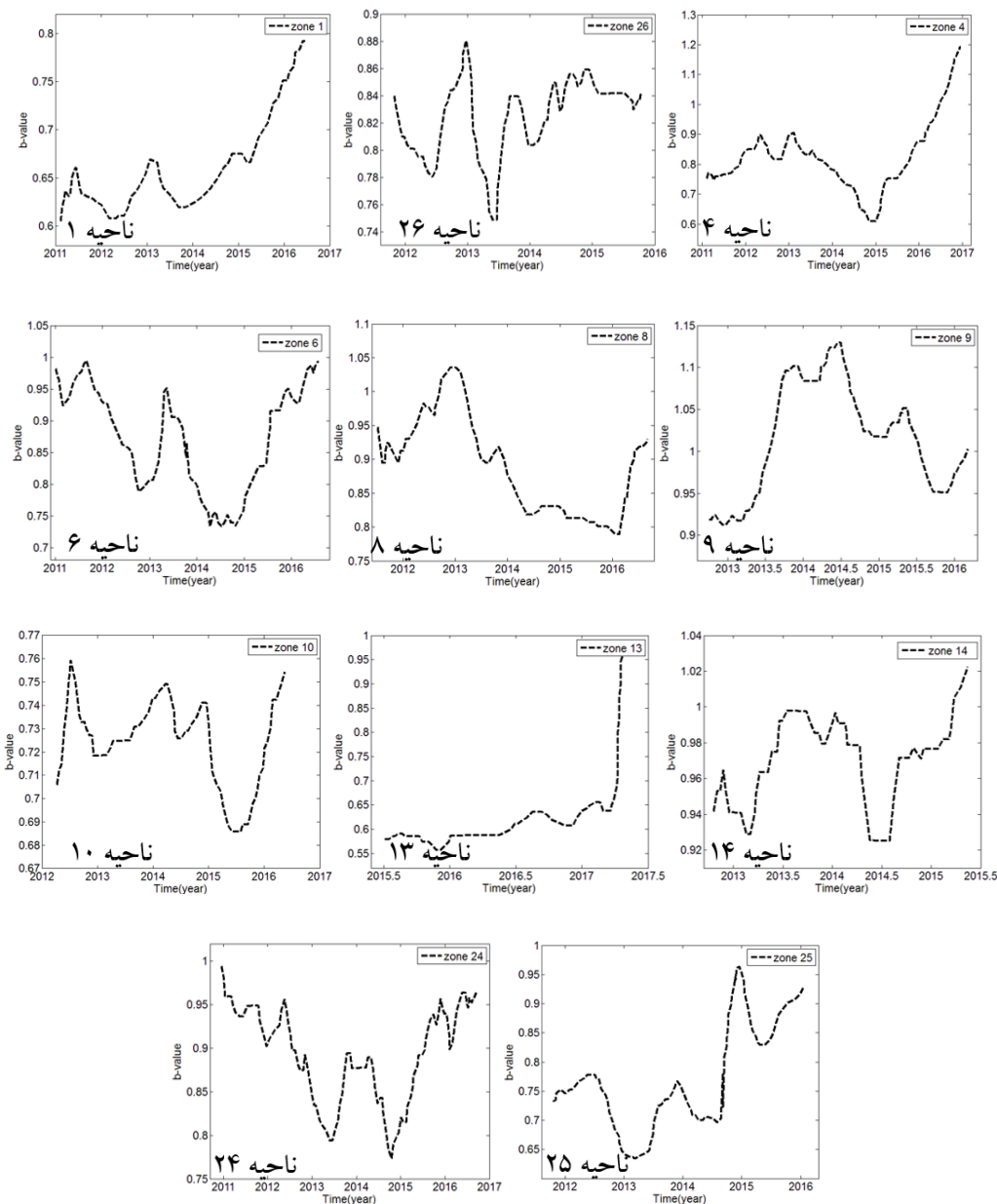


۵- نتایج آنالیز آماری

کلیه آنالیزهای انجام شده در این پژوهش به کمک نرم افزار متن باز Zmap که به صورت رایگان تحت محیط متلب ارائه شده، انجام گرفته است. بر این اساس برای هر ناحیه ابتدا به کمک نرم افزار میزان کامل بودن کاتالوگ و قابلیت اطمینان داده‌ها ارزیابی شده است. بعبارت دیگر می‌توان از رابطه (۲) برای صحت‌سنجی و ارزیابی مقادیر b در هر زمان استفاده کرد. اگرچه تحقیقات مختلف نشان داده است که نمی‌توان برای یک ناحیه خاص مقدار خطای δb را صفر کرد ولی می‌توان با انجام یک ناحیه‌بندی مناسب با تعداد زلزله‌های کافی این خطا را کاهش داد. لذا کاهش خطای δb نیازمند انجام فرآیند آزمایش و خطا می‌باشد تا یک ناحیه‌بندی مناسب جهت انجام محاسبات پارامتر b با کمترین خطا صورت گیرد. پس از فرآیند ناحیه‌بندی و حصول کمترین خطا برای نواحی مذکور پارامتر b بصورت تابعی از زمان طبق رابطه (۱) محاسبه شده است. روند محاسبه پارامتر b بصورت تابعی از زمان نیازمند تعریف گام‌های زمانی یا به اصطلاح پنجره زمانی است. پنجره زمانی شامل دو مشخصه مهم است. اولین مشخصه تعداد زلزله‌های شامل شده در هر پنجره است که بصورت رایج جهت حصول بهترین نتایج ۵۰ عدد انتخاب می‌شود [۱۴]. دومین شاخصه همپوشانی پنجره‌های زمانی است. هر پنجره زمانی باید با پنجره زمانی کناری خود از لحاظ تعداد زلزله همپوشانی داشته باشد. حرکت پنجره زمانی با توجه به تعداد زلزله‌های موجود در هر گام N و پارامتر همپوشانی f بین گام‌های زمانی صورت می‌گیرد. به این معنا که یک تعداد ثابت از زلزله‌ها (N) در کاتالوگ برای یک منطقه انتخاب و سپس پنجره زمانی با همپوشانی (N/f) حرکت داده می‌شود. پارامترهای N و f متغییر هستند و می‌توان با تغییر آنها جواب مطلوب را حاصل کرد. با انتخاب تعداد بالای زلزله‌های در هر پنجره منحنی تغییرات b با نوسانات کمتر و با روند کلی قابل مشاهده خواهد بود و برخی نوسانات بسیار کوتاه مدت حذف می‌شوند. با کاهش بیش از حد تعداد زلزله‌ها در هر پنجره مقدار پارامتر b قابل محاسبه نبوده و محاسبات دچار اختلال می‌شود. در این تحقیق محاسبات پارامتر b با مقداردهی متفاوت به پارامترهای N و f انجام گردیده و نتایج مختلفی حاصل شد. این نتایج صرفاً در نوسانات جزئی و بسیار کوتاه مدت با هم تفاوت داشته ولیکن نتیجه حاصله از همه تکرارهای محاسباتی یک روند کلی مشابه را نشان داد. با ترسیم مقادیر b برحسب زمان تغییرات زمانی پارامتر b برای هر ناحیه بدست آمده است. در اشکال (۴) و (۵) تغییرات زمانی پارامتر b برای نواحی ۲۹ گانه ارائه شده است. شکل ۴ معرف مناطقی است که میزان پارامتر b در محدود ماه هفتم سال ۱۳۹۶ (اواخر سال ۲۰۱۷ میلادی) روند کاهش داشته است. در مقابل در شکل (۵) نواحی دیده می‌شوند که تغییرات پارامتر b افزایشی بوده و یا تقریباً ثابت می‌باشد. تغییرات زمانی b برای نواحی ۱۱، ۱۵ و ۲۸ در اشکال ۴ و ۵ دیده نمی‌شوند که علت این مسئله کامل نبودن کاتالوگ و مناسب نبودن دقت پارامتر b طبق رابطه (۲) پس از محاسبات فراوان برای این نواحی است. همچنین طبق شکل (۲) این نواحی در محدوده‌ای با توزیع زلزله‌های با تعداد کم واقع شده‌اند که این مسئله مانع محاسبه صحیح پارامتر b برای این نواحی می‌باشد.



شکل ۴: نواحی از ایران که در آنها پارامتر b تا اواسط سال ۱۳۹۶ روند کاهشی داشته است.



شکل ۵: نواحی از ایران که پارامتر b تا اواسط سال ۱۳۹۶ در آنها ثابت بوده یا افزایش یافته است.

۶- بحث در نتایج

کشور ایران با فرارگیری در مسیر کمربند زلزله آلپ-همیالیا از یک سطح لرزه خیزی فعال و بالا برخوردار بوده و مناطق مختلف آن دائماً در معرض هجوم زمین لرزه‌های کوچک و بزرگ بوده است. بزرگی و کوچکی زلزله‌ها در یک منطقه و سهم آنها از کل لرزه‌خیزی منطقه بیانگر سطح تنش در منطقه می‌باشد. از سوی دیگر رابطه معکوس مقادیر پارامتر b رابطه گوتنبرگ-ریشتر با سطح تنش و در یک منطقه می‌تواند احتمال وقوع زلزله‌های با بزرگای بالا و پایین در یک منطقه را ارائه دهد. رخداد‌های لرزه‌ای اخیر در مناطق مختلف ایران نشان می‌دهد صفحه ایران تحت تنش بوده و می‌توان بررسی‌هایی بر روی این مسئله انجام داد. در این راستا با استفاده از داده‌های کاتالوگ پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله و تهیه نقشه لرزه‌خیزی کل کشور ایران، ناحیه مورد

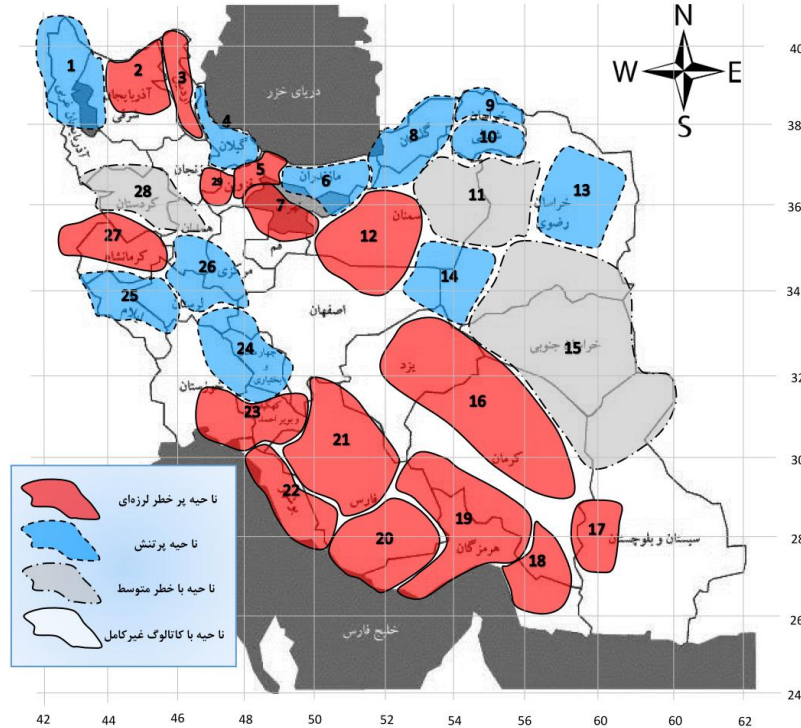


مطالعه به مناطقی تقسیم‌بندی شد و در هر منطقه مقادیر وابسته به زمان پارامتر b محاسبه گردید (اشکال ۴ و ۵). ملاحظه می‌شود که اکثر مناطق لرزه‌خیز ایران در معرض هجوم تنش بوده و کاهش پارامتر b در آنها بخوبی مشهود است. مطابق نتایج بدست آمده مناطقی چون شمال استان آذربایجان شرقی (ناحیه ۲)، استان اردبیل (ناحیه ۳)، قسمتهای شرق و جنوبی استان گیلان (ناحیه ۳)، برخی قسمتهای استان قزوین (ناحیه ۵)، استان تهران (ناحیه ۷)، قسمت جنوب شرقی استان زنجان (ناحیه ۲۹)، مناطق غربی و جنوب غربی استان سمنان (ناحیه ۱۲)، استان کرمانشاه (ناحیه ۲۷)، استان کرمان (ناحیه ۱۶)، قسمتهای شرقی و مرکزی استان یزد (ناحیه ۱۶)، قسمت غربی استان سیستان (ناحیه ۱۷)، استان بوشهر (ناحیه ۲۲)، استان فارس (ناحیه ۲۱)، قسمت جنوب شرقی استان خوزستان (ناحیه ۲۳)، قسمتهای جنوبی و مرکزی استان کهگیلویه و بویراحمد (ناحیه ۲۳) بیشترین تجمع تنش را تجربه کرده‌اند. در مقابل، مناطق شمالی آذربایجان غربی (ناحیه ۱)، قسمتهای شمالی استان گیلان (ناحیه ۴)، استان مازندران و گلستان (نواحی ۶ و ۸)، خراسان شمالی (نواحی ۹ و ۱۰)، قسمتهای شرقی و جنوب شرقی استان خراسان رضوی (ناحیه ۱۳) و استانهای ایلام (ناحیه ۲۵) و چهارمحال و بختیاری (ناحیه ۲۴) تجمع تنشی در حد متوسط دارند. با استفاده از نتایج حاصله یک نقشه خطر زلزله بر مبنای مقادیر وابسته به زمان پارامتر b تهیه گردیده است (شکل ۶). مطابق این شکل اکثر مناطقی که در راستای گسل‌های زاگرس و البرز قرار دارند جزء مناطق پر خطر لرزه‌ای تقسیم بندی شده‌اند. در برخی مناطق نظیر قسمتهای شرقی و مرکزی استان سمنان و خراسان جنوبی و قسمتهای شمالی استان سمنان کم بودن تعداد زلزله‌ها در کاتالوگ، محاسبه تغییرات زمانی b با خطا روبرو است. بر اساس شکل (۶) قسمتهای جنوبی و مرکزی ایران به خصوص استان کرمان و استانهای جنوبی تحت خطر بالای وقوع زلزله هستند و احتمال وقوع زلزله با توجه به کاهش پارامتر b و افزایش تنش برای این مناطق وجود دارد. در مناطق غربی نظیر استان کرمانشاه (ناحیه ۲۷) افزایش تنش و کاهش مقدار پارامتر b به خوبی مشهود است و باید هر لحظه منتظر زلزله در این ناحیه بود و با توجه به زلزله بزرگ و پس‌لرزه‌های اتفاق افتاده پس از تاریخ کاتالوگ بکار رفته در این تحقیق صحت این مدعا را نشان می‌دهد. مناطق آبی رنگ نشان داده شده در شکل (۶) نشان دهنده مناطقی با خطر لرزه‌ای کمتر نسبت به سایر مناطق هستند که این به معنای وجود خطر لرزه‌ای در مناطق مذکور بوده ولی با توجه به مقادیر رو به افزایش پارامتر b در این نواحی و کاهش تنش این مناطق نسبت به مناطق قرمز رنگ انتظار می‌رود از خطر لرزه‌ای پایین‌تری برخوردار باشند. در برخی مناطق با وجود اینکه مقادیر پارامتر b نسبت به زمان در حال افزایش است ولی این افزایش در بالاترین مقدار خود مقادیر پایینی را نشان می‌دهد. برای مثال نواحی ۱، ۲۶، ۸ و ۱۰ جزو مناطقی هستند که علاوه بر روند افزایشی، مقدار پارامتر b کم می‌باشد. کم بودن پارامتر b مرتبط با سطح تنش بالا و مکانیزم گسلس معکوس است و نشان می‌دهد که در این نواحی سطح تنش بالا بوده و اکثر مکانیزم کانونی در این مناطق معکوس و امتداد لغز است که با مطالعات پیشین مطابقت دارد [۳۰].

زلزله‌های اتفاق افتاده با بزرگای بیشتر از ۴ در مقیاس محلی در بازه زمانی ۱۳۹۶/۰۷/۱۰ الی ۱۳۹۷/۰۷/۱۰ به عنوان شاهدهی جهت بررسی لرزه‌خیزی نواحی مختلف ایران، در شکل (۷) ارائه شده است. علاوه بر این مهمترین زلزله‌های اتفاق افتاده در این بازه زمانی در جدول (۱) ارائه شده است. همانطور که در شکل (۷) بخوبی مشخص است نواحی ۱۶ الی ۲۳ که طبق روش ارائه شده جزو نواحی پر خطر لرزه‌ای دسته‌بندی شدند، در طی زمان مذکور حداقل یک زلزله با بزرگای بیش از ۴ را تجربه کرده‌اند. علاوه بر این، نواحی ۲، ۳، ۷، ۱۲ و ۲۹ نیز جزء نواحی وقوع زلزله‌های با بزرگای بیش از ۴ بوده است. همچنین در ناحیه ۱ و ۱۳ که در این روش در گروه نواحی پر تنش دسته‌بندی شده‌اند و مقدار پارامتر b برای آنها با وجود روند افزایشی همواره کم بوده است نیز در طی این زمان زلزله‌هایی اتفاق افتاده است. این امر مرتبط با مقدار پایین پارامتر b در این نواحی بوده که با سطح تنش منطقه نیز در ارتباط است. کم بودن پارامتر b نشان دهنده ناحیه پر فشار تکتونیکی است. در جدول (۱) زلزله‌های بزرگ اتفاق افتاده در نواحی



مختلف ایران ارائه شده است. طبق این جدول مناطق ۱۶، ۲۷ و ۲۲ که در دسته بندی انجام شده در مناطق پرخطر لرزه‌ای قرار گرفته‌اند در طی این زمان حداقل یک زلزله بزرگ را تجربه کرده‌اند.

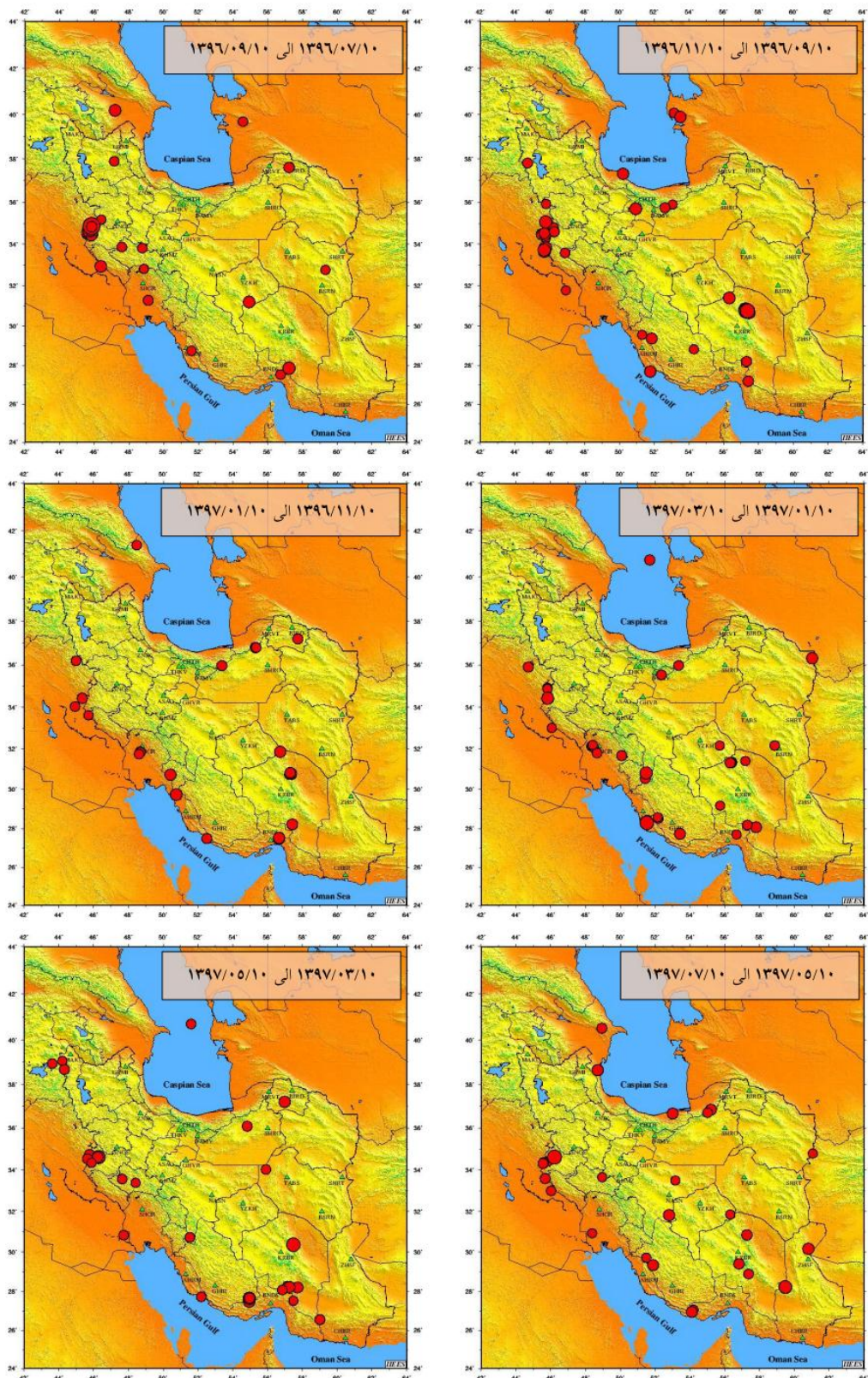


شکل ۶: نقشه خطر لرزه‌ای برای ۲۹ ناحیه مختلف ایران. در مناطق خاکستری به دلیل توزیع پراکنده

داده ها نسبت به وسعت منطقه دقت محاسبه پارامتر **b** مطلوب نبوده است. در مناطق سفید رنگ به دلیل عدم وجود دو شرط لرزه‌خیزی بالا و دقت مناسب پارامتر **b** این مناطق جزو ناحیه بندی نمی‌باشند.

جدول ۱: لیست زلزله‌های بزرگ بوقوع پیوسته جهت صحت سنجی نقشه شکل (۶) که تاریخ وقوع آنها بعد از تاریخ آخرین زلزله بکار رفته در کاتالوگ می‌باشد.

تاریخ وقوع زلزله	طول جغرافیایی رومرکزی	عرض جغرافیایی رومرکزی	بزرگا(محلی)	ناحیه در شکل (۶)
۱۳۹۶/۰۹/۲۱	۵۷/۲۹	۳۰/۷۴	۶/۲	۱۶
۱۳۹۶/۰۹/۱۰	۵۷/۳۶	۳۰/۷۵	۶/۰	۱۶
۱۳۹۷/۰۶/۰۳	۴۶/۲۱	۳۴/۶۲	۶/۰	۲۷
۱۳۹۶/۰۹/۲۱	۵۷/۲۶	۳۰/۸۰	۵/۹	۱۶
۱۳۹۷/۰۱/۳۰	۵۱/۵۲	۲۸/۲۸	۵/۸	۲۲
۱۳۹۷/۰۴/۳۱	۵۷/۴۸	۳۰/۳۵	۵/۸	۱۶
۱۳۹۷/۰۴/۳۱	۴۶/۲۹	۳۴/۶۲	۵/۶	۲۷
۱۳۹۶/۰۹/۱۰	۵۷/۳۹	۳۰/۷۵	۵/۵	۱۶



شکل ۷: زلزله‌های اتفاق افتاده با بزرگای محلی بیش از ۴ از تاریخ ۱۳۹۶/۰۷/۱۰ الی ۱۳۹۷/۰۷/۱۰ در مناطق مختلف ایران.



۷- نتیجه گیری

در این مقاله به بررسی تغییرات پارامتر b با زمان و ارتباط آن با سطح لرزه خیزی نواحی مختلف ایران پرداخته شد. طبق تحقیقات گذشته، بین تغییرات پارامتر b و سطح تنش و لرزه خیزی یک ناحیه رابطه وجود دارد. کشور لرزه خیز ایران که در ناحیه پرفشار تکتونیکی قرار گرفته است با وجود زلزله‌های بسیار زیاد در بزرگا و شدتهای مختلف این امکان را فراهم می کند که بتوان با محاسبات آماری ارتباط پارامتر b با لرزه خیزی را بررسی نمود. لذا در این مقاله با محاسبه تغییرات پارامتر b با زمان برای نواحی مختلف ایران این کمیت آماری جهت پیش‌بینی سطح تنش یک ناحیه که خود با سطح لرزه‌خیزی مرتبط است مورد بررسی قرار گرفت. در حقیقت این پژوهش پارامتر b را به عنوان یک پیش‌نشانگر زلزله‌های آینده در نظر گرفته و با استفاده از تغییرات آن احتمال وقوع زلزله در نواحی مختلف ایران را بیان می‌دارد. در این راستا یک نقشه پهنه‌بندی لرزه‌ای که ایران را به ۲۹ ناحیه لرزه خیز و پر تنش تقسیم می‌کند ارائه گشته و نواحی پر خطر لرزه‌ای به عنوان نواحی مستعد وقوع زلزله‌های آینده با توجه به وجود روند کاهشی پارامتر b در آنها معرفی شده‌اند.

۸- مراجع

- 1- Li, M., Wei, Z., 1983, **Gravity variation before and after Tangshan earthquake**, Tectonophysics, 97, 158.
- 2- Eftaxias, K., Kapiris, P., Dologlou, E., Kopanas, J., Bogris, N., Antonopoulos, G., Peratzakis, A., Hadjicontis, V., 2002, **EM anomalies before the Kozani earthquake: A study of their behavior through laboratory experiment**, Geophysics Research Letter, 29(8), 10.1029/2001GL013786.
- 3- Arabelos, D., Asteriadis, G., Contadakis, M., Zioutas, G., Xu, D., Zhang, C., Zheng, B., 2001, **The use of an outlier detecting method in time series of continuous daily measurements of underground water level and temperature in earthquake prediction investigation**, Tectonophysics, 338, 315-323.
- 4- Kopylova, G.N., Boldina, S.V., Smirnov, A.A., Chubarova, E.G., 2017, **Experience in registration of variations caused by strong earthquakes in the level and physicochemical parameters of ground waters in the piezometric wells: the case of Kamchatka**, Seismic Instruments. 53(4), 286-295.
- 5- Contadakis, M. E., Asteriadis, G., 2001, **Recent results of the research for preseismic phenomena on the underground water and temperature in Pieria, northern Greece**, Natural Hazards and Earth System Science, 1, 165-170.
- 6- Lu, J., Qian, F., Zhao, Y., 1999, **Sensitivity analysis of the Schlumberger monitoring array: application to changes of resistivity prior to the 1976 earthquake in Tangshan, China**, Tectonophysics, 307, 397-405.
- 7- Zhao, Y., Qian, F., 1994, **Geoelectric precursors to strong earthquakes in China**, Tectonophysics, 233(1-2), 99-113.
- 8- Asim, K.M., Martinez-Alvarez, F., Basit, A., Iqbal, T., 2017, **Earthquake magnitude prediction in Hindukush region using machine learning techniques**, Natural Hazards, 85, 471-486.



- 9- Sammonds, P.R., Meredith, P.G., Main, I. G., 1992, **Role of pore fluid in the generation of seismic precursors to shear fracture**, Nature, 359, 228-230.
- 10- Gutenberg, B., Richter, C.F., 1944, **Frequency of earthquake in California**, Bulletin of Seismology Society of America, 34(4), 185 – 188.
- 11- Scholz, C. H., 1968, **the frequency-magnitude relation of micro-fracturing in rock and its relation to earthquakes**, Bulletin of Seismology Society of America, 58, 399-415.
- 12- Bufe, C. G., 1970, **Frequency-magnitude variations during the 1970 Danville earthquake swarm**, Earthquake Notes, 41, 3-6.
- 13- Schorlemmer, D., Wiemer, S., Wyss, M., 2005, **Variations in earthquake-size distribution across different stress regimes**, Nature international journal of science, 437, 539-542.
- 14- Nuannin, P., Kulhanek, Ota., Persson, Leif., 2005, **Spatial and temporal b-value anomalies preceding the devastating off coast of NW Sumatra earthquake of December 26-2004**, Geophysics Researches Letter, 32, L11307.
- 15- Molchan. G. M., Dmitriev, O., 1990, **Dynamics of magnitude-frequency relation of foreshocks**, Physics Earth Planet International, 61, 99-112.
- 16- Monterroso, D., 2003, **Statistical seismology studies in Central America: b-value, seismic hazard and seismic quiescence**, Compr. Summaries Uppsala Diss. Fac. Sci. Technol. 897, 27 pp., Acta Univ. Upsaliensis, Uppsala, Sweden.
- 17- Wiemer, S., Wyss, M., 1997, **Mapping the frequency-magnitude distribution in asperities: An improved technique to calculate recurrence times**, Journal of Geophysics Research, 102, 15,115-15,128.
- 18- Jackson, J., McKenzie D., 1984, **Active tectonics of the Alpine–Himalayan Belt between western Turkey and Pakistan**, Geophysical Journal International, Vol 77(1):pp 185-264.
- 19- Berberian, M., 1986, **Seismotectonics and earthquake-fault hazard study of the Karkheh Dams and River Project, Jahad-e-Sazandegi**, International Report, Tehran, 180p. (In Persian).
- 20- James, G. A., and Wynd, J. G., 1965, **Stratigraphic Nomenclature of Iranian Oil Consortium Agreement Area**, AAPG Bulletin, 49, 2182-2245.
- 21- Koop, W. and Stoneley, R., 1982, **Subsidence History of the Middle East Zagros Basin, Permian to Recent**, Philosophical Transactions of the Royal Society A, A305, 149-168.
- 22- Berberian, M., 2005, **The 2003 Bam urban earthquake: A predictable seismotectonic pattern along the western margin of the rigid Lut block southeast Iran**, Earthquake Spectra, 21(S1), 35-99.
- 23- Mouthereau, F., Tensi, J., Bellahsen, N., Lacombe, O., De Boisgrollier, T., Kargar, S., 2007b, **Tertiary sequence of deformation in a thin-skinned/thick-skinned collision belt: The Zagros Folded Belt (Fars, Iran)**, Tectonics. 26, 1-28.
- 24- Mogi, K., 1967, **Regional variation in magnitude-frequency relation of earthquake**, Bulletin of Earthquake Research, 45, 313-325.



- 25- Kanamori, H., 1981, **The nature of seismic patterns before large earthquakes. In Earthquake Prediction: An International Review (Maurice Ewing Series), Vol.4, AGU, Washington D.C., 1-19.**
- 26- Aki, K., 1965, **Maximum likelihood estimate of b in the formula $\log N = a - bM$ and its confidence limits**, Bulletin Earthquake Research, 43, 237-239.
- 27- Wossener, J., Wiemer, S., 2005, **Assesing the quality of earthquake catalogues: estimating the magnitude of completeness and its uncertainty**, Bulletin of Seismology Society of America, 95(2), 684-698.
- 28- Nava, F. A., Marquez-Ramirez, V. H., Zuniga F. R., Avila-Barrientos, L., Quinteros C.B., 2017, **Gutenberg-Richter b-value maximum likelihood estimation and sample size**, Journal of Seismology. 21, 127-135.
- 29- Shi, Y., Bolt, B. A., 1982, **The standard error of the magnitude-frequency b-value**, Bulletin of Seismology Society of America, 72, 1677-1687.
- 30- Jafari, M. A., 2008, **The distribution of b-value in different seismic provinces of Iran**, The 14th world conference on earthquake engineering, Beijing. China.
- 31- Earthquake Catalog, 2010, IIEES, Retrieved from <http://www.iiees.ac.ir/fa/recentevents>.