

## کاربرد نظریه بیزین در زلزله‌شناسی، مطالعه موردی: شمال و شمال غرب ایران

مهدی ملکی<sup>۱</sup> و زهره سادات ریاضی راد<sup>۲\*</sup>

<sup>۱</sup> دانشجوی دکتری، گروه مهندسی نفت، معدن و ژئوفیزیک دانشکده مهندسی عمران و منابع زمین دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران مرکزی، تهران، ایران  
<sup>۲</sup> استادیار گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم پایه دانشگاه آزاد اسلامی واحد چالوس، چالوس، ایران

(دریافت: ۱۴۰۰/۱۲/۲۱، پذیرش: ۱۴۰۱/۰۳/۱۷)

### چکیده

بیزین روشی برای دسته‌بندی پدیده‌ها بر پایه احتمال وقوع یا عدم وقوع یک پدیده است و در نظریه احتمالات بااهمیت و پرکاربرد است. اگر برای فضای نمونه مفروض بتوان افزایش مناسبی انتخاب کرد، با دانستن اینکه کدام یک از پیشامدهای افزایش‌شده رخ داده است، بخش مهمی از عدم قطعیت تقلیل می‌یابد. ارزیابی خطر لرزه‌ای احتمالاتی یکی از روش‌های مهم در پیش‌بینی زمین‌لرزه است. هدف از این تحقیق، روش مدل‌سازی مبتنی بر ساختار سلسله مراتب زمین‌لرزه‌های به‌وقوع‌پیوسته در ایالت لرزه‌زمین‌ساخت البرز-آذربایجان واقع در شمال ایران است. مبنای کار بر اساس داده‌های طبیعی است که با استفاده از آمار بیزین انجام می‌شود. این آمار ابزاری قدرتمند در مدل‌سازی هم‌زمان عدم قطعیت و تصادف است. بیزین روشی مبتنی بر کاتالوگ زمین‌لرزه و انتخاب یک رابطه تضعیف (کاهندگی) مناسب در ساختگاه مورد نظر است. این روش به‌درستی می‌تواند مقادیر بیشینه شتاب جنبش زمین را به همراه چندک‌های تابع توزیع آن در منطقه نشان دهد. این مطالعه، بر اساس ۱۱ ایستگاه شبکه لرزه‌نگاری کشوری واقع در شمال و شمال غرب ایران انجام گرفت. نقشه‌های خطر برای بیشینه شتاب در فاصله زمانی ۵۰ و ۴۷۵ سال آینده رسم شده است. این نقشه‌ها مشخص می‌کند که اطلاعات زمین‌لرزه‌های تاریخی در نظریه بیزین بهتر از سایر روش‌های احتمالاتی، عدم قطعیت‌ها و نبود لرزه‌ای را پوشش می‌دهد. در این مطالعه همبستگی بین روش بیزین و داده‌های مشاهده شده  $\alpha=9.5\%$  محاسبه شد.

**واژه‌های کلیدی:** نظریه بیزین، روش احتمالاتی، عدم قطعیت، ایالت لرزه‌زمین‌ساخت البرز-آذربایجان، شمال ایران، بیشینه شتاب زمین

## ۱ مقدمه

روش بیزین روشی پرکاربرد و مناسب است که با داشتن مزیت‌هایی چون در نظر گرفتن روابط بین متغیرها و شرایط عدم قطعیت، از مدل‌های انعطاف‌پذیر با توانایی بالا، برای تحلیل خطر لرزه‌ای محسوب می‌شود؛ بنابراین جهت طراحی‌های مقاوم سازی در برابر زلزله می‌توان با استفاده از داده‌های لرزه‌ای موجود در منطقه مورد مطالعه و با استفاده از این روش آماری، مدل‌سازی هم‌زمان عدم قطعیت و تصادف را انجام داد که برخلاف روش‌های آمار کلاسیک، در تمامی محاسبات آماری و احتمالاتی می‌تواند توانایی اطمینان به نتایج را افزایش دهد.

پیسارنکو و لیوبوشن (۱۹۹۹) کاربرد روش بیزین در محاسبه خطر لرزه‌ای و تعیین حداکثر شتاب را معرفی نمودند. تاسپوناس و همکاران (۲۰۰۱) روش بیزین در تخمین پارامترهای لرزه‌ای را برای مناطقی از کمربند لرزه‌ای اقیانوس آرام به‌کاربردند. در این تحقیق اشاره شد که بیزین توانایی مدل‌سازی مسائل مربوط به خطر لرزه‌ای را دارد. تاسپوناس و همکاران (۲۰۰۲) با استفاده از داده‌های لرزه‌ای محلی ژاپن در قالب یک ساختار شبکه بیزین، تخمین احتمالاتی زمین لرزه را برای یک دوره ۵۰ ساله، انجام دادند. لیوبوشین و همکاران (۲۰۰۲) خطر لرزه‌ای را در منطقه یونان تخمین زدند. در آن تحقیق با استفاده از روش بیزین آماری پیشینه شتاب زمین در منطقه محاسبه شد و نتایج درخور توجهی به‌دست آمد. همچنین لیوبوشین و پاروز (۲۰۱۰) با استفاده از مدل‌سازی آماری بیزین، خطر لرزه‌ای و جنبش زمین را در کشور هندوستان مطالعه نمودند و بررسی و توسعه مدل‌های شبکه‌ای در ارزیابی خطر را انجام دادند. بر اساس این مطالعه، تصمیم‌سازی بر پایه احتمال وقوع خطر و شدت اثر آن به‌خوبی انجام میشود. روش بیزین می‌تواند با روش کیکو (۲۰۱۱) مقایسه و ارزیابی شود. برنامه پیشنهادی در کیکو (۲۰۱۱) می‌تواند بزرگای زمین‌لرزه را با استفاده از روش‌های حداکثر آماری

تخمین بزند. یادآو و همکاران (۲۰۱۳ الف) تخمین خطر لرزه‌ای در شمال غرب ایران و هیمالیا محاسبه نمودند. همچنین در سال (۲۰۱۳ ب) کاربرد بیزین را برای خطر سونامی مورد بررسی قرار دادند. یزدانی و کوثری (۲۰۱۳)، (۲۰۱۵) خطر لرزه‌ای را در تهران و شمال غرب ایران، براساس رهیافت بیزین مطالعه کردند و بیشترین مقدار شتاب (PGA) را در شهر تهران به‌دست‌آوردند. محمدی و بایراک (۲۰۱۵) پارامترهای خطر لرزه‌ای برای فلات ایران را بر اساس گمپل III، محاسبه نمودند که این پارامترهای محاسبه شده را میتوان در روش بیزین نیز استفاده نمود. موسوی بفرولی و همکاران (۱۳۹۳) تحلیل خطر لرزه‌ای را در کل ایران، به روش احتمالاتی اصلاح‌شده انجام دادند و نقشه کلی از PGA برای ایران ارائه کردند. بیشترین شتاب در آن پژوهش به منطقه بندرعباس نسبت داده شد. اومی و همکاران (۲۰۱۶) تخمین بیزین را برای فلات ایران بر اساس پارامترهای قانون اوموری انجام دادند. در این تحقیق توانایی پیش‌بینی تغییرات خطر لرزه‌ای به دلیل وجود گسل‌های فعال متعدد در محیط محاسبه میگردد. این تحقیق روش بیزین را به‌عنوان ابزاری در مدل‌سازی پیشنهاد می‌کند که توانایی ارزیابی خطرپذیری پیش‌بینی‌شده را با در نظر گرفتن روابط بین متغیرها و کاهش عدم قطعیت‌ها دارد. محمدی و همکاران (۲۰۱۶) جنبش زمین را با تکیه بر کاربرد بیزین در پنج نقطه در کل ایران محاسبه کردند و نشان دادند که یکی از مزیت‌های آمار بیزین نسبت به کلاسیک این است که در روش احتمالاتی مرسوم، مقداری ثابت برای PGA در دوره بازگشت‌های مختلف ارائه می‌شود، اما در روش بیزین مقادیر PGA به‌صورت توزیعی در فواصل آینده مختلف بیان می‌شود. سلحشور و همکاران (۲۰۱۸، ۱۳۹۶) با استفاده از رهیافت بیزین پارامترهای خطر زلزله را در ایران محاسبه کردند و نتیجه گرفتند همبستگی خوبی (۹۴٪) بین روش بیزین و داده‌های مشاهده‌شده از شبکه شتاب‌نگاری مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی

همراه با عدم قطعیت، در زمینه‌های مختلف به کار گرفته می‌شود (علیزاده نوقایی و همکاران، ۱۳۹۷). علاوه بر این در اغلب آنها فرض بر این است که معیارها از یکدیگر مستقل هستند، در حالی که در مسائل تصمیم‌سازی در دنیای واقعی، معیارهای تصمیم‌گیری در روابط متقابل آنها اغلب به صورت پیچیده با یکدیگر در ارتباطند و داده‌های موجود، عدم قطعیت زیادی دارند.

در این مطالعه، تحلیل خطر لرزه‌ای برای منطقه شمال و شمال غرب ایران انجام شد. ابتدا با توجه به ایستگاه‌های لرزه‌ای منتخب موجود در منطقه، از داده‌های به‌روزشده تا سال ۲۰۱۵ برگرفته از موسوی بفروئی و همکاران (۱۳۹۳) استفاده شد. بقیه داده‌ها تا سال ۲۰۲۰ به‌روز شدند و کاتالوگ جدید ارائه شد. سپس با استفاده از روش لیوبوشین و همکاران (۲۰۰۲)، مقادیر بیشینه شتاب زمین (PGA) به همراه چندک‌های تابع توزیع در ایالت لرزه‌زمین ساخت البرز- آذربایجان محاسبه شد.

## ۲ قضیه بیزین

قضیه بیزین از آن جهت مفید است که می‌توان به کمک آن، احتمال یک پیشامد را با مشروط کردن، نسبت به وقوع یا عدم وقوع یک پیشامد دیگر تخمین زد (دگروت و اسکرویش، ۲۰۱۲). در بسیاری از حالت‌ها، محاسبه احتمال یک پیشامد به صورت مستقیم، کاری دشوار است. با استفاده از این قضیه و مشروط کردن پیشامد مورد نظر نسبت به پیشامد دیگر، می‌توان احتمال مدنظر را محاسبه کرد (الدین و الدرنلی، ۲۰۰۴). برای نگرش بیزی به یادگیری ماشین (یا هر فرایند دیگر) نخست باید دانش موجود درباره موضوع به صورت احتمالاتی فرمول‌بندی گردد (وایتو و پنک، ۲۰۰۴). برای این کار باید مقادیر کیفی دانش را به صورت توزیع احتمال، فرضیات استقلال و غیره مدل کرد. این مدل پارامترهای ناشناخته‌ای خواهد داشت که برای هر یک از مقادیر ناشناخته، توزیع احتمال اولیه‌ای

(<https://www.bhrc.ac.ir>, accessed October 2020)

وجود دارد. کوثری و همکاران (۲۰۱۹، ۲۰۲۰) تحلیل خطر لرزه‌ای را در ایران بر اساس داده‌های لرزه‌ای موجود در ایران بر اساس روش کیکو و همکاران (۲۰۱۶) انجام دادند. محمدیان (۲۰۲۰) تحلیل و آنالیز احتمال خطر لرزه‌ای را در بندر سیراف با استفاده از کاربرد بیزین انجام داد. نس و همکاران (۲۰۲۰) به بررسی خطر زمین‌لرزه به روش احتمالاتی با استفاده از روش بیزین پرداختند. در این مطالعه از زمین‌لرزه‌های ثبت‌شده در منطقه ترکیه استفاده شد. در این تحقیق PGA برای دوره بازگشت ۴۷۵ سال تخمین زده شد و نقشه پهنه‌بندی شتاب ترکیه رسم شد.

یکی از مزایای واقعی رویکردهای بیزین این است که فرضی اولیه، برای کاربران فراهم می‌کند تا عدم قطعیت هر پارامتر مورد استفاده را در روابط احتمالاتی و همچنین دانش پیش‌بینی در نظر بگیرند (کمپل، ۱۹۸۲، ۱۹۸۳). در تحلیل خطر لرزه‌ای، روش آماری بیزین به دو دلیل اهمیت دارد: الف) در این روش، اطلاعات تاریخی لرزه‌خیزی و زمین‌شناسی منطقه به‌طور دقیق محاسبه می‌شود. ب) از این روش می‌توان برای ترکیب عدم قطعیت آماری مرتبط با پارامترهای لرزه‌خیزی استفاده کرد (گالانیس و همکاران، ۲۰۰۲). البته عدم قطعیت می‌تواند به عدم قطعیت ذاتی وقوع زمین‌لرزه نیز بستگی داشته باشد (بومر، ۲۰۱۲).

تاکنون مطالعات گسترده‌ای در راستای ارزیابی خطر لرزه‌ای صورت پذیرفته است؛ روش بیزین یکی از روش‌های مناسب در فرایند ارزیابی خطر لرزه‌ای و محاسبه بیشینه شتاب (PGA) است. هدف مهم در استفاده از این روش در سطوح بالای تلفیق داده، درک عناصر محیط، شناخت موقعیت فعلی و پیش‌بینی وضعیت در آینده‌ای نزدیک است. از طرفی، وجود مسئله عدم قطعیت در این سطوح اجتناب‌ناپذیر است؛ بنابراین نیاز است که سامانه‌های تلفیق داده به روش‌هایی برای مدیریت عدم قطعیت مجهز باشند. روش بیزین به‌طور گسترده برای بیان احتمالاتی دانش

و حاصل را به توزیع‌های پیشین نزدیک می‌کنند. برای این کار از الگوریتم‌های بهینه‌سازی استفاده می‌شود. در واقع استنتاج احتمالاتی را یک مسئله بهینه‌سازی در نظر می‌گیرند که در آن  $f$  یک توزیع احتمال ردیابی‌شونده یا راه‌حلی برای نمایش برخی از پارسمان‌های احتمالاتی است (تانگ و لیو، ۲۰۱۷).

در روش تخمین بیزی یا استنباط بیزی به تخمین اولیه از مجهول یا مجهولات نیاز هست. این تخمین عبارت است از اطلاعات یا باور اولیه محقق (prior knowledge) که با یک تابع احتمال ریاضی بیان می‌شود. سپس مشاهداتی انجام می‌شود و محقق اطلاعاتی را درباره مجهولات مورد نظر جمع‌آوری می‌کند و با استفاده از این اطلاعات جدید، تابع احتمال اولیه به‌روزرسانی می‌شود. با جمع‌آوری اطلاعات بیشتر و به‌روزرسانی توابع احتمال متناظر با مجهولات می‌توان توابع توزیع احتمال دقیق‌تر و تخمین بهتری به‌دست آورد.

### ۳ روش‌شناسی و معرفی مدل

از شبکه‌های بیزین در زمینه استدلال احتمالاتی به‌طور گسترده استفاده می‌شود و به درخت متصل روی احتمالات استدلال‌شده تبدیل می‌شوند. شبکه‌های بیزین به قسمت‌های کوچک‌تری تبدیل می‌شوند که زیرشاخه‌هایی از شاخه اصلی درخت احتمالات میباشند و بیشتر از درخت‌های متصل کاربرد دارند. این شبکه که معمولاً به‌صورت آشکار با مقادیر اولیه پذیرفتنی و روابط بین متغیرها توزیع می‌شود، در مسائل دنیای واقعی بسیار کاربرد دارد. در چندین سال پیش، پژوهشگران به شبکه‌های بیزین توجه و از آنها به‌عنوان گروه‌های علوم زمین در روش‌های شبکه‌های آمار و احتمالات استفاده کردند. شبکه بیزین یک مدل گرافیکی برای نمایش احتمالات بین متغیرهای مورد نظر است. از طرفی، شبکه‌های بیزین روشی برای نمایش توزیع احتمالی پیوسته بزرگ به‌صورت نمایی و روش فشرده هستند که

در نظر گرفته می‌شود که بازگوکننده باور ما به محتمل بودن هر یک از این مقادیر بدون دیدن داده است. با جمع‌آوری داده و مشاهده آن، مقدار توزیع احتمال ثانویه تخمین زده می‌شود. با استفاده از این احتمال ثانویه، درباره عدم قطعیت نتیجه‌گیری می‌شود. سپس با میانگین‌گیری از مقادیر احتمال ثانویه، پیش‌بینی انجام و برای کاهش خطای ثانویه چشمداشتی تصمیم‌گیری می‌شود. روش‌های بیزی فرضیه‌هایی ارائه می‌دهند که قادر به پیش‌بینی احتمالی هستند. مثال‌های جدید را می‌توان با ترکیب وزنی چندین فرضیه دسته‌بندی کرد. حتی در مواردی که روش‌های بیزی را نمی‌توان تخمین زد، می‌توان از آنها به‌عنوان معیاری برای ارزیابی روش‌های دیگر استفاده کرد. تعدادی از روش‌های یادگیری ماشینی بیزی عبارت‌اند از: دسته‌بندی بهینه بیز (Bayes Optimal Classifier)؛ دسته‌بندی‌کننده مجدد بیز (New Bayes Category)؛ شبکه‌های بیزی (Bayesian networks)؛ تقریب میدان متوسط (Mean field) (محمدی و همکاران، ۱۳۹۹).

برای یک توزیع احتمال شرطی با یک گراف پیچیده، محاسبه احتمال حاشیه (Marginal) متغیر تصادفی دلخواه کاری بسیار دشوار و حل‌ناشدنی است. در یادگیری ماشین‌های نوین، استنتاج تنوع بیزی (Bayes variation)، اغلب برای استنتاج توزیع‌های شرطی برای متغیرهای پنهان با توجه به مشاهدات (و پارامترها) استفاده می‌شود و به‌عنوان توزیع پیشین متغیرهای پنهان نیز شناخته شده است. برای توزیع‌های شرطی، اغلب از روش استنتاج‌های تقریبی استفاده می‌شود؛ زیرا محاسبه مستقیم احتمالات پیشین برای بسیاری از مدل‌ها امکان‌پذیر نیست (موسوی شوشتری و سیدین، ۱۳۹۸). ایده اصلی این کار، انتخاب یک گروه از توزیع‌ها روی متغیرهای پنهان است که در این مطالعه با  $Z$  معرفی شده است. هر کدام از  $Z$ ها مجموعه‌ای از پارامترهای متغیر (variational parameter) مربوط به خود را دارد. سپس پارامترهایی محاسبه می‌شوند که تخمین‌زدنی هستند

رابطه هم‌زمان متغیرهای درون‌زای مدل است. به منظور رفع این مشکل، رابطه (۱) در معکوس ماتریس  $A$  ضرب می‌شود. جواب، شکل خلاصه‌شده مدل خودرگرسیون برداری (reduced form variation) نامیده می‌شود:

$$\begin{aligned} y_t &= Fy_{t-1} + u_t \quad u_t \sim N(0, \Sigma_{uu}) \\ F &= A^{-1}B \quad u_t = A^{-1}\varepsilon_t \end{aligned} \quad (2)$$

با توجه به اینکه داده‌های شکل خلاصه‌شده مدل خودرگرسیون متفاوت از داده‌های ساختاری هستند، اثر این داده‌ها را نمی‌توان تفسیر کرد و اطلاعات مفیدی ندارند. برای استخراج اطلاعات باید شکل ساختاری مدل را به دست آورد. با شناسایی ماتریس  $A$  می‌توان از شکل خلاصه‌شده به شکل ساختاری مدل رسید. از رابطه (۳) برای یافتن شکل ساختاری مدل استفاده می‌شود:

$$\Sigma_{uu} = A^{-1}A^{-1'} \quad (3)$$

اما اینجا مشکل شناسایی وجود دارد: به دلیل مقارن بودن ماتریس وارینانس - کوواریانس  $\Sigma_{uu}$  تعداد معادلات مستقل برابر با  $\frac{n(n-1)}{2}$  است، در صورتی که  $n^2$  پارامتر ناشناخته وجود دارد؛ بنابراین برای شناسایی کامل ماتریس ضرایب  $A$ ، به تعداد  $\frac{n(n-1)}{2}$  محدودیت نیاز است. روش شناسایی با استفاده از محدودیت‌ها، دو مزیت اصلی دارد. اول اینکه با نظریه احتمالات سازگاری زیادی دارد و دوم اینکه به نظریه قوی برای شناسایی نیاز ندارد. به همین دلیل است که برای کار با داده‌های لرزه‌ای باید از یک مقدار مشخص شروع کرد که برحسب داده‌های ساختاری مدل وضع می‌شود. اعمال محدودیت به صورت مستقیم بر ماتریس ضرایب مدل خودرگرسیون برداری کار سختی است، اما وضع محدودیت‌ها بر توابع عکس‌العمل آبی متعامد امکان‌پذیر است (کوسکی و نوبل، ۲۰۰۹).

برای محاسبه پارامترهای لرزه‌خیزی مربوط به ایالت لرزه‌زمین ساخت البرز - آذربایجان، عدم قطعیت‌ها با توجه به مطالعات آمبرسیز (۱۹۷۵، ۱۹۸۸، ۲۰۰۱)، آمبرسیز و

اجازه محاسبات احتمالاتی را به طور مؤثر می‌دهند. این روش از ساختار مدل گرافیکی برای ضوابط مستقل بین متغیرهای تصادفی استفاده می‌کند. شبکه‌های بیزین اغلب برای شرایط مدل احتمالی استفاده می‌شوند و به استدلال‌هایی با شرایط نامشخص (احتمالی و عدم قطعیت) کمک می‌کنند. این شبکه شامل بخش کیفی (مدل ساختاری) است که نمایش بصری از فعل و انفعالات در میان متغیرها و بخش کمی (مجموعه‌ای از مشخصات احتمال محلی) را فراهم می‌کند و مجاز به استنتاج احتمالات و اندازه‌گیری عددی است که متغیرها یا مجموعه‌ای از متغیرها را تحت تأثیر قرار می‌دهد. بخش کیفی به صورت توزیع احتمالی پیوسته یکتا است که برای کلیه متغیرها تعریف می‌شود (اسکندری، ۱۳۹۷).

با توجه به تعداد زیاد داده‌ها و همبستگی بین متغیرهای انتخاب‌شده، از این داده‌ها در مدل مطالعه حاضر، شناسایی اثر آنها با روش‌های غیرساختاری مشکل است. در این مطالعه، از روش خودرگرسیون برداری ساختاری با محدودیت علامتی استفاده شده است. مزیت اصلی این روش، شناسایی اثر داده‌های ساختاری با اطلاعات نظری اندک است. در ادامه، خلاصه‌وار مدل خودرگرسیون برداری با محدودیت معرفی می‌شود. یک مدل خودرگرسیون برداری ساختاری با رابطه (۱) بیان می‌شود:

$$Ay_t = By_{t-1} + \varepsilon_t \quad \varepsilon_t \sim N(0, I) \quad (1)$$

که متغیر  $y_{t-1}$ ، یک بردار  $n$  است که آن را معمولاً به صورت متغیر  $y_t$ ، یک بردار  $n \times 1$  است معرفی می‌گردد و  $n$  بر تعداد متغیرهای مدل دلالت دارد.  $A$  و  $B$  ماتریس‌های ضرایب با درجه  $n \times n$  هستند. بردار  $\varepsilon_t$  با درجه  $n \times 1$  بر داده‌های ساختاری مدل دلالت دارد. گفتنی است داده‌های ساختاری از یکدیگر مستقل هستند و همبستگی سریالی ندارند. به دلیل وجود همبستگی میان متغیرهای توضیحی و داده‌های مدل، تخمین سازگار مدل ساختاری وجود ندارد. این همبستگی به دلیل وجود ماتریس  $A$  است که دربرگیرنده

$$\beta \rho e^{-\beta x}, R_0 \leq x \leq \rho \quad (5)$$

که  $\rho$  پارامتر مجهول از بیشترین مقدار ممکن  $R$  است.  $\beta$  پارامتر مجهول شیب و  $\lambda$  مقدار شدت است. محدوده این سه متغیر به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\begin{aligned} \lambda_{\min} &\leq \lambda \leq \lambda_{\max} \\ \beta_{\min} &\leq \beta \leq \beta_{\max} \\ \rho_{\max} &\leq \rho \leq \rho_{\max} \end{aligned}$$

برای محاسبه بیشترین شتاب زمین، می‌توان احتمال هر رویدادی را با استفاده از رابطه زیر تخمین زد (پیسارنکو و لیوبوشین، ۱۹۹۷ و لیوبوشین و همکاران، ۲۰۰۲):

$$\text{Prob}\{R_T < x\} = \exp -\lambda \left(1 - F\left(\frac{x}{\theta}\right) T\right) \quad (6)$$

رابطه زیر، فرمولی سه‌بعدی برای درجه‌بندی‌های دلخواه (برای مثال،  $30 \times 30 \times 30$ ) است:

$$\Phi(x|\theta) = \text{pr}\{R_T < x | \vartheta_T \gg 1\} = \frac{\exp(-\lambda T(1-f(x|\theta)) - \exp(-\lambda T))}{1 - \exp(-\lambda T)} = \frac{\exp(-\lambda T F(x|\theta) - 1)}{\exp(\lambda T) - 1} \quad (7)$$

که  $\theta$  بردار پارامتر،  $R_T$  بیشترین مقدار  $R$  و  $\vartheta_T$  تعداد رویدادها است.

در کیورگین و همکاران (۱۹۹۹) مدلی ریاضی بر اساس بیزین ارائه کردند تا بتوان با اطمینان از تمامی محاسبات آماری و احتمالاتی استفاده کرد. در این روش ابتدا یک مدل ریاضی جهت پیش‌بینی متغیر  $F$  برحسب مجموعه‌ای از متغیرهای مشاهده‌شده  $\chi$  معرفی می‌شود:

$$F(\chi, \theta, \delta) = f(\chi, \theta) + \delta \cdot \varepsilon \quad (8)$$

که  $f(\chi, \theta)$  تابع بخش مطلق مدل،  $\theta$  بردار پارامترهای مجهول،  $\delta$  انحراف استاندارد مدل پارامتر مجهول و  $\varepsilon$  متغیر تصادفی نرمال با میانگین صفر و انحراف معیار یک است که نشان‌دهنده عدم قطعیت در مدل پیش‌بینی است.

بردار پارامترهای مجهول که باید با استفاده از اطلاعات موجود و محاسبات آماری تعیین شوند، عبارت‌اند از:

$$f(\Phi) = C.L.(\Phi) \cdot P(\Phi) \quad (9)$$

که  $P(\Phi)$  توزیع پیشین مجهولات است که نشان‌دهنده اطلاعات فعلی درباره آنها قبل از جمع‌آوری داده‌ها است.

با استفاده از اطلاعات جدید که همان متغیرهای

جکسون (۱۹۹۸)، آمبرسیز و ملویل (۱۹۸۲) و میرزائی و همکاران (۱۳۸۱) تعیین شده‌اند. همچنین در روابط تضعیف، عدم قطعیت تصادفی به کمک تعداد انحراف معیار جنبش نیرومند زمین (۴) تعیین شده است. تحلیل روابط تضعیف جدید نشان می‌دهد کمینه مقدار  $\varepsilon$  باید ۳ باشد (آبراهامسون، ۲۰۰۶ و کازاوارا و سندل، ۲۰۰۶).

#### ۴ روش بررسی

تاکنون بحث‌های زیادی درباره بهترین روش مدل‌سازی عدم قطعیت‌ها صورت پذیرفته است. اغلب روش‌های پیشنهادی در این زمینه مبتنی بر نظریه احتمالات و منطق فازی هستند که از بین این دو روش برای مدل‌سازی عدم قطعیت‌ها، روش احتمالاتی پایه نظری قوی‌تری دارد. یکی از جدیدترین روش‌های احتمالاتی، استفاده از آمار بیزین است. با استفاده از این روش می‌توان احتمالات پسین متغیرهای خروجی را با استفاده از مقادیر مشاهداتی متغیرهای ورودی محاسبه کرد (نس و همکاران، ۲۰۲۰). در این مطالعه از روش لیوبوشین و همکاران (۲۰۰۲) استفاده شده است که بر پایه آمار بیزین است. فرض‌های اصلی در این روش بر اساس فرایند پواسونی رخدادها و قانون توزیع گوتنبرگ-ریشتر است و به کاتالوگ زلزله و روابط تضعیف نیاز دارد. در این روش توزیع احتمالاتی توأم یک مجموعه از متغیرها با فرض مستقل بودنشان از رابطه زیر به‌دست می‌آید:

$$R \rightarrow (x) = (R_1, \dots, R_x), R_i \geq R_0, R_T = \max_{1 \leq i \leq x} (R_1, \dots, R_n) \quad (4)$$

که  $R$  بیشترین شتاب جنبش لرزه‌ای زمین،  $(-\tau, 0)$  فاصله زمانی پسین و  $R_0$  حداقل مقدار متغیر مدل ورودی است. رابطه گوتنبرگ-ریشتر که بر اساس احتمالات و با شرط  $R < x$  است، از رابطه (۵) به‌دست می‌آید (لیوبوشین و پاروز، ۲۰۱۰):

$$\text{Pr}\{R < x\} = F\left(\frac{x}{R_0}, p, \beta\right) = \frac{e^{-\beta R_0} - e^{-\beta x}}{e^{-\beta R_0} - e^{-\beta p}} =$$

مشاهده شده (X) هستند، سطح جدید اطلاعات درباره پارامترهای مجهول در قالب تابع راست‌نمایی آن ( $L(\Phi)$ ) تعریف می‌شود. با ترکیب توزیع پیشین و اطلاعات موجود، توزیع پسین پارامترهای مجهول ( $f(\Phi)$ ) محاسبه خواهد شد که بازتاب‌دهنده سطح اطلاعات جدید درباره مجهولات است و به عبارتی، همان نتایج مطلوب است. در این میان، پارامتر C هم تنها نقش یک پارامتر مقیاس‌کننده را بازی می‌کند تا برابر واحد شدن انتگرال تابع توزیع پیشین را تأیید کند. با چنین رهیافتی می‌توان پارامترهای مجهول مدل را محاسبه کرد (طیب‌زاده و همکاران، ۲۰۱۷).

مشاهده شده (X) هستند، سطح جدید اطلاعات درباره پارامترهای مجهول در قالب تابع راست‌نمایی آن ( $L(\Phi)$ ) تعریف می‌شود. با ترکیب توزیع پیشین و اطلاعات موجود، توزیع پسین پارامترهای مجهول ( $f(\Phi)$ ) محاسبه خواهد شد که بازتاب‌دهنده سطح اطلاعات جدید درباره مجهولات است و به عبارتی، همان نتایج مطلوب است. در این میان، پارامتر C هم تنها نقش یک پارامتر مقیاس‌کننده را بازی می‌کند تا برابر واحد شدن انتگرال تابع توزیع پیشین را تأیید کند. با چنین رهیافتی می‌توان پارامترهای مجهول مدل را محاسبه کرد (طیب‌زاده و همکاران، ۲۰۱۷).

## ۵ کاربرد نظریه بیزین در منطقه مورد مطالعه

یالت لرزه‌زمین‌ساخت البرز- آذربایجان در ناحیه شمال و شمال غرب فلات ایران قرار گرفته است (میرزائی و همکاران، ۱۹۹۸). این ناحیه از شمال به فرونشست دریای خزر و از جنوب به فلات ایران مرکزی محدود شده است. از نظر زمین‌شناسی منطقه مورد مطالعه، حد جنوبی یالت لرزه‌زمین‌ساخت البرز- آذربایجان خوب مشخص نیست (آقانباتی، ۱۳۸۳)، اما بر اساس مطالعات نوزمین‌ساخت، مرز جنوبی این یالت روی گسل‌های فعال تبریز، ایپک و تروود (حسامی آذر و همکاران، ۱۳۹۰) قرار می‌گیرد. مرز شرقی یالت که به کپه‌داغ می‌رسد نیز واضح نیست و به فعالیت‌های لرزه‌ای در روند ساختمان‌های زمین‌شناسی برمی‌گردد (آقاجری و همکاران، ۱۳۹۶). در مرز شمالی نیز گسل‌های فعال البرز، کندوان، شمال تهران و مشا فشم قرار دارند (آقانباتی، ۱۳۸۳ و حسامی آذر و همکاران، ۱۳۹۰).

یالت لرزه‌زمین‌ساخت البرز- آذربایجان در ناحیه شمال و شمال غرب فلات ایران قرار گرفته است (میرزائی و همکاران، ۱۹۹۸). این ناحیه از شمال به فرونشست دریای خزر و از جنوب به فلات ایران مرکزی محدود شده است. از نظر زمین‌شناسی منطقه مورد مطالعه، حد جنوبی یالت لرزه‌زمین‌ساخت البرز- آذربایجان خوب مشخص نیست (آقانباتی، ۱۳۸۳)، اما بر اساس مطالعات نوزمین‌ساخت، مرز جنوبی این یالت روی گسل‌های فعال تبریز، ایپک و تروود (حسامی آذر و همکاران، ۱۳۹۰) قرار می‌گیرد. مرز شرقی یالت که به کپه‌داغ می‌رسد نیز واضح نیست و به فعالیت‌های لرزه‌ای در روند ساختمان‌های زمین‌شناسی برمی‌گردد (آقاجری و همکاران، ۱۳۹۶). در مرز شمالی نیز گسل‌های فعال البرز، کندوان، شمال تهران و مشا فشم قرار دارند (آقانباتی، ۱۳۸۳ و حسامی آذر و همکاران، ۱۳۹۰).

$$R = \log(A_{max}) = \varphi(M, D) \quad (10)$$

به دلیل تفاوتی که برآورد بیشینه شتاب زمین با مقدار بزرگ دارد، اندازه‌گیری مستقیم آن بسیار محدود و مستقل است (لیوبوشین و پاروز، ۲۰۱۰)؛ بنابراین هیچ کاتالوگی در دسترس نیست که شامل مقادیر بیشینه شتاب برای ساختگاه مورد نظر باشد. البته با استفاده از قوانین کاهندگی می‌توان رابطه‌ای بین بیشینه شتاب زمین و بزرگای زمین‌لرزه در فاصله‌های شعاعی مختلف تا محل وقوع زلزله بیان کرد:

ژئوفیزیک دانشگاه تهران

<http://irsc.ut.ac.ir/bulletin.php>, accessed October

این روابط با استفاده از قوانین رگرسیون‌گیری تجربی به‌دست‌می‌آیند (تئودولیدیس و پاپازاچوس، ۱۹۹۲). در این مطالعه ابتدا از روش لیوبوشین و همکاران (۲۰۰۲) کاتالوگ زلزله‌ها از سال ۱۹۰۰ تا ۲۰۲۰ تهیه شد. از کاتالوگ موسوی بفروئی و همکاران (۱۳۹۳) نیز استفاده شد. داده‌های ارائه شده در این مطالعه از نظر زمانی طولانی است و ناهمگنی زمانی و مکانی دارد؛ لذا در اینجا برای کاهش تأثیر ناهمگنی مذکور از ابزار رگرسیون بیزین استفاده شد. در ادامه، فرض شد که زمین‌لرزه‌های موجود در یک دوره زمانی به‌صورت پایدار موجود هستند و نرخ رویدادها در یک بازه و بزرگا در دوره مورد نظر ثابت است. در این مطالعه ابزار رگرسیون بیزین مورد استفاده بر مبنای روش شبیه‌سازی مونت کارلو با زنجیره مارکوف است که به یک

نرم افزار استفاده شده، این مقدار برای ضرایب A، که شامل این محدودیت می شود، ۵۰۰۰۰ فرض شده است.

- مرحله دوم: در این مرحله نتایج مشاهدات جمع آوری می شود. این مرحله را می توان با کسب خلاصه آمارهایی انجام داد که مشابه آمارهایی هستند که از قبل تعیین شده اند. iteration، تعداد تکرارها در اجرای برنامه است که مقدار آن همواره باید از burn-in بزرگ تر باشد. بر اساس انتخاب مرحله قبل، این مقدار ۵۲۰۰۰ در نظر گرفته شد.

- مرحله سوم: این مرحله شامل ترکیب درست نمایی و اعتقاد اولیه و شکل دادن اطلاعات پسین (posterior) است. اطلاعات پسین می تواند جدید و بیشتر از اطلاعات اولیه آگاه کننده باشد. اگر محاسبه توابع عکس العمل و تطابق این عکس العمل ها با محدودیت ها درست انجام شده باشد، مدل شناسایی می شود، در غیر این صورت باید سه مرحله فوق تکرار شود. ترکیب اطلاعات پسین با تحقیقات دیگر، درست نمایی جدیدی را به وجود می آورد. این روش ها به همین ترتیب تکرار می شوند و به مطالعه جدیدی منجر و در نهایت، به ویژگی های خاص خود تبدیل می شوند. همان طور که تانگ و لیو (۲۰۱۷) بیان کرده اند، نمونه گیری می تواند تا زمانی ادامه داشته باشد که تمام داده ها زیر پوشش قرار گیرند یا آخرین مغایرت ها توجیه شوند. این روش در استفاده از ضرایب متفاوت و تبدیل های ریاضی، انعطاف پذیر است. این مرحله، پله (step) نام گذاری شده است. نظریه بیزین به اندازه نمونه (n) حساس است. پارامتر n که برای محاسبات توزیع پسین و انحراف معیار استفاده می شود، هر تعداد که باشد، به همان اندازه پارامترهای نمونه ذخیره و محاسبات انجام می شود. در نرم افزار استفاده شده برای این مطالعه، این مقدار ۳۰۰ فرض شد. همچنین برای به حساب آوردن عدم قطعیت تصادفی در روابط تضعیف، ۳ واحد انحراف معیار در نظر گرفته شده است.

در این روش یک متغیر تصادفی بر اساس مشاهدات سیگنال ورودی تخمین زده می شود. بیزین بر اساس ترکیب

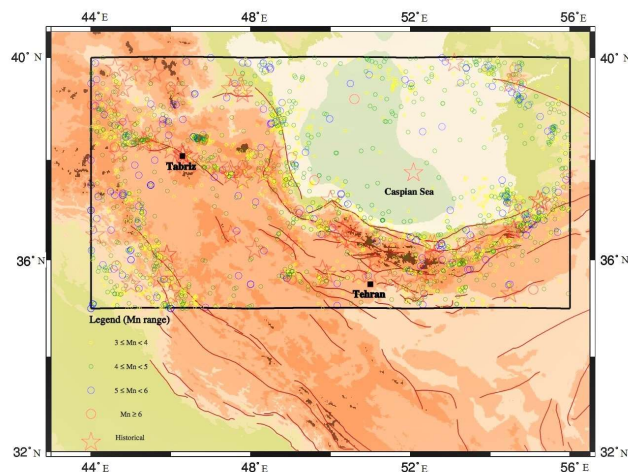
تخمین میانگین پیشین و پسین کاملاً بیزین منجر و جهت تخمین تابع و پارامترهای مجهول از آن استفاده می شود. راه حل تقریبی مسائل آماری مفهومی همه جانبه و عمومی برای استنتاج بیزین است که برای شبیه سازی کمیت های تصادفی برای برآورد کمیتی مجهول به کار می رود. استنباط بیزین به دلیل استفاده از اطلاعات قبلی، می تواند با شیوه ای یکتا توزیع های پسین به ویژه توزیع پسین کناری را که اغلب نیازمند انتگرال گیری از توابع با ابعاد زیاد است، با استفاده از، زنجیره مارکوف مونت کارلو شبیه سازی کند. این شبیه سازی موجب توسعه بهترین ترکیب های رگرسیون با سرعت زیاد بدون ذره ای محاسبات دستی می شود. برای انجام دادن این روش، مراحل زیر باید انجام گیرد:

- مرحله اول: پژوهشگر باید باور خود را از واقعیت بیان کند و آن را از فیلتر آماری میانگین چشمداشتی، فیلتر واریانس چشمداشتی و فیلتر قدرت اعتقادات در باور اولیه عبور دهد. این سه ملاک می توانند بر اساس اتفاق های پیشین، تحقیقات گذشته یا ترکیبی از آنها باشند. اگر اتفاق های پیشین به صورت میانگین، انحراف استاندارد و حجم نمونه فرضی بیان شوند، مانعی برای مراجعه به تحقیق های گذشته وجود نخواهد داشت. همانطور که در روش شناسی توضیح داده شد، برای شناسایی ماتریس ضرایب به اعمال محدودیت نیاز است که با توجه به کل داده های لرزه ای در منطقه مورد مطالعه، تخمین مدل های خود رگرسیون برداری با محدودیت شروع، بر اصول استنباط بیزین تکیه دارد. از مطالعات اساسی در حوزه تخمین بیزین مدل خود رگرسیون برداری با محدودیت می توان به پژوهش او هلیگ (۲۰۰۵)، فری و پگان (۲۰۱۱) و انوئه و کیلین (۲۰۱۳) اشاره کرد. برای شناسایی کامل ماتریس ضرایب A، به تعداد  $\frac{n(n-1)}{2}$  محدودیت نیاز است. در برنامه نویسی این مرحله burn-in نامیده می شود که اصطلاحی است محاوره ای برای اشاره به تعداد تکرارها در ابتدای اجرای شبیه سازی. در

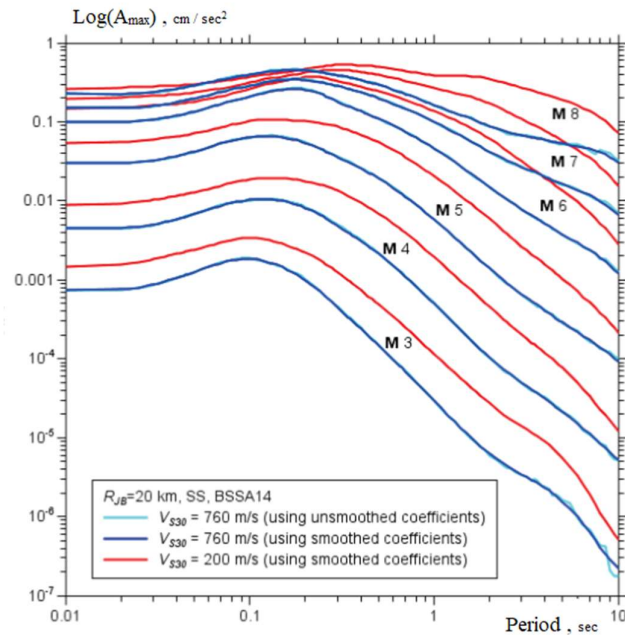


مجاورت خود جای داده است، چاره‌ای جز استفاده از روابط NGA، نیست. روابط کاهندگی بور-اتکینسون (۲۰۰۸) هم برای حوزه‌های نزدیک و هم برای زلزله‌های دور تطبیق بیشتری با داده‌های ایالت لرزه‌زمین‌ساخت البرز-آذربایجان دارد. برای این منظور از تمام زمین‌لرزه‌های رخ داده در منطقه از سال ۱۹۰۰ تا ۲۰۲۰ استفاده شد. در شکل ۱ به علت تعداد زیاد داده‌ها در منطقه، فقط زمین‌لرزه‌هایی نشان داده شده است که بزرگایی بیش از ۳ دارند. حال با استفاده از کاتالوگ زمین‌لرزه‌های منطقه، روابط کاهندگی مناسب (کمپل و بزرگنیا، ۲۰۰۸؛ بزرگنیا و همکاران، ۲۰۱۰) و رابطه (۷) مدل‌سازی انجام می‌گیرد. مدل‌ها در WinBUG در دو بخش نوشته می‌شوند. بخش اول مربوط به توزیع تصادفی داده‌ها و بخش تصادفی مدل است و بخش دوم مربوط به تابع مدل خطی برای برآورد پارامترهای مدل است. تاکنون محاسبات برداری برای مدل‌ها در WinBUGS طراحی نشده است و باید این‌گونه محاسبات با حلقه تکرار نوشته و اجرا شوند؛ بنابراین به کدنویسی نیاز است. برای صحت کار می‌توان از

کردن مشاهدات سیگنال ورودی با توزیع احتمال فرایند است. جزئیات بیشتر درباره این روش آماری در مطالعات بزرگر و لانگک (۲۰۰۶) آمده است. در روش فوق، فرایند پواسونی بودن رخداد‌های زلزله، فرضیه‌ای اصلی است و رخداد‌های وابسته به زمان طبق فرمول (۱) باید حذف شوند. این کار به این دلیل انجام می‌گیرد که برای تحلیل خطر یک منطقه مشخص، نیاز است پیش‌لرزه‌ها و پس‌لرزه‌ها از فهرست کاتالوگ لرزه‌خیزی منطقه حذف شوند. نرم‌افزار Knopoff (گاردنر و نیوف، ۱۹۷۴) نرم‌افزار تحت داس است که داده‌ها را تحلیل و پیش‌لرزه‌ها و پس‌لرزه‌ها را حذف می‌کند. خروجی این نرم‌افزار به ورودی نرم‌افزار بعدی یعنی Kijko تبدیل می‌شود. البته باید توجه داشت که همه پس‌لرزه‌ها حذف نمی‌شوند؛ زیرا بعضی از پس‌لرزه‌ها نسبت به زلزله اصلی شتاب بیشتری را در ساختگاه مورد نظر ایجاد می‌کنند. با توجه به مراحل ذکر شده باید از منحنی‌های کاهندگی نسل جدید (Next Generation Attenuation, NGA)، استفاده کرد. در اینجا نمی‌توان رگرسیون غیرخطی را به کار گرفت؛ از این رو برای شمال و شمال غرب ایران که چندین گسل فعال را در داخل و



شکل ۱. منطقه شمال و شمال غرب ایران به همراه زمین‌لرزه‌های به‌وقوع‌پیوسته ( $3 \leq M_n \leq 6$ ).



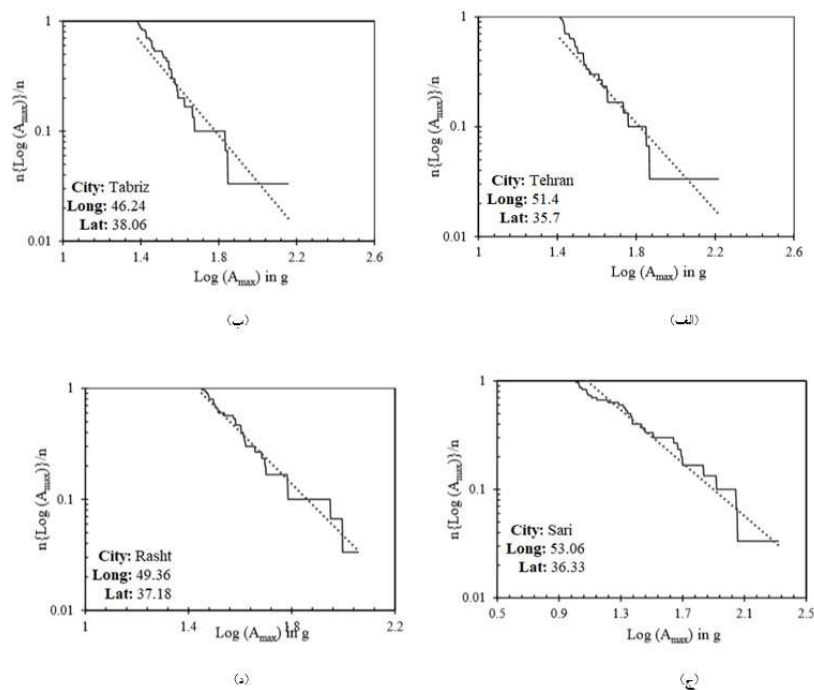
شکل ۲. دنباله  $\text{Log}(A_{\max})$  با استفاده از زمین‌لرزه‌های موجود در کاتالوگ در ناحیه شمال و شمال غرب ایران.

حذف پس‌لرزه‌های نامناسب با روش‌های ذکر شده، زلزله اصلی برای تجزیه و تحلیل خطر لرزه‌ای در منطقه مورد مطالعه انتخاب شد. برای چهار ایستگاه مدل از شبکه طراحی شده در منطقه نمودار تابع دم تجربی رسم شد. در شکل ۳ خطوط نقطه‌چین بهترین منحنی‌های قانون نمایی هستند.

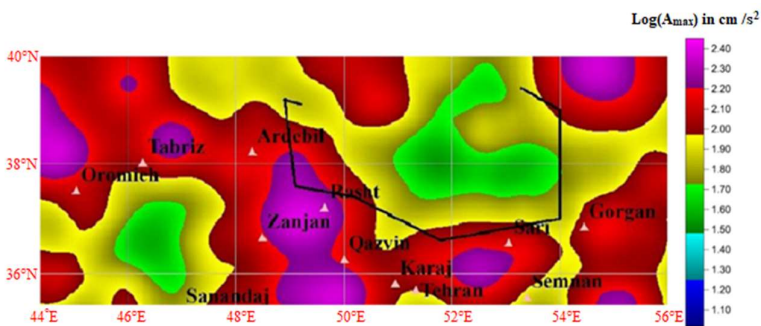
با توجه به مدل‌سازی به روش بیزین، تخمینی از چندک‌های مختلف برای بیشینه مقادیر توابع توزیع  $\text{Log}(A_{\max})$  محاسبه می‌شود. در این مطالعه این کار برای فاصله زمانی ۵۰ سال و ۴۷۵ سال آینده در ایستگاه‌ها انجام شد که در شکل‌های ۴ و ۵ نشان داده شده است.

پس از محاسبات آماری بر اساس اطلاعات موجود در هر ایستگاه از شبکه می‌توان بیشینه شتاب (PGA) را تخمین زد. مقدار به‌دست‌آمده PGA برای برخی از شهرهای مهم ایالت لرزه‌زمین‌ساخت البرز-آذربایجان در جدول ۱ آمده است. شهرهای رشت و زنجان علی‌رغم

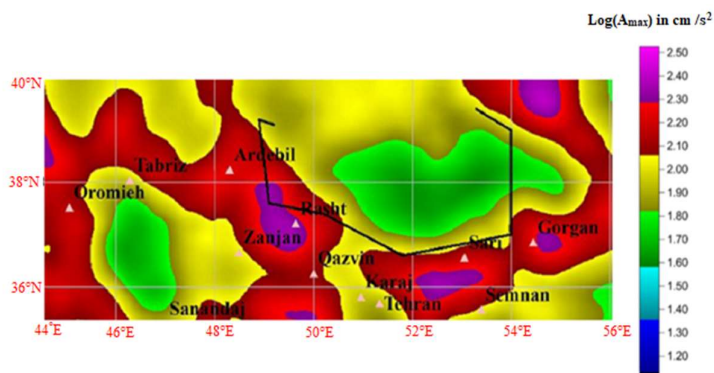
OpenQuake (سیلوا و همکاران، ۲۰۱۳) نیز استفاده کرد. روابط کاهندگی همیشه یک خطای مخصوص به خود را دارند که ناشی از برازش‌های آماری است. این خطا را می‌توان به دو قسمت تقسیم کرد. اولین خطا شامل خطای ذاتی است که مربوط به نوسانات آماری داده‌ها است. دومین خطا مربوط به نقص و ناکافی بودن کلاس توابع انتخاب‌شده برای روابط کاهندگی است. در اینجا این خطاها یکنواخت و صفر فرض می‌شوند. در مقابل مقدار  $\Delta$  برای عدم قطعیت، مقدار  $\text{Log}(A_{\max})$  دو برابر مقدار انحراف معیار در رابطه کاهندگی قرار داده می‌شود. بیشترین شتاب برای دوره زمانی ۵۰ و ۴۷۵ سال (۴۷۵،  $T=50$ ) برای مختصات ۴۴-۵۶ درجه شرقی و ۳۵-۴۰ درجه شمالی پیش‌بینی می‌شود. برای هر ایستگاه دنباله‌ای از  $\text{Log}(A_{\max})$  با استفاده از زمین‌لرزه‌های موجود در کاتالوگ در ناحیه شمال و شمال غرب ایران محاسبه شد (شکل ۲). سپس برای بیان تصادفی بودن زلزله‌ها پس از



شکل ۳. نمودار دم تجربی برای چهار ایستگاه در شمال ایران. (الف) تهران (ب) تبریز (ج) ساری (د) رشت.



شکل ۴. تخمینی از چندک‌های مختلف برای بیشینه مقادیر توابع توزیع Log(A<sub>max</sub>) برای فاصله زمانی ۵۰ سال آینده در ایستگاه‌های لرزه‌ای شمال و شمال غرب ایران.



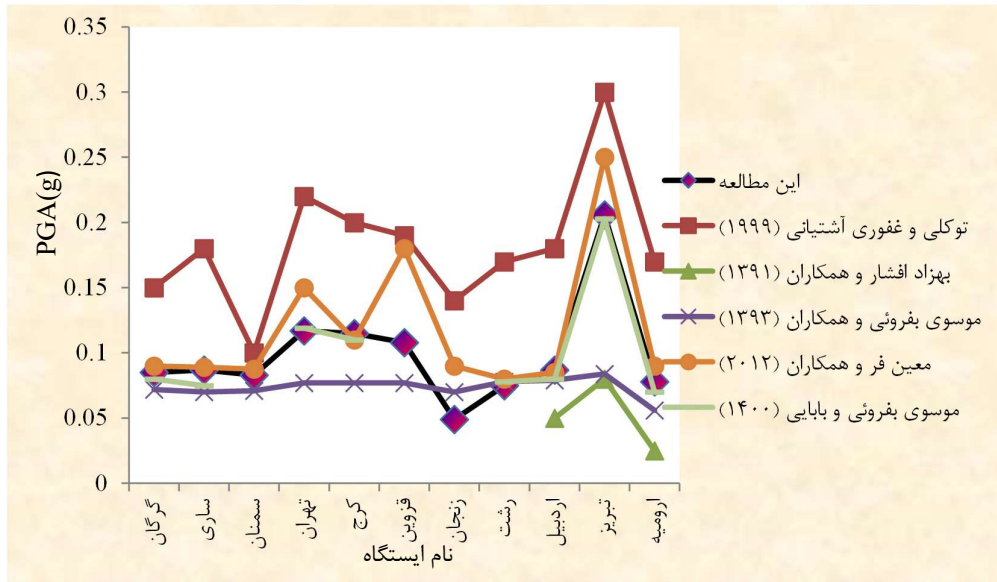
شکل ۵. تخمینی از چندک‌های مختلف برای بیشینه مقادیر توابع توزیع Log(A<sub>max</sub>) برای فاصله زمانی ۴۷۵ سال آینده در ایستگاه‌های لرزه‌ای شمال و شمال غرب ایران.

از جمله دلایل این تفاوت‌ها است. این مقایسه برای ۴۷۵ سال نیز انجام شد که حاکی از همخوانی این مطالعه با مطالعات موسوی بفرئی و همکاران (۱۳۹۳)، سلحشور و همکاران (۲۰۱۸) (برای کل ایران)، ملکی و همکاران (۱۳۹۸) (برای آذربایجان) و موسوی بفرئی و بابایی ماهانی (۱۴۰۰) (برای چند شهر مهم ایران) است (شکل ۷). شتاب‌های تخمین زده شده در این مطالعه با پژوهش حمزه‌لو و همکاران (۲۰۱۲)، موسوی بفرئی و همکاران (۱۳۹۳) (برای کل ایران)، قدرتی امیری و همکاران (۲۰۱۱)، امیرانلوی و همکاران (۱۳۹۶) و اسلامی و همکاران (۲۰۲۰) (برای منطقه آذربایجان) مغایرت دارد. محاسبه پارامترهای لرزه‌خیزی، مدل انتخابی چشمه‌ها و سایر عوامل لرزه‌ای وابسته می‌تواند این تفاوت را ایجاد کند. البته در همه مطالعات، افزایش شتاب در تبریز و کاهش آن در اردبیل و ارومیه دیده می‌شود.

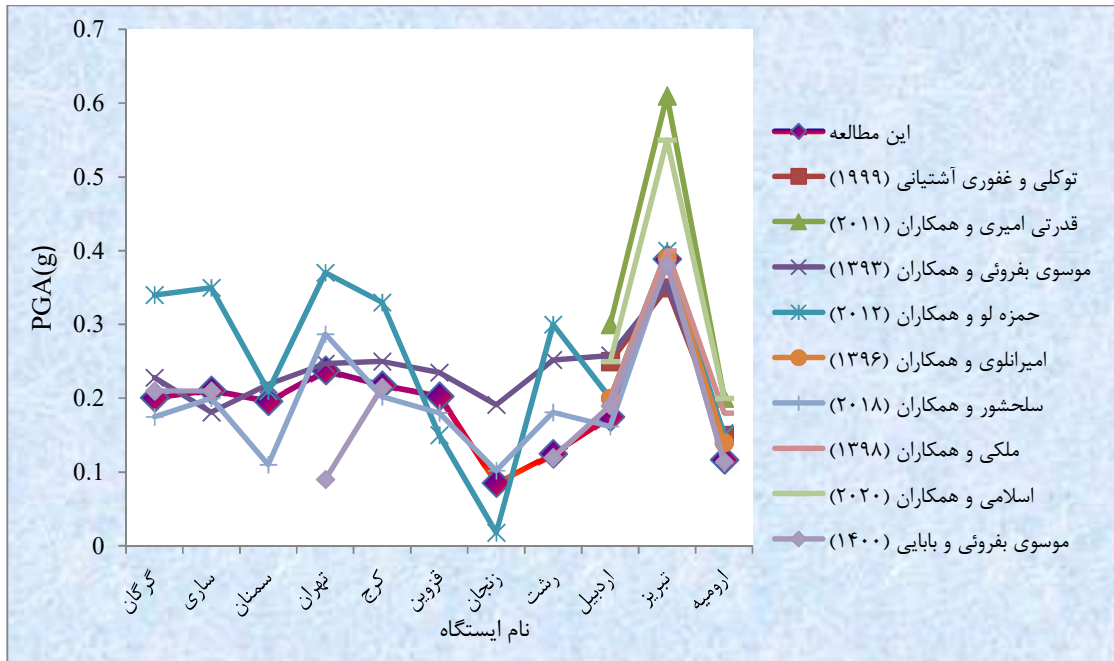
وجود گسل‌های فعال، داده‌های دستگاهی و تاریخی کمی دارند، اما شهرهای تهران و تبریز به دلیل گزارش زلزله‌های تاریخی و وجود زمین‌لرزه‌های دستگاهی، امکان ایجاد شتاب بیشتری را در منطقه دارند. در این دو شهر به دلیل اینکه زمینلرزه‌های به وقوع پیوسته، دوره بازگشت طولانی دارند، داده‌های تاریخی در لرزه‌خیزی ساختگاه‌های مورد نظر در این مکانها تأثیر بیشتری دارند. مطالعات دیگری نیز در این منطقه انجام شده است که در شکل‌های ۶ و ۷ به ترتیب برای دوره بازگشت ۵۰ و ۴۷۵ سال مقایسه شده‌اند. در دوره بازگشت ۵۰ سال، مطالعه حاضر با کار معین‌فر و همکاران (۲۰۱۲)، موسوی بفرئی و همکاران (۱۳۹۳) و موسوی بفرئی و بابایی ماهانی (۱۴۰۰) (برای چند شهر ایران)، نسبت به کار توکلی و غفوری آشتیانی (۱۹۹۹) (برای کل ایران) و مطالعه بهزاد افشار و همکاران (۱۳۹۱) (برای آذربایجان)، همخوانی بهتری دارد (شکل ۶). نوع رابطه تضعیف به کاررفته و استفاده از زمین‌لرزه‌های اخیر،

جدول ۱. مقادیر برآوردشده جنبش زمین در برخی از شهرهای ایالت لرزه‌زمین‌ساخت البرز-آذربایجان.

نام ایستگاه	طول جغرافیایی	عرض جغرافیایی	بیشترین شتاب در ۵۰ سال در این مطالعه (g)	بیشترین شتاب در ۴۷۵ سال در این مطالعه (g)
اردبیل	۴۸/۳۲۸	۳۸/۲۱۷	۰/۰۸۷	۰/۱۷۵
گرگان	۵۴/۳۸۵	۳۶/۸۳۹	۰/۰۸۵	۰/۲۰۱
کرج	۵۰/۹۶	۳۵/۸۲	۰/۱۱۵	۰/۲۱۸
ارومیه	۴۵/۰۵	۳۷/۵۳	۰/۰۷۸	۰/۱۱۷
قزوین	۵۰/۱۱	۳۷/۲۹۲	۰/۱۰۸	۰/۲۰۳
رشت	۴۹/۵۹۱	۳۷/۲۹۲	۰/۰۷۵	۰/۱۲۵
ساری	۵۳/۰۶	۳۶/۶۰	۰/۰۸۷	۰/۲۱۱
سمنان	۵۳/۴۴	۳۵/۵۹	۰/۰۸۳	۰/۱۹۶
تبریز	۴۶/۲۸	۳۸/۰۵	۰/۲۰۶	۰/۳۸۹
تهران	۵۱/۴۰	۳۵/۸۲۷	۰/۱۱۷	۰/۲۳۸
زنجان	۴۸/۴۹	۳۶/۶۷	۰/۰۴۹	۰/۰۸۵



شکل ۶. مقایسه تخمین PGA برای ۵۰ سال در این مطالعه با سایر مطالعات انجام گرفته در منطقه شمال و شمال غرب ایران.



شکل ۷. مقایسه تخمین PGA برای ۴۷۵ سال در این مطالعه با سایر مطالعات انجام گرفته در منطقه شمال و شمال غرب ایران.

## ۶ بحث و نتیجه گیری

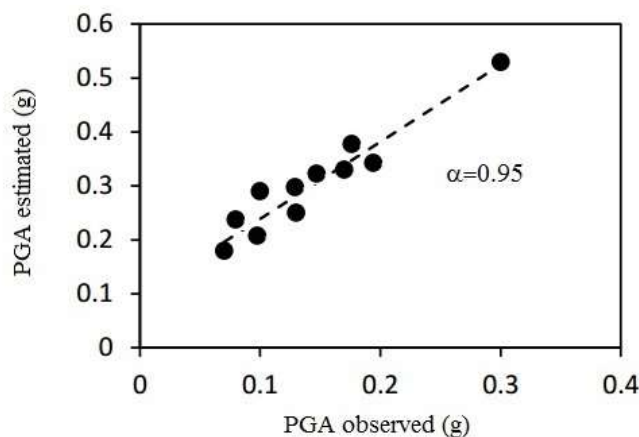
روش بیزین روشی جدید است که با داشتن مزیت‌هایی همچون در نظر گرفتن روابط بین متغیرها و شرایط عدم قطعیت، توانایی تلفیق اطلاعات موجود در قالب‌های

مختلف با دانش و داده‌های کارشناسی، سامان‌دهی به صورت تصویری و ساده و امکان به‌روزرسانی با افزایش متغیرها و داده‌های جدید، از مدل‌های انعطاف‌پذیر با توانایی زیاد در تحلیل خطر لرزه‌ای است. همچنین می‌توان

مربوط به دوره بازگشت ۵۰ و ۴۷۵ سال در ایستگاه‌های کرج، قزوین، تبریز و تهران با سایر مطالعات نشان‌دهنده تفاوت‌های درخور توجهی است. به همین منظور، شتاب‌هایی که در این مطالعه محاسبه شد، با داده‌های مرکز شتاب‌نگاری کشوری مقایسه شد (شکل ۸). این مقایسه نشان می‌دهد مطالعه حاضر با داده‌های شتاب‌نگاری همخوانی خوبی ( $\alpha=0.95$ ) دارد. تفاوت با سایر مطالعات، ممکن است ناشی از تفاوت در محاسبه پارامترهای لرزه‌خیزی، مدل انتخابی چشمه‌ها، انتخاب رابطه‌های تضعیف مورد استفاده و زمین‌لرزه‌های اخیر باشد. همه مطالعات حاکی از این هستند که تهران و تبریز بیشترین مقدار PGA را دارند؛ در نتیجه می‌توان گفت به دلیل استفاده از روش جدیدی که در محاسبات به آن اشاره شد، می‌توان ارزیابی مستقلی را از پارامترهای لرزه‌خیزی در منطقه مورد مطالعه برای داده‌های ناکامل و دارای عدم قطعیت ارائه داد. همچنین می‌توان تعداد زیادی چشمه بالقوه زمین‌لرزه را مدل‌سازی و از آن در محاسبه پارامترهای گسلش استفاده کرد که این موضوع از نتایج خوب این روش است. اگر زمین‌لرزه‌های بزرگ جدیدی نیز به‌وقوع-بپیوندد، با فراهم شدن داده‌های جدیدتر می‌توان

گفت در این روش مدل‌سازی هیچ واسطه‌ای برای به‌دست‌آوردن بیشینه شتاب زمین و مقادیر آن وجود ندارد. اطلاعات می‌تواند به‌صورت ذهنی یا داده‌های زمین‌شناسی و آماری باشند و با مشاهدات تاریخی وقوع زمین‌لرزه ترکیب شوند. در شهرهای تهران و تبریز به دلیل داشتن داده‌های بسیار مناسب، مدل‌سازی به‌خوبی اجرا شد. در سایر ایستگاه‌ها به دلیل نداشتن داده زلزله تاریخی مناسب، جواب‌ها با سایر مطالعات متفاوت است. در این مطالعه پارامترهای لرزه‌خیزی و بیشینه شتاب جنبش زمین (PGA) به همراه چندک‌های تابع توزیع احتمالاتی آن در فاصله زمانی  $T=50$  و  $T=475$  سال برای یازده ایستگاه در ایالت لرزه‌زمین‌ساخت البرز-آذربایجان با استفاده از کدنویسی در متلب، WinBUGS و OpenQuake تخمین زده شد.

مقایسه‌ای با سایر مطالعاتی که در منطقه شمال یا شمال غرب ایران انجام شده بودند (توکلی و غفوری آشتیانی، ۱۹۹۹؛ بهزاد افشار و همکاران (۱۳۹۱)؛ موسوی بفرئی و همکاران، ۱۳۹۳؛ حمزه‌لو و همکاران، ۲۰۱۲؛ معین‌فر و همکاران، ۲۰۱۲؛ سلحشور و همکاران، ۲۰۱۸؛ امیرانلوی و همکاران، ۱۳۹۶؛ ملکی و همکاران ۱۳۹۸؛ اسلامی و همکاران، ۲۰۲۰ و موسوی بفرئی و بابایی ماهانی، ۱۴۰۰)، در شکل‌های ۶ و ۷ نشان داده شده است. مقایسه PGA



شکل ۸. مقایسه PGA محاسبه‌شده (estimated) در این مطالعه با داده‌های مشاهده‌شده (observed).

حسامی آذر، خ.، طبسی، ه.، مبین، پ.، ۱۳۹۰، نقشه گسل-های جنبا در ایران: انتشارات پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله.

درویش زاده، ع.، ۱۳۷۰، زمین‌شناسی ایران: انتشارات ندا، تهران، ۹۰۲ ص.

سلحشور، ح.، شعبانی، ا.، کاظمیان، ج.، ۱۳۹۶، ارزیابی و محاسبه پارامترهای خطر زلزله با استفاده از رهیافت بیزین در چند ایستگاه منتخب در ایران: کنفرانس بین‌المللی عمران، معماری و شهرسازی ایران معاصر، تهران، ایران.

قاسمی، م.، قربانی، م.، شهریاری، س.، پورکرمانی، م.، حکیمی آسیابر، س.، ۱۳۹۰، تقسیمات تکنیکی البرز غربی: ویژه‌نامه زمین‌شناسی، ۸۱(۲۱)، ۱۱۳-۱۲۴.

علیزاده نوقابی، ح.، علیزاده، ع.، شکبیا منش، ع.، ۱۳۹۷، بکارگیری شبکه‌های بیزین چند موجودیتی برای مدیریت عدم قطعیت در سطوح بالای تلفیق داده: فصلنامه علمی- پژوهشی فرماندهی و کنترل، ۲(۲)، ۱-۱۲.

محمدی، ص.، مشتاق، ج.، گل پیرا، ه.، ۱۳۹۹، ارائه روش جدید ارزیابی قابلیت اطمینان در شبکه‌های فعال: مجله مهندسی برق دانشگاه تبریز، ۵۰(۴)، ۱۷۹۷-۱۸۰۹.

ملکی، ب.، رحیمی، ح.، ملکی، و.، ۱۳۹۸، بهره‌گیری از مدل سرشتی توزیع بزرگا برای گسل شمال تبریز در مطالعات تحلیل خطر و تأثیرات آن در برآورد پارامتر شتاب و منحنی خطر زمین‌لرزه: فیزیک زمین و فضا، ۴۵(۳)، ۵۳۷-۵۵۲.

موسوی بفرولی، س.ح.، بابایی ماهانی، ع.، ۱۴۰۰، برآورد احتمالاتی خطر زمین‌لرزه برای ۸ شهر پرجمعیت ایران: مجله ژئوفیزیک ایران، doi:10.30499/IJG.2022.320133.1386

موسوی بفرولی، س.ح.، میرزائی، ن.، شعبانی، ا.، اسکندری قادی، م.، ۱۳۹۳، پهنه‌بندی خطر زمین‌لرزه

این مطالعات را به‌روزرسانی کرد. این روش در پروژه‌های عمرانی به‌خصوص در سده‌سازی نیز به‌کار می‌رود. در این گونه مدل‌سازی‌ها لازم است راهنمای گام به گامی حاوی مجموعه‌ای از فرایندها و قوانین برای به‌کارگیری و مشخص کردن متغیرها و روابط بین آنها در طراحی و تصحیح مدل ارائه شود.

## تشکر و قدردانی

نویسندگان بر خود لازم می‌دانند از مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی، مؤسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران و پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله برای فراهم کردن داده‌های مورد نیاز قدردانی کنند. همچنین از داوران و سردبیر محترم که با نظرهای علمی خود بر غنای این مطالعه افزودند، کمال تشکر را دارند.

## منابع

آقاجری، ل. ا.، علوی، س. ا.، کاوسی، م. ع.، قاسمی، م.، ۱۳۹۶، پهنه‌بندی ساختاری و ریخت‌زمین‌ساختی کپه داغ خاوری: مجله علوم زمین، ۲۶(۱۰۴)، ۱۲۵-۱۳۱.

آقانباتی، س. ع.، ۱۳۸۳، زمین‌شناسی ایران: انتشارات سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور، تهران.

اسکندری، ف.، ۱۳۹۷، مدل‌سازی سیستم ایمنی بدن با استفاده از شبکه‌های بیزی: یافته‌های نوین در علوم زیستی، ۵(۲)، ۲۰۵-۲۲۰.

امیرانلوی، ه.، پورکرمانی، م.، دبیری، ر.، قرشی، م.، بوذری، س.، ۱۳۹۶، محاسبه بیشینه شتاب لرزه‌ای گسل شمال تبریز با استفاده از شبیه‌سازی لرزه‌ای چشمه گسل محدود: فصلنامه علوم زمین، ۲۷(۱۰۵)، ۱۲۵-۱۳۱.

بهباد افشار، ک.، عباس زاده شهری، ع.، منصوری، ر.، ۱۳۹۱، ارزیابی خطر لرزه‌ای در منطقه شمال غرب ایران با استفاده از نرم افزار EZ-FRISK (روش احتمالاتی): فصلنامه زمین، ۷(۲۴)، ۱۶۱-۱۷۸.

- Spectra, **28**, 1723-1735, doi:10.1193/1.4000079.
- Boore, D. M., and Atkinson, G. M., 2008, Ground-motion prediction equations for the average horizontal component of PGA, PGV, and 5%-damped PSA at spectral periods between 0.01 s and 10.0 s: *Earthquake Spectra*, **24**(1), 99-138.
- Bozorgnia, Y., Mahmoud, M., Hachem, M. M., and Campbell, K. W., 2010, Ground motion prediction equation ("attenuation relationship") for inelastic response spectra: Proceedings of the 9th U.S. National and 10th Canadian Conference on Earthquake Engineering.
- Brezger, A., and Lang, S., 2006, Generalized structured additive regression based on Bayesian P-splines: *Computational Statistics and Data Analysis*, **50**(4), 967-991.
- Campbell, K. W., 1982, Bayesian analysis of extreme earthquake occurrences Part I Application to the San Jacinto fault zone of southern California: *Bulletin of the Seismological Society of America*, **73**, 1099-1115.
- Campbell, K. W., 1983, Bayesian analysis of extreme earthquake occurrences. Part II. Probabilistic hazard model: *Bulletin of the Seismological Society of America*, **72**, 1689-1705.
- Campbell, K. W., and Bozorgnia, Y., 2008, NGA ground motion model for the geometric mean horizontal component of PGA, PGV, PGD and 5% damped linear elastic response spectra for periods ranging from 0.01 to 10 s: *Earthquake Spectra*, **24**(1), 139-17.
- Degroot, M. H., and Schervish, M. J., 2012, *Probability and Statistic*, Forth edition: Pearson.
- Der kiureghian, A., Sackman, J. L., and Hong, K. J., 1999, Interaction in inter
- در ایران و برآورد مقادیر بیشینه شتاب برای مراکز استان‌ها: *مجله فیزیک زمین و فضا*، ۴۰(۴) ۳۸-۱۵.
- موسوی شوشتری، س. م. ت.، سیدین، س. ع. ر. ۱۳۹۸، ارزیابی تهدید اهداف هوایی با استفاده از مدل احتمالاتی قاعده مبنا: فصلنامه علمی- پژوهشی فرماندهی و کنترل، ۳(۲)، ۲۲-۱.
- میرزائی، ن.، قیطانچی، م. ر.، ناصریه، س.، رئیسی، م.، ظریفی، ز.، طبائی، ق.، ۱۳۸۱، پارامترهای مبنایی زمینلرزه‌های ایران: انتشارات دانش‌نگار، ۱۸۴ ص.
- Abrahamson, N. A., 2006, Seismic hazard assessment: problems with current practice and future development: Proceeding of the 1st European Conference on Earthquake Engineering and Seismology (ECEES), Geneva, Switzerland.
- Ambraseys, N. N., 1975, *Studies in historical seismicity and tectonics Geodynamics today*: Royal Society, London, 7-16.
- Ambraseys, N. N., 1988, Engineering seismology, Mallet-Milne lecture, Special Issue: *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, **17**, 1-105.
- Ambraseys, N. N., 2001, Reassessment of earthquakes, 1900-1999, in the Eastern Mediterranean and Middle East: *Geophysical Journal International*, **145**, 471-485.
- Ambraseys, N. N., and Jackson, J. A., 1998, Faulting associated with historical and recent earthquakes in the Eastern Mediteranean region: *Geophysical Journal International*, **133**, 390-406.
- Ambraseys, N. N., and Melville, C. P., 1982, *A history of Persian earthquakes*: Cambridge university press, London.
- Bommer, J. J., 2012, *Challenges of building logic trees for probabilistic seismic hazard analysis*: *Earthquake*



- connected electrical substation equipment subjected to earthquake ground motion: University of California, Berkeley.
- Eldin, N. N., and Eldrandly, K. A., 2004, A Bayesian Belief Network analysis of factors influencing wildfire occurrence in Swaziland aided system for site selection of major capital investment: 1st ASCAAD International Conference, e-Design in Architecture, Dhahran, Saudi Arabia.
- Eslami, M., Taghizadeh-Farahmand, F., and Afsari, N., 2020, Evaluation of deterministic seismic hazard via fuzzy logic system in Northwest of Iran, Tabriz city: The 19th Iranian Geophysical Conference, 1434-1437.
- Frei, R., and Pagan, A., 2011, Sign restrictions in structural vector autoregressions: A Critical Journal of Economic Literature, **49**(4), 938-960.
- Galanis, O. C., Tsapanos, T. M., Papadopoulos, G. A., and Kiratzi, A. A., 2002, Bayesian extreme values distribution for seismicity parameters assessment in South America: Journal of the Balkan Geophysical Society, **5**(3), 77-86.
- Gardner, J. K., and Knopoff, L., 1974, Is the sequence of earthquakes in Southern California, with aftershocks removed, Poissonian: Bulletin of the Seismological Society of America, **64**, 1363-1367.
- Ghodrati Amiri, G., Mahdavian, A., and Manouchehri Dana, F., 2007, Attenuation relationships for Iran: Journal of Earthquake Engineering, **11**(4), 469-492, doi:10.1080/13632460601034049.
- Ghodrati-Amiri, G., Rahimi, M. A., Razeghi, H. R., and Razavian Amrei, S. A., 2011, Evaluation of horizontal seismic hazard of Tabriz, Iran: International Journal of Earth Sciences and Engineering, **6**, 196-199.
- Hamzehloo, H., Alikhanzadeh, A., Rahmani, M., and Ansari, A., 2012, Seismic hazard maps of Iran: Proceedings of the 15th World Conference on Earthquake Engineering, Lisbon, Portugal.
- Inoue, A., and Kilian, L., 2013, Inference on impulse response functions in structural: VARM Journal of Econometrics, **177**(1), 1-13.
- ISC, 2020, International Seismological Center EHB bulletin Thatcham UK., <http://www.isc.ac.uk>, accessed October 2020.
- Jackson, J., Haines, J. and Holt, W., 1995, The accommodation of Arabia-Eurasia plate convergence in Iran, Journal of Geophysics Resarche., **100**, 15205-15219.
- Kassawara, R., and Sandell, L., 2006, Truncation of the lognormal distribution and value of the standard deviation for ground motion models in the Central and Eastern United States, EPRI RP 1013105, Department of Energy, Norman A. Abrahamson, Inc.
- Kijko, A., 2011, Introduction to Probabilistic Seismic Hazard Analysis, in Gupta, H., ed., Encyclopedia of Solid Earth Geophysics: Springer.
- Kijko, A., Smith, A., and Sellevoll, M. A., 2016, Estimation of earthquake hazard parameters from incomplete data files, Part III, Incorporation of uncertainty of earthquake-occurrence model: Bulletin of the Seismological Society of America, **106**(3), 1210-1222.
- Koski, T., and Noble, J. M., 2009, Bayesian Networks: An Introduction, first edition: John Wiley & Sons.
- Kowsari M., Halldorsson, B., Hrafnkelsson, B., et al., 2019, Calibration of ground motion models to Icelandic peak ground acceleration data

- using Bayesian Markov Chain Monte Carlo simulation: *Bulletin of Earthquake Engineering*, **17**, 2841–2870, doi: 10.1007/s10518-019-00569-5.
- Kowsari, M., Sonnemann, T., Halldorsson, B., Hrafinkelsson, B., Snæbjörnsson, J., and Jonsson, S., 2020, Bayesian inference of empirical ground motion models to pseudo-spectral accelerations of South Iceland seismic zone earthquakes based on informative priors: *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, **132**, 106075. doi:10.1016/j.soildyn.2020.106075.
- Lyubushin, A., and Parvez, I., 2010, Map of seismic hazard of India using Bayesian approach: *Natural Hazards*, **55**, 543–556.
- Lyubushin, A., Tsapanos, T. M., Pisarenko, V. F., and Koravos, G. C., 2002, Seismic hazard for selected sites in Greece: a Bayesian estimates of seismic peak ground acceleration: *Natural Hazards*, **25**(1), 83–89.
- Mirzaei, N., Gao, M., and Chen, Y. T., 1998, Seismic source regionalization for seismic zoning of Iran: major seismotectonic provinces: *Journal of Earthquake Prediction Research (JEPR)*, **7**, 465-495.
- Mohammadi, H., and Bayrak, Y., 2015, An evaluation of earthquake hazard parameters in the Iranian Plateau on the Gumbel III distribution, *Journal of Seismology*, **20**, 615-628.
- Mohammadi, H., Türker, T., and Bayrak, Y., 2016, A quantitative appraisal of earthquake hazard parameters evaluated from Bayesian approach for different regions in Iranian Plateau: *Pure and Applied Geophysics*, **173**, 1971-1991.
- Mohammadian, M., 2020, Risk-targeted probabilistic seismic hazard analysis for Siraf Port: *Geography and Environmental Hazard*, **9**(34), 19-24.
- Moinfar, A. A., Naderzadeh, A., and Nabavi, M. H., 2012, New Iranian Seismic Hazard Zoning Map for New Edition of Seismic Code and Its Comparison with Neighbor Countries: 15th WCEE, LISBOA.
- Nas, M. A., Lyubushin, A. A., Softa, M. U., and Bayrak, Y. U., 2020, Comparative PGA-driven probabilistic seismic hazard assessment (PSHA) of Turkey with a Bayesian perspective: *Journal of Seismology*, <https://doi.org/10.1007/s10950-020-09940-5>.
- Ommi, S., Zafarani, H., and Smirnov, V. B., 2016, Bayesian estimation of the Modified Omori Law parameters for the Iranian Plateau: *Journal of Seismology*, **20**, 953-970.
- Pisarenko, V. F., and Lyubushin, A. A., 1997, Statistical estimation of maximum peak ground acceleration at a given point of aseismic region: *Journal of Seismology*, **1**(4), 395-405.
- Pisarenko, V. F., and Lyubushin, A. A., 1999, Bayesian approach to seismic hazard estimation: maximum values of magnitudes and peak ground accelerations: *Earthquake Research in China (English Edition)*, **13**(1), 45–57.
- Salahshoor, H., Lyubushin, A., Shabani, E., and Kazemian, J., 2018, Comparison of Bayesian estimates of peak ground acceleration ( $A_{max}$ ) with PSHA in Iran: *Journal of Seismology*, **22**(6), 1515-1527.
- Silva, V., Crowley, H., Pagani, M., Monelli, D., and Pinho, R., 2013, Development of the OpenQuake engine, the Global Earthquake Model's open-source software for seismic risk assessment: *Natural Hazards*, doi:10.1007/s11069-013-0618-x.

- Tavakoli, B., and Ghafory-Ashtiany, M., 1999, Seismic hazard assessment of Iran, Special Issue: *Anali Di Geofisica Journal GSHAP*, **42**, 1013-1021.
- Tayebzadeh Moghadam, N., Malekmohammadi, B., and Yavari, A. R., 2017, Comparing the application of Bayesian modeling and multi criteria decision making method in environmental risk assessment of dams (Case study: Taleghan Dam): *Journal of Environmental Science and Technology*, **19**(4), 423-435.
- Theodulidis, N., and Papazachos, B., 1992, Dependence of strong ground motion on magnitude, distance, site geology and macroseismic intensity: *Soil Dynamics Earthquake Engineering*, **11**, 387-402.
- Tong, X., and Liu, M., 2017, *Probabilistic Graphical Models*, Spring 2017 Lecture 13: Variational Inference: Mean Field Approximation Lecturer: Willie Neiswanger Scribes 10-708.
- Tsapanos, T. M., Galanis, O. C., Koravos, G. C., and Musson, R. M. W., 2002, A method for Bayesian estimation of the probability of local intensity for some cities in Japan: *Annals of Geophysics*, **45**, 657-671.
- Tsapanos, T. M., Lyubushin, A. A., and Pisarenko, V. F., 2001, Application of a Bayesian approach for estimation of seismic hazard parameters in some regions of the Circum-Pacific Belt: *Pure and Applied Geophysics*, **158**, 859-875.
- Uhlig, H., 2005, What are the effects monetary policy on output results form an identification procedure: *Journal Monetary Economics*, **52**(2), 381-419.
- Yadav, R. B. S., Tsapanos, T. M., Bayrak, Y., and Koravos, G. C., 2013a, Probabilistic appraisal of earthquake hazard parameters deduced from a Bayesian approach in the northwest frontier of the Himalayas: *Pure and Applied Geophysics*, **170**(3), 283-297.
- Yadav, R. B. S., Tsapanos, T. M., Tripathi, J. N., and Chopra, S., 2013b, An evaluation of tsunami hazard using Bayesian approach in the Indian: *Ocean Tectonophysics*, **593**, 172-182.
- Yazdani, A., and Kowsari, M., 2013, Bayesian estimation of seismic hazards in Iran: *Scientia Iranica*, **20**(3), 422-430.
- Yazdani, A., and Kowsari, M., 2015, Earthquake ground-motion prediction equations for northern Iran: *Natural Hazards*, **69**(3), 1877-1894.
- Wathayu, W., and Peng, Y., 2004, A Bayesian network based framework for multi-criteria decision making: *Proceeding of Multi-Criteria Decision Making Conference (MCDA 2004)*, Whistler B.C., 6-11.
- Woodward, P., 2011, *Bayesian Analysis Made Simple: An Excel GUI for WinBUGS*: CRC Press.

## Application of bayesian theory in seismology, case study: the north and north-west of Iran

Mehdi Maleki<sup>1</sup> and Zohreh Sadat Riazi Rad<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup> Ph.D. student, Department of Petroleum, Mining and Geophysics Engineerin, Faculty of Civil and Earth Resources Engineering, Central Tehran, Islamic Azad University, Tehran, Iran

<sup>2</sup> Assistant Professor, Department of Geology, Faculty of Basic Science, Chalous Branch, Islamic Azad University, Chalous, Iran

(Received: 12 March 2022, Accepted: 07 June 2022)

### Summary

In probability theory and statistics, Bayes' theorem, describes the probability of an event, based on prior knowledge of conditions that might be related to the event. One of the many applications of the theorem is Bayesian inference, a particular approach to statistical inference. When applied, the probabilities involved in the theorem may have different probability interpretations. With Bayesian probability interpretation, the theorem expresses how a degree of belief, expressed as a probability, should rationally change to account for the availability of related evidence. Bayesian inference is fundamental to Bayesian statistics.

The purpose of this study is a modeling method based on hierarchical structure in prioritizing and providing appropriate solutions to reduce seismic hazards in the Alborz-Azerbaijan province. The basis of the work is based on using natural data and Bayesian statistics which is a powerful tool in modeling both uncertainty and randomness. The method can correctly show the values of peak ground acceleration (PGA) along with the quantities of its distribution function in the region. The input information for the method is seismic catalog from 1900 to 2020 and proper ground motion attenuation law. It should be noted that Iran strong motion network had limited data so that there was a gap of large earthquakes of data. This modeling contains a set of processes and rules for using and specifying variables and relationships between them.

Based on the results of this study, conducted in the northern and north-western parts of Iran, using Iranian Seismological Center data (<http://irsc.ut.ac.ir>) that includes 11 stations in the study area, hazard maps were drawn for PGA over a period of next 50 and 475 years, with the highest acceleration in the Alborz region including Tehran and Zanjan and in the Azerbaijan region including Tabriz and Rasht. The correlation between estimated acceleration values by Bayesian method and the values observed by the accelerometer network of Iran Road, Housing and Urban Development Research Center was  $\alpha=0.95$ . This indicates that the estimated maximum acceleration is in a good agreement with the observed maximum acceleration. According to the results, the southern part of Alborz (Tehran) and the north-western part of Iran (Tabriz) had the highest PGA. Then, the Bayesian method will give favorable results for probability seismic hazard analysis.

The results confirm the uncertainty of different parameters of seismic acceleration. Therefore, all of these parameters calculated, indicate that in the west of the Caspian Sea (Rasht city) the lowest value was allocated. Then, Bayesian method with advantages such as considering the relationship between variables, conditions of uncertainty and high flexibility, has the necessary ability to analyze seismic risk in other parts of Iran. This method can also be used in construction projects. In carrying out such renovations, it is necessary to provide step-by-step protocols and rules guidance for application and specification of variables and relationships between them in designing and correcting the model.

**Keywords:** Bayesian theory, probabilistic method, uncertainty, Alborz-Azerbaijan province, north of Iran, peak ground acceleration (PGA)

---

\*Corresponding author:

[zohrehriazi@iauc.ac.ir](mailto:zohrehriazi@iauc.ac.ir)