

مدل سازی فرکانسی وقوع زلزله‌ها با استفاده از تابع تبدیل فوریه

سید قاسم رستمی^۱ و علی اکبر یحیی آبادی^{۲*}

چکیده	اطلاعات مقاله
<p>برآورد قابل اعتماد و دقیق از دوره بازگشت زلزله‌ها در یک منطقه مشخص، همواره به عنوان چالشی در مهندسی زلزله مطرح بوده است. به طور معمول، از قانون گوتنبرگ-ریشتر برای تعیین فرکانس متوسط رویداد زلزله با بزرگی بیشتر یا مساوی با یک مقدار مشخص استفاده می‌شود. دوره بازگشت حاصل از قانون گوتنبرگ-ریشتر، مقداری متوسط است و تعیین جزئیات کامل از دوره‌های بازگشت شامل دوره‌های کوتاه‌مدت، میان‌مدت و بلندمدت زلزله به کمک این روش امکان‌پذیر نیست. بنابراین در این مطالعه، امکان استفاده از تابع تبدیل فوریه برای مدل‌سازی فرکانسی وقوع زلزله و تعیین فرکانس‌های آن، مورد بررسی قرار گرفته است. بدین منظور، از مجموع توابع سینوسی با مقادیر مختلف دامنه، فرکانس و فاز به عنوان مدل فرکانسی استفاده شد. برای عملی کردن روش پیشنهادی، از کاتالوگ زلزله‌هایی با بزرگی بیشتر از ۳/۸ در مقیاس ناتلی استفاده گردید که در شعاع ۵۰ کیلومتری مرکز شهر بجنورد در دوره ۲۹ ساله منتهی به ابتدای سال ۲۰۱۹ روی داده‌اند. نتایج حاصل از مدل فرکانسی، علاوه بر انطباق خوب با قانون گوتنبرگ-ریشتر، جزئیات کامل‌تری از فرکانس‌های زلزله را در این منطقه برای بزرگی‌های مختلف در اختیار قرار می‌دهد. نتایج این مطالعه نشان‌دهنده همبستگی بالا با ضریب همبستگی ۰/۹۳۷ بین فرکانس‌های رویداد زلزله با فرکانس‌های جزر و مد ماه و خورشید است. مدل فرکانسی نشان می‌دهد که دوره‌های ۲، ۶ و ۱۰ ماه، یک سال و ۲۵ سال، جزء اصلی‌ترین دوره‌های بازگشت زلزله در این منطقه هستند.</p>	<p>دریافت مقاله: ۱۳۹۸/۰۳/۱۸ پذیرش مقاله: ۱۳۹۸/۰۷/۱۷</p> <p>واژگان کلیدی: تبدیل فوریه، گوتنبرگ-ریشتر، مدل فرکانسی، بزرگی زلزله، دوره بازگشت وقوع زلزله.</p>

۱- مقدمه

در پیش‌بینی علمی یک زمین‌لرزه، باید احتمال وقوع زلزله به صورت یک متغیر تصادفی در فرمی قابل‌دسترس بیان شود، به نحوی که ضمن ارائه پنجره زمانی، پنجره مکانی و پنجره بزرگی، قابلیت اعتماد به پیش‌بینی احتمالاتی نیز در آن مشخص باشد [۳].

پیشرفت‌های بشر در خصوص پیش‌بینی زمان و مکان آزاد شدن انرژی و حرکت لایه‌های درونی زمین به نحوی که بتوان از فجایع ناشی از زلزله پیشگیری کرد، بسیار اندک است [۴]. اولین تلاش برای پیش‌بینی علمی زلزله توسط ایشیموتو در سال ۱۹۳۹ انجام شده است [۵]. در دهه شصت قرن بیستم میلادی، مشخص شد که بسیاری از

مخاطرات ناشی از وقوع زلزله‌ها بخشی از رخدادهای اجتناب‌ناپذیر جهان اطراف ما هستند؛ از این رو شناخت الگوی وقوع رویداد زلزله، راهی برای مقابله با این حوادث است. در این خصوص، پیش‌یابی زلزله به منظور کاهش خسارت‌های ناشی از آن در مدیریت بحران در سال‌های اخیر مورد توجه محققان قرار گرفته است [۱]. طبق تعریف آکادمی علوم آمریکا (NAS) و کمیته زمین‌شناسی و پیش‌بینی زمین‌لرزه آمریکا (NRC)، پیش‌بینی زمین‌لرزه با مشخص کردن مکان، زمان و بزرگی زلزله در آینده با یک سطح اطمینان آماری انجام می‌گیرد [۲]. آلن معتقد است

* پست الکترونیک نویسنده مسئول: A.yahyaabadi@ub.ac.ir

۱. مربی، دانشکده فنی و مهندسی، گروه مهندسی نقشه‌برداری، دانشگاه بجنورد
۲. استادیار، دانشکده فنی و مهندسی، گروه مهندسی عمران، دانشگاه بجنورد

وقوع چند زلزله پی‌درپی در یک فاصله زمانی کوتاه یا متوسط بررسی نمی‌شود. در این پژوهش، مدلی جدید برای دامنه بزرگی و اختلاف زمانی بین زمین‌لرزه‌ها، بر مبنای کاتالوگ زلزله‌های روی داده در یک منطقه مشخص، با استفاده از تابع تبدیل فوریه ارائه می‌شود. در تحقیقات گذشته که در حوزه مهندسی زلزله انجام گردیده، از تابع تبدیل فوریه در مواردی نظیر بررسی محتوای فرکانسی شتاب‌نگاشت‌ها و شبیه‌سازی حرکات زمین در حوزه فرکانس استفاده شده است [۱۶ و ۱۷]. با این حال، این تابع تاکنون برای پیش‌بینی بزرگی وقوع زلزله و فاصله زمانی بین وقوع زلزله‌های متوالی به کار نرفته است؛ بنابراین توانمندی‌های تابع تبدیل فوریه، ما را بر آن داشت تا در این پژوهش به کمک این روش، جزئیات کامل فرکانس‌های زلزله، شامل تمام فرکانس‌های کوچک، متوسط و بزرگ متناظر با مقادیر مختلف بزرگی زمین‌لرزه را برای منطقه مورد نظر محاسبه کنیم. ارائه جزئیات کامل فرکانس‌های وقوع زلزله در یک منطقه، از مزایای مدل پیشنهادی نسبت به روش گوتنبرگ-ریشر می‌شود.

از داده‌های حاصل از وقوع زمین‌لرزه‌هایی با بزرگی بیشتر از ۳/۸ در شعاع ۵۰ کیلومتری مرکز شهر بجنورد، برای اجرای روش پیشنهادی در این پژوهش استفاده شد. شهر بجنورد طبق نقشه پهنه‌بندی خطر زلزله در استاندارد ۲۸۰۰ ایران، در منطقه‌ای با خطر نسبی زیاد قرار دارد [۱۸]. بررسی‌های بلندمدت نشان می‌دهد به طور متوسط در هر سال، ۳۲ زمین‌لرزه با بزرگی بین ۲/۵ تا ۴ ریشتر و یک زمین‌لرزه با بزرگی حدود ۴ تا ۴/۵ ریشتر در این منطقه رخ داده است [۱۹]. وقوع یک زمین‌لرزه قدرتمند با بزرگی ۶/۸ در مقیاس امواج سطحی در روز سه‌شنبه ۱۶ بهمن ۱۳۷۵ (برابر با ۲۵ رمضان ۱۴۱۷ و ۴ فوریه ۱۹۹۷) در ۲۵ کیلومتری شمال بجنورد، باعث شده است تا امروزه تحقیقات دقیق‌تری روی فعالیت گسل‌های این منطقه انجام شود [۲۰]. در سال‌های اخیر نیز زلزله‌ای با بزرگی ۵/۷ در مقیاس ریشتر در روز شنبه ۲۳ اردیبهشت ۱۳۹۶ (برابر با ۱۶ شعبان ۱۴۳۸ و ۱۳ می ۲۰۱۷) در شمال بجنورد به وقوع پیوست [۲۱]. از بررسی فرکانس‌های به دست آمده برای وقوع زمین‌لرزه در منطقه بجنورد که مطابق روش پیشنهادی در این پژوهش محاسبه شده است، می‌توان به نتایج قابل توجهی در خصوص دوره بازگشت زلزله‌ها در این منطقه دست یافت.

فرایندهای به‌ظاهر پیچیده و تصادفی طبیعی نظیر زمین‌لرزه، می‌تواند با معادلات غیرخطی و نه چندان پیچیده و با درجات آزادی محدود، مدل‌سازی شود. به‌طور کلی با سه روش تحلیل آماری، مشاهده تغییرات رخداد‌های قبلی و مدل‌سازی فیزیکی فرایند زلزله، می‌توان به پیش‌بینی زلزله به‌صورت کوتاه‌مدت و بلندمدت دست پیدا کرد [۶]. از روش‌های تحلیل آماری، می‌توان به بررسی توزیع فرکانس-بزرگی زلزله‌ها اشاره کرد [۷]. همچنین با توجه به زلزله‌های رخ داده در یک چشمه زمین‌لرزه، می‌توان از روش الگوی فرایند پواسون (غیرهمگن)، روش نیمه مارکوف (روش پارامتری برآورد دوره بازگشت زلزله)، روش اطلاعات الگو (Pattern Information, PI) و روش شدت نسبی (Relative Intensity, RI) استفاده کرد [۱ و ۶].

برخی مطالعات در حوزه پیش‌بینی علمی زلزله، از ابزارهایی نظیر تحلیل طیفی، شبکه عصبی و الگوی آشوب برای بررسی تغییرات پیش‌نشانگرهای زمین‌لرزه استفاده کرده‌اند. به‌عنوان مثال، می‌توان به مطالعه تغییرات شدید چگالی محتوای الکترون برای ۲ تا ۴ روز قبل از وقوع زلزله ۸ و [۹] و تغییرات ناگهانی گرانش در نزدیکی گسل‌ها در فاصله ۲ تا ۳ سال قبل از وقوع زلزله‌های بزرگ [۱۰] اشاره کرد. همچنین بررسی زمانی حرکات زمین در اطراف گسل‌ها برای پیش‌بینی بلندمدت، میان‌مدت و کوتاه‌مدت وقوع مجدد زمین‌لرزه در یک منطقه، قابل استفاده است [۱۱]. اولین تلاش برای تعیین دوره بازگشت زلزله، استفاده از کاتالوگ زلزله‌های رخ داده بر مبنای روش‌هایی نظیر قانون گوتنبرگ-ریشر است که در سال ۱۹۴۲ پیشنهاد شده است [۱۲ و ۱۳]. در قانون گوتنبرگ-ریشر، دوره بازگشت متوسط رویداد زلزله با بزرگی بیشتر از یک مقدار مشخص در یک بازه زمانی، به کمک تابع نمایی برآورد می‌شود. بسیاری از تحقیقات، مقادیر ضرایب این مدل را تحت تاثیر عوامل مختلف برای هر منطقه محاسبه می‌کنند. به‌عنوان مثال، می‌توان به پیش‌بینی فواصل زمانی زمین‌لرزه به کمک شبکه‌های عصبی اشاره کرد [۱۴]. قانون گوتنبرگ-ریشر یکی از قدیمی‌ترین و در عین حال ساده‌ترین روش‌ها در برآورد دوره بازگشت زلزله است. در قانون گوتنبرگ-ریشر، پس از حذف پس‌لرزه‌ها و پیش‌لرزه‌های منتسب به زلزله‌های اصلی، تنها زلزله‌های اصلی در مدل‌سازی مورد استفاده قرار می‌گیرند [۱۵]. بنابراین در این روش، احتمال

$$\Delta d(t) = b_0 + \sum_{i=1}^n b_i \sin(2\pi f_i t + \phi_i) \quad (2)$$

در این رابطه، b_i دامنه، f_i فرکانس، ϕ_i فاز و b_0 مقدار ثابت در تبدیل فوریه معکوس گسسته [۲۴] برای برآورد فاصله زمانی بین دو زلزله است. همان طور که مشاهده می‌شود، مجهولات این مدل با مدل بزرگی زلزله متفاوت در نظر گرفته شده است؛ زیرا ممکن است هر مدل از دامنه و فرکانس خاصی پیروی کند. این ضرایب نیز می‌تواند از تعداد مشخصی زلزله برای یک بازه زمانی برآورد شود.

با وجود دو مدل برای بزرگی و فاصله زمانی بین دو زلزله، می‌توان از تلاقی دو مدل با یکدیگر، فاصله زمانی تا زلزله های بعدی و بزرگی آن‌ها را براساس الگوی رویداد زلزله در گذشته پیش‌بینی کرد. بدین منظور، کافی است زمان را بعد از آخرین زمین‌لرزه روی داده، به تدریج و روزبه‌روز افزایش دهیم و برای هر مقدار زمان (یعنی هر مقدار t)، برآورد فاصله زمانی را از رابطه (۲)، Δd و مقدار واقعی آن را با توجه به فاصله زمانی با آخرین رویداد زلزله، Δt محاسبه کنیم. اگر اختلاف بین این دو مقدار (Δd و Δt) در حد خطای برآورد مدل (۴ تا ۶ روز) باشد، می‌توان بزرگی زلزله بعدی را طبق رابطه (۱) و با توجه به مقدار t حاصل از رابطه (۲) به دست آورد. در رابطه (۳)، بسط مرتبه اول تیلور [۲۵] از مدل فرکانسی برای بزرگی بیان شده است. با انتخاب مقادیر تقریبی برای مجهولات و با تکرار حل معادله ۴ می‌توان به مقادیر دقیق برای مجهولات دست پیدا کرد. به‌طور مشابه از همین روش برای مدل فرکانسی اختلاف زمان نیز استفاده شد.

$$[M_1 - M_1, M_2 - M_2, \dots, M_n - M_n]^T = \begin{bmatrix} a_0 - a_0. \\ a_1 - a_1. \\ f_1 - f_1. \\ \phi_1 - \phi_1. \\ a_2 - a_2. \\ f_2 - f_2. \\ \phi_2 - \phi_2. \\ \vdots \\ a_n - a_n. \\ f_n - f_n. \\ \phi_n - \phi_n. \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$\begin{bmatrix} 1 & x_1 & y_1 & z_1 & \dots & z_n \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & x_n & y_n & z_n & \dots & z_n \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$\Delta Y_{n \times 1} = A_{n \times m} \Delta X_{m \times 1} \Rightarrow \Delta X = (A^T A)^{-1} A^T \Delta Y \quad (4)$$

۲- مدل‌سازی فرکانسی با استفاده از تابع تبدیل فوریه

با توجه به توانایی تابع تبدیل فوریه، از آن می‌توان به‌عنوان یکی از پرکاربردترین ابزارهای ریاضی برای استفاده در زمینه‌های مختلف علمی نام برد. تبدیل فوریه، سری زمانی داده‌ها را در حوزه فرکانس نمایش می‌دهد و اطلاعاتی را در خصوص اینکه کدام فرکانس‌ها حائز اهمیت بیشتری هستند، به دست می‌دهد [۲۲ و ۲۳]. در این روش باید از سری داده‌های زمانی منظم استفاده شود.

با توجه به اینکه زلزله‌هایی با فاصله زمانی منظم و مشخص در یک مکان وجود ندارد، با داده‌های ناهمگن روبه‌رو هستیم. به همین دلیل، در این پژوهش به‌منظور مدل‌سازی بزرگی زلزله‌های به وقوع پیوسته به‌صورت یک تابع زمانی، تابع داده‌های گسسته سری زمانی (که دارای چند فرکانس بازگشت است) توسعه داده شد. در این تابع که از ترکیب توابع موج سینوسی با دامنه a_i ، فرکانس f_i و فاز ϕ_i تشکیل شده است، می‌توان مجهولات (دامنه‌ها، فرکانس‌ها و فازها) را با روش کمترین مربعات خطا به دست آورد. به عبارت دیگر، اگر بزرگی زلزله (M) به‌عنوان تابع مورد برازش باشد، می‌توان آن را به‌صورت زیر مدل‌سازی کرد:

$$M(t) = a_0 + \sum_{i=1}^n a_i \sin(2\pi f_i t + \phi_i) \quad (1)$$

سمت راست معادله (۱)، رابطه مربوط به تبدیل فوریه معکوس گسسته است [۲۴] که در این پژوهش از آن برای مدل‌سازی بزرگی زلزله برحسب زمان، $M(t)$ ، استفاده شده است. برای تعیین هریک از پارامترهای دامنه، فرکانس و فاز در رابطه (۱)، باید تعداد کافی از رکوردهای زلزله در یک بازه زمانی با توجه به تعداد فرکانس‌های موردنظر در اختیار باشد. به‌عنوان مثال، اگر در یک بازه زمانی ۵۰ ساله، ۱۵۰ زلزله بالای ۴ داشته باشیم، می‌توان حداکثر ۴۹ فرکانس برای این زلزله‌ها در این بازه زمانی تعیین کرد (یک‌سوم تعداد زلزله‌ها منهای یک). همان طور که گفته شد، روش تعیین این ضرایب برای حالتی که تعداد زلزله‌ها بیشتر از پارامترهای مجهول باشد، برآورد کمترین خطای مربعات است. به‌طور مشابه، از روش مدل‌سازی فرکانسی برای برآورد فاصله زمانی بین دو زلزله نیز استفاده شد. فاصله زمانی بین دو زلزله برحسب روز، $\Delta d(t)$ می‌تواند به‌صورت زیر مدل‌سازی شود:

متعدد همراه با گسلش سطحی، نشانگر آن است که کمربند چین خورده کپه‌داغ از زمان بازپسین فعالیت‌های آپی تاکنون تحرک داشته و موجب ویرانی شهرهایی مانند قوچان شده است. به عقیده مکنزی، زون لرزه‌خیز کپه‌داغ، ادامه جنوب شرقی نوار لرزه‌خیز قفقاز- خزر است [۲۷]. نقشه گسل‌های فعال اطراف شهر بجنورد همراه با رومرکز زلزله‌های دستگاهی و تاریخی با بزرگی بیشتر از ۴ در شکل (۱) نمایش داده شده است.

با توجه به کمبود اطلاعات مربوط به آمار زلزله‌های دستگاهی و تاریخی و همچنین خطای موجود در تعیین رومرکز زلزله‌ها، در حال حاضر محاسبه پارامترهای مدل فرکانسی برای هر یک از گسل‌ها به‌طور جداگانه امکان‌پذیر نیست؛ بنابراین به‌ناچار باید پارامترهای تبدیل فوریه را برای مجموعه گسل‌های واقع در یک محدوده جغرافیایی که از اطلاعات کافی برخوردار است، محاسبه کرد. نظر به اهمیت شهر بجنورد در استان خراسان شمالی، در این پژوهش از اطلاعات موجود در شعاع ۵۰ کیلومتری این شهر استفاده شد. این محدوده جغرافیایی ضمن اینکه فعالیت لرزه‌خیزی تمام گسل‌های نزدیک شهر بجنورد از جمله گسل‌های عبدال آباد، یکه شاخ، ناوه، بابا امان، قاضی، توده، زوزام، کی کی و کیکانلو را دربر می‌گیرد، از اطلاعات آماری ثبت‌شده کافی برای استخراج پارامترهای تبدیل فوریه برخوردار است.

شایان ذکر است استفاده از محدوده جغرافیایی بزرگ‌تر برای استخراج پارامترهای مدل فرکانسی، می‌تواند به عدم تطابق در فرکانس‌های به‌دست‌آمده از چند چشمه لرزه‌ای مختلف منجر شود. به عبارت دیگر، الگوی متفاوت فعالیت لرزه‌ای در گسل‌های مختلف، سبب بروز فرکانس‌های مختلف ناشی از نحوه آزاد شدن انرژی در هر گسل خواهد شد. بنابراین برای تعیین پارامترهای مدل فرکانسی، باید در حد امکان از داده‌های مربوط به تعداد چشمه‌های کمتر و با فعالیت لرزه‌خیزی یکسان استفاده کرد. از طرف دیگر، با کوچک‌تر کردن محدوده جغرافیایی، به دلیل عدم دسترسی به اطلاعات ثبت‌شده کافی از زلزله‌ها، برآورد پارامترهای تبدیل فوریه مقدور نخواهد بود. از این رو در این پژوهش، شعاع ۵۰ کیلومتر به‌عنوان حداقل شعاع ممکن که دربرگیرنده اطلاعات کافی از زلزله‌های ثبت‌شده است، انتخاب گردید. از سوی دیگر، با توجه به کمبود ابزارهای دقیق اندازه‌گیری، دقت اطلاعات مربوط به زلزله‌های قبل از سال ۱۹۷۶ در این منطقه مطلوب نیست و دارای

در رابطه (۳) اندیس n بر تقریب اولیه از پارامترهای مجهول (مقادیر دامنه، فرکانس‌ها و زوایای اختلاف فاز) دلالت دارد که با تکرار ماتریسی طبق رابطه (۴) به مقادیر دقیق برای پارامترهای مجهول همگرا خواهد شد. مقادیر M_l تا M_n مقادیر بزرگی زلزله‌ها طبق کاتالوگ و مقادیر M_l تا M_n مقادیر بزرگی در نقطه $t=0$ طبق مدل سازی فرکانسی است. مقادیر x_i ، y_i و z_i به صورت زیر تعیین می‌شوند:

$$\begin{aligned} x_i &= \sin(2\pi f_i t + \varphi_i) \\ y_i &= 2a_i \pi t \cos(2\pi f_i t + \varphi_i) \\ z_i &= a_i \cos(2\pi f_i t + \varphi_i) \end{aligned} \quad (5)$$

پس از برآورد پارامترهای مدل فرکانسی، نتایج حاصل از مدل فرکانسی، با نتایج حاصل از مدل گوتنبرگ-ریشتر مقایسه می‌شود.

مدل گوتنبرگ-ریشتر، مدلی ریاضی برای تخمین دوره‌های بازگشت زلزله‌ها با بزرگی یا شدت مشخص است [۱۷]. این رابطه بیان می‌کند که بین لگاریتم تعداد متوسط زلزله‌های سالیانه و بزرگی زلزله، رابطه‌ای خطی وجود دارد. مدل گوتنبرگ-ریشتر مورد استفاده در این پژوهش که براساس مطالعات انجام‌شده بر داده‌های تاریخی و دستگاهی شهر بجنورد استخراج شده، در رابطه (۶) بیان گردیده است [۲۰]:

$$\log(N) = 3.296 - 0.68M \quad (6)$$

در این رابطه، N تعداد متوسط زلزله‌های با بزرگی بیشتر و یا مساوی M در طول یک سال است. دوره بازگشت برای یک بزرگی مشخص، از معکوس تعداد متوسط زلزله‌های سالیانه به دست می‌آید [۱۷].

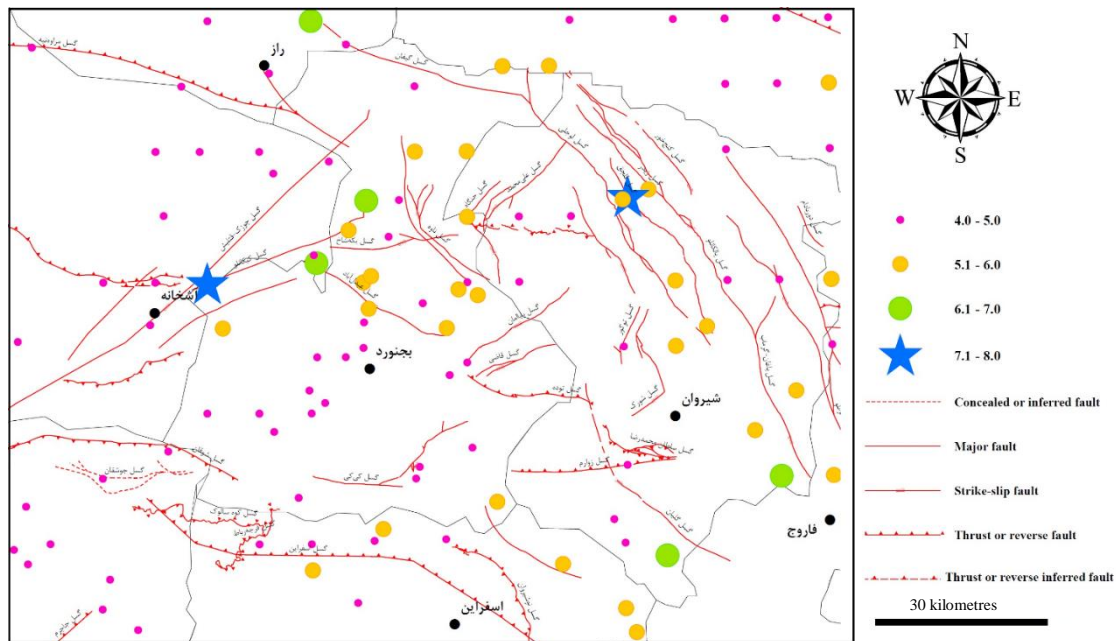
شایان ذکر است رابطه گوتنبرگ-ریشتر برای محاسبه نرخ وقوع متوسط زلزله‌ها کاربرد دارد و توزیع زمانی رویداد زلزله‌ها را پوشش نمی‌دهد. استفاده از مدل‌های پیش‌بینی، نظیر مدل پواسون برای بیان احتمال وقوع رویدادهای آینده ضروری است. مدل‌های پیش‌بینی معمولاً بر تئوری فرایندهای تصادفی و نه بر برون‌یابی اطلاعات گذشته، استوار هستند. با این حال، در این مدل‌ها از اطلاعات گذشته برای برآورد پارامترهای مورد نیاز در مدل، نظیر نرخ وقوع متوسط استفاده می‌شود [۲۶].

۳- داده‌های مورد استفاده

استان خراسان شمالی از دیدگاه زمین‌شناسی در پهنه ساختاری-رسوبی کپه‌داغ قرار دارد. رخداد زمین‌لرزه‌های

از تراکم کافی برخوردار نیست و نمی‌توان در مدل‌سازی از آن‌ها استفاده کرد.

خطاهای مکانی، زمانی و بزرگی است؛ بنابراین اتکا به این داده‌ها موجب وارد شدن خطا در مدل فرکانسی و نتایج آن می‌شود. ضمناً داده‌های بین سال‌های ۱۹۷۶ تا ۱۹۹۰ نیز



شکل ۱- نقشه گسل‌های اطراف بجنورد و محل وقوع زمین‌لرزه‌ها در این منطقه (اقتباس از مرجع [۲۰])

زمانی و مکانی حاصل شد که طبقه‌بندی تعداد زلزله‌ها برحسب بزرگی در جدول ۱ ارائه شده است. اطلاعات مربوط به ۵۷ زلزله مورد استفاده در این پژوهش شامل بزرگی زلزله و زمان وقوع آن، در جدول ۲ آمده است. در این جدول، همچنین با در نظر گرفتن مبدأ زمان در تاریخ اولین رویداد کاتالوگ، فاصله زمانی سایر زلزله‌ها از این مبدأ و همچنین فاصله زمانی هر زلزله با زلزله قبلی خود برحسب تعداد روز مشخص شده است.

جدول ۱- تعداد زلزله‌های رخ داده در دوره ۲۹ ساله از اول مارس ۱۹۹۰ (فروردین ۱۳۶۹) در شعاع ۵۰ کیلومتری شهر

بجنورد

دامنه بزرگی در مقیاس ناتلی	تعداد رخداد زلزله
۳/۸ - ۴/۴	۳۳
۴/۵ - ۴/۹	۱۷
۵/۰ - ۵/۴	۵
۵/۵ - ۶/۵	۲

۴- تبدیل مقیاس‌های بزرگی زلزله

گزارش‌های مختلف مراجع جهانی از هر زلزله و محدودیت‌های در نظر گرفته شده برای هر واحد بزرگی، باعث شده است از یک مقیاس واحد برای بیان بزرگی زلزله استفاده

در انتخاب کران پایین بزرگی زلزله، برای استفاده در برآورد پارامترهای مدل فرکانسی (با توجه به محدودیت اطلاعات ثبت‌شده مربوط به زلزله‌های مخرب دستگاهی) دو نکته به‌طور هم‌زمان مد نظر قرار گرفت؛ اولاً، کران پایین بزرگی به نحوی انتخاب شد که تعداد رویداد کافی با بزرگی بیشتر از کران پایین برای برآورد پارامترهای مدل فرکانسی موجود باشد. ثانیاً، از انتخاب داده‌هایی با بزرگی‌های خیلی کوچک که منجر به افزایش پیچیدگی مدل و ظهور فرکانس‌های بلند (پریود کوتاه کمتر از ۲ ماه) در مدل می‌شود، پرهیز گردید. بنابراین با توجه به نتایج پیش‌محاسبات اولیه مبنی بر کیفیت آمار زلزله‌های با بزرگی بیشتر از ۳/۸ از سال ۱۹۹۰ تا ابتدای سال ۲۰۱۹ برای استفاده در مدل‌سازی فرکانسی، بزرگی ۳/۸ به‌عنوان کران پایین بزرگی زلزله در این مطالعه در نظر گرفته شد. داده‌ها از دو مرجع مؤسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران و مرکز تحقیقات راه و شهرسازی استخراج شده است [۲۸ و ۲۹].

به‌منظور پرهیز از اثر تکینگی ماتریس ضرایب مجهولات در مدل فرکانسی، زلزله‌هایی با فاصله زمانی کوتاه از کاتالوگ زلزله‌ها حذف شدند (حداقل فواصل زمانی ۳ روز بین داده‌ها به دست آمد). در نهایت، تعداد ۵۷ زلزله در محدوده

[۳۰-۳۲]. به‌عنوان یک روش جایگزین و مناسب در این پژوهش، از مدل‌سازی خطی بین مقادیر بزرگی به کمک داده‌های موجود در منطقه که گزارش آن‌ها برحسب واحدهای مختلف بزرگی در دسترس است، استفاده شد. بدین منظور، به کمک ۱۲ زلزله که در منطقه مورد مطالعه بجنورد به وقوع پیوسته و بزرگی آن‌ها برحسب هر چهار واحد M_n ، M_b ، M_L و M_S گزارش شده است، مدل‌های مناسب محلی برای تبدیل بزرگی به دست آوردیم. مقادیر ضرایب این مدل‌ها از طریق برآورد کمترین خطای مربعات همراه با ریشه مربعی متوسط (rms) به دست آمده‌اند:

$$M_n = 1.0336M_b - 0.0455 \mp 0.12 \quad (7)$$

$$M_n = 0.5088M_L + 2.4515 \mp 0.24 \quad (8)$$

$$M_n = 0.7258M_S + 1.8592 \mp 0.14 \quad (9)$$

نشود. برای بیشتر رویدادهای زلزله مورد بررسی در این پژوهش، تنها یکی از مقیاس‌های بزرگی گزارش شده است؛ بنابراین لازم است به‌منظور تجمیع و تدوین کاتالوگ، با بهره‌گیری از روابط مناسب تبدیل بزرگی، به یک بیان یکنواخت از بزرگی زلزله دست یافت. مقیاس‌های گزارش شده در بازه زمانی و محدوده مکانی مورد مطالعه در این پژوهش، شامل مقیاس امواج درونی، M_b ، مقیاس امواج محلی، M_L ، مقیاس امواج سطحی، M_S و مقیاس ناتلی، M_n است. بعضی روابط ارائه شده برای تبدیل بین این واحدها، برحسب زلزله‌های روی داده در مناطق بزرگ، به‌صورت کلی بیان شده‌اند. در نشریه ۶۲۶ معاونت نظارت راهبردی رئیس جمهور پیشنهاد شده است از روابط اسکردیلیس، شجاع طاهری و EMEE (۲۰۱۱) برای فلات ایران استفاده شود

جدول ۲- زلزله‌های بزرگ‌تر از ۳/۸ در دوره ۲۹ ساله از ابتدای ۱۹۹۰ میلادی (۱۳۶۹ شمسی) در شعاع ۵۰ کیلومتری بجنورد

تاریخ میلادی وقوع زمین‌لرزه			ساعت جهانی	بزرگی M_n	زمان از مبدا (روز)	فاصله از زلزله قبل (روز)
سال	ماه	روز				
۱۹۹۰	۴	۱۰	۲۰/۳۱۴	۴/۳	۰	۰
۱۹۹۱	۴	۱	۳/۶۷۱	۴/۶	۳۵۵/۳۱	۳۵۵/۳۱
۱۹۹۲	۹	۹	۱۹/۴۶۰	۴/۵	۸۸۲/۹۶	۵۲۷/۶۶
۱۹۹۳	۱	۶	۱۷/۲۸۲	۴/۷	۱۰۰۱/۹	۱۱۱۸/۹۱
۱۹۹۳	۲	۱۸	۴/۲۵۱	۴/۹	۱۰۴۴/۳	۴۲/۴۵۷
۱۹۹۷	۲	۴	۹/۸۹۹	۵/۴	۲۴۹۱/۶	۱۴۴۷/۲
۱۹۹۷	۲	۴	۱۰/۶۳۰	۶/۲	۲۴۹۱/۶	۰/۰۳۰۵
۱۹۹۷	۲	۵	۷/۸۹۶	۵/۳	۲۴۹۲/۵	۰/۸۸۶۱
۱۹۹۷	۲	۱۸	۱۸/۰۲۷	۴/۳	۲۵۰۵/۹	۱۳/۴۲۲
۱۹۹۷	۳	۳	۱۳/۰۲۷	۴/۱	۲۵۱۸/۷	۱۲/۷۹۲
۱۹۹۷	۴	۵	۱۸/۷۳۷	۴/۸	۲۵۵۱/۹	۳۳/۲۳۸
۱۹۹۷	۴	۲۵	۸/۶۸۱	۳/۹	۲۵۷۱/۵	۱۹/۵۸۱
۱۹۹۷	۸	۴	۱۱/۷۰۰	۵/۳	۳۰۷/۶	۴۶۶/۱۳
۱۹۹۸	۸	۲۷	۲۱/۳۹۸	۴/۲	۳۰۶۱	۲۳/۴۰۴
۱۹۹۹	۲	۱۶	۱۹/۳۴۷	۳/۹	۳۲۳۴/۰	۱۷۲/۹۱
۱۹۹۹	۴	۵	۱۷/۰۷۱	۳/۸	۳۲۸۱/۹	۴۷/۹۰۵
۱۹۹۹	۴	۲۴	۹/۳۷۷	۴/۱	۳۳۰۰/۵	۱۸/۶۷۹
۲۰۰۱	۳	۹	۱/۲۶۵	۳/۹	۳۹۸۵/۲	۶۸۴/۶۶
۲۰۰۳	۹	۱۵	۱۸/۲۶۴	۴	۴۹۰۵/۹	۹۲۰/۷۱
۲۰۰۳	۱۱	۱۸	۵/۶۲۸	۴/۵	۴۹۶۹/۴	۶۳/۴۷۴

ادامه جدول ۲- زلزله‌های بزرگ‌تر از ۳/۸ در دوره ۲۹ ساله از ابتدای ۱۹۹۰ میلادی (۱۳۶۹ شمسی) در شعاع ۵۰ کیلومتری بجنورد

تاریخ میلادی وقوع زمین‌لرزه			ساعت جهانی	بزرگی M_N	زمان از مبدا (روز)	فاصله از زلزله قبل (روز)
سال	ماه	روز				
۲۰۰۳	۱۲	۲۲	۱۹/۲۱۸	۴/۸	۵۰۰۴/۰	۳۴/۵۶۶
۲۰۰۴	۸	۲۱	۳/۵۴۵	۴/۷	۵۲۴۶/۳	۲۴۲/۳۵
۲۰۰۵	۳	۲	۲۲/۰۸۶	۳/۸	۵۴۴۰/۱	۱۹۳/۷۷
۲۰۰۵	۸	۱۷	۲۰/۹۲۴	۴/۴	۵۶۰۸	۱۶۷/۹۵
۲۰۰۵	۱۲	۲۰	۰/۱۸۶	۴/۱	۵۷۳۲/۲	۱۲۴/۱۴
۲۰۰۶	۹	۱۶	۱۰/۷۱۵	۴/۷	۶۰۰۲/۶	۲۷۰/۴۴
۲۰۰۷	۸	۲۰	۴/۸۹۲	۴/۱	۶۳۴۰/۴	۳۳۷/۷۶
۲۰۰۹	۱	۱۳	۳/۷۵۰	۳/۸	۶۸۵۲/۳	۵۱۱/۹۵
۲۰۰۹	۹	۱۱	۲۰/۸۸۴	۴/۰	۷۰۹۴/۰	۲۴۱/۷۱
۲۰۱۰	۷	۲۳	۰/۹۴۵	۴/۶	۷۴۰۸/۲	۳۱۴/۱۷
۲۰۱۰	۸	۱۱	۱۷/۴۳۹	۵/۰	۷۴۲۷/۹	۱۹/۶۸۷
۲۰۱۱	۴	۳	۱۷/۵۴۲	۴/۱	۷۶۶۲/۹	۲۳۵/۰
۲۰۱۱	۶	۱۷	۱۹/۹۲۸	۴/۰	۷۷۳۸/۰	۷۵۰/۹۹
۲۰۱۱	۶	۲۸	۲/۱۳۱	۳/۸	۷۷۴۸/۲	۱۰/۲۵۸
۲۰۱۱	۱۱	۷	۵/۸۴۷	۳/۸	۷۸۸۰/۴	۱۳۲/۱۵
۲۰۱۱	۱۲	۸	۲۰/۰۷۶	۴/۵	۷۹۱۲/۰	۳۱/۵۹۳
۲۰۱۱	۱۲	۲۶	۱/۸۲۰	۴/۲	۷۹۲۹/۲	۱۷/۲۳۹
۲۰۱۲	۴	۱۶	۴/۳۷۲	۴/۰	۸۰۴۱/۳	۱۱۲/۱۱
۲۰۱۳	۲	۱۲	۱۲/۴۴۹	۴/۱	۸۳۴۳/۷	۳۰۲/۳۴
۲۰۱۳	۲	۱۲	۱۷/۶۲۳	۳/۸	۸۳۴۳/۹	۰/۲۱۵۶
۲۰۱۳	۲	۳۰	۲/۰۰۴	۳/۹	۸۴۲۰/۲	۷۶/۳۴۹
۲۰۱۳	۵	۱۰	۱۵/۹۱۹	۴/۲	۸۴۳۰/۸	۱۰/۵۸۰
۲۰۱۵	۸	۳۰	۱۴/۶۴۴	۴/۷	۹۲۷۲/۸	۱۰۲/۷۶
۲۰۱۶	۵	۲۴	۱۷/۸۶۷	۴/۹	۹۵۴۰/۹	۲۶۸/۱۳
۲۰۱۶	۶	۷	۲۲/۰۷۴	۴/۱	۹۵۵۵/۱	۱۴/۱۷۵
۲۰۱۶	۶	۲۹	۲۲/۹۳۷	۴/۹	۹۵۷۷/۱	۲۲/۰۳۶
۲۰۱۶	۷	۱۴	۸/۵۹۴	۴/۳	۹۵۹۱/۵	۱۴/۴۰۲
۲۰۱۶	۱۱	۲	۲۳/۳۸۵	۳/۹	۹۷۰۳/۱	۱۱۱/۶۲
۲۰۱۷	۵	۱۳	۱۸/۰۱۶	۵/۷	۹۸۹۴/۹	۱۹۱/۷۸
۲۰۱۷	۵	۱۹	۱۱/۴۵۷	۴/۱	۹۹۰۰/۶	۵/۷۲۶۷
۲۰۱۷	۱۰	۱۷	۱۸/۸۷۷	۴/۷	۱۰۰۵۲	۱۵۱/۳۱
۲۰۱۸	۳	۲۸	۱۱/۰۶۳	۴/۴	۱۰۲۱۴	۱۶۱/۶۷
۲۰۱۸	۷	۱۷	۳/۹۷۵	۴/۹	۱۰۳۲۴	۱۱۰/۷
۲۰۱۸	۱۱	۱۷	۵/۳۵۴	۳/۸	۱۰۴۴۷	۱۲۳/۰۶

۵- یافته‌ها و نتایج

با توجه به روش پیشنهادشده در بخش سوم مقاله، ابتدا به کمک ۵۷ زلزله مندرج در جدول ۲، مدل فرکانسی از داده‌ها برحسب بزرگی زلزله (در مقیاس ناتلی) مطابق روابط ۱، ۳ و ۴ تعیین شد. برای تعیین ضرایب این مدل، از ۱۸ فرکانس با فاز و دامنه‌های

مختلف و یک ضریب ثابت که مجموعاً به ۵۵ مجهول می‌رسد، استفاده گردید. با توجه به غیرخطی بودن رابطه، به حدس اولیه برای مقادیر دامنه، فرکانس و فاز نیاز می‌باشد. برای این منظور، با دسته‌بندی داده‌ها برحسب بزرگی، فواصل زمانی بین زلزله‌ها به دست آمد. سپس مقادیر در دسته‌های مختلف متوسط‌گیری

خطا برابر با ۲۵۸- و ۱۹۲+ روز به دست آمده است. ضرایب این مدل در جدول ۵ و میزان برازش مدل و داده‌های واقعی در شکل های (۵) تا (۷) نشان داده شده است.

۶- دقت و خطای مدل سازی

با توجه به اینکه روش مدل سازی فرکانسی در این مقاله برای بار اول ارائه شده است، برای بررسی خطا و دقت مدل، از ماتریس های دقت (matrix variance-covarianc) استفاده شد. با توجه به رابطه (۴) و به کمک قانون کواریانس‌ها [۳۳]، می‌توان ماتریس‌های دقت را طبق رابطه زیر برای مدل فرکانسی محاسبه کرد:

$$C = A(A^T A)^{-1} A^T \quad (9)$$

جدول ۴- ضرایب مدل برآورد بزرگی زلزله

شماره موج	فاز (درجه)	پریود (روز)	دامنه (a_i) (جزء بزرگی)
۰	-	-	۴/۳۱۴
۱	۱۹۱/۴۱	۰/۳۸۰۰	۰/۱۵۵۴۱
۲	۲۳۷/۷۷	۱/۰۷۵۰	۰/۱۸۱۶۲
۳	۲۰۱/۴۰	۳/۶۰۰۰	۰/۲۳۰۹۴
۴	۱۷۲/۴۸	۹/۰۹۷۰	۰/۲۹۵۵۲
۵	۳۴۹/۲۴	۱۲/۴۹۵	۰/۱۱۳۵۷
۶	۲۱۱/۶۰	۲۷/۵۱۵	۰/۱۲۱۸۶
۷	۱۳۹/۶۳	۴۸/۰۱۲	۰/۱۱۸۹۶
۸	۳۵۹/۸۷	۷۷/۰۳۰	۰/۳۷۱۳۰
۹	۳۴۸/۱۴	۱۲۱/۳۲	۰/۰۹۸۸۶
۱۰	۱۷۷/۷۹	۱۸۱/۰۲	۰/۳۴۲۲۳
۱۱	۱۰۱/۵۲	۲۸۶/۸۵	۰/۱۰۱۵۰
۱۲	۳۳۸/۶۷	۳۲۶/۹۶	۰/۳۲۷۹۲
۱۳	۱۸۲/۳۵	۳۵۹/۴۱	۰/۳۲۵۱۰
۱۴	۳/۵۷	۶۶۲/۶۶	۰/۲۸۷۴۸
۱۵	۱۴/۸۰	۸۲۰/۴۹	۰/۲۱۷۷۲
۱۶	۱/۱۸	۱۷۰۶/۳	۰/۱۶۲۶۳
۱۷	۱۷۷/۳۹	۲۸۲۲/۵	۰/۱۳۰۳۴
۱۸	۳۵۲/۳۵	۹۲۵۳/۹	۰/۳۷۵۹۹

ماتریس ضرایب مجهولات مدل فرکانسی (A)، در رابطه (۹) جایگزین شد و ماتریس دقت برای مدل برآورد بزرگی (σ_M^2) و مدل فاصله زمانی بین زلزله‌ها (σ_{DT}^2) طبق شکل (۸) محاسبه گردید. بررسی نتایج نشان می‌دهد برای مدل بزرگی، میزان متوسط دقت برآورد بزرگی برحسب ناتلی برابر با مقدار قابل قبول ۰/۵۴ است. همچنین برای مدل فاصله زمانی، دقت برآورد فاصله زمانی بین زلزله‌های مورد مطالعه در این مقاله، ۳۱/۱ روز یا حدود یک ماه به دست آمده است.

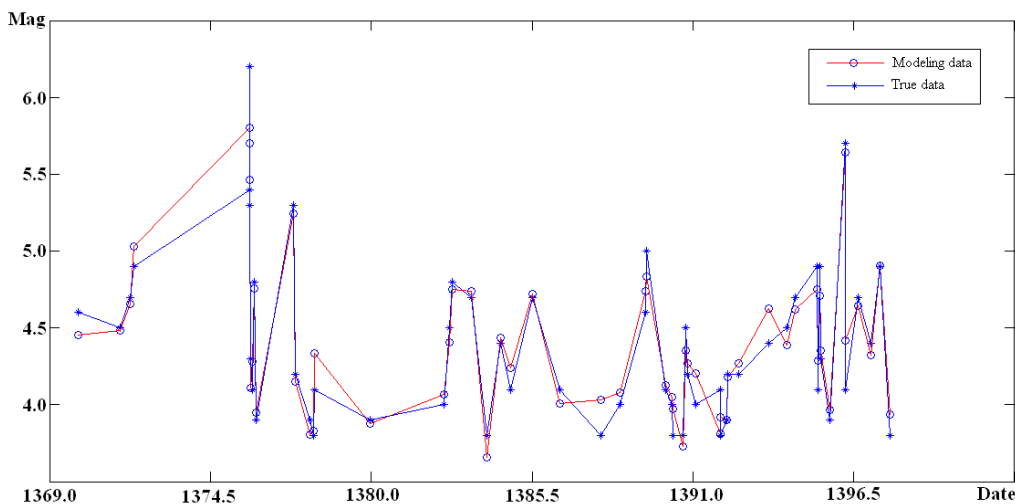
شدند. در نتیجه، حدود پریود برای هر دامنه بزرگی طبق جدول ۳ به دست آمد که از آن‌ها به‌عنوان مقادیر اولیه برای این مدل در روابط ۳ و ۴ استفاده شد.

جدول ۳- متوسط فواصل زمانی برای زلزله‌های مورد مطالعه در بازه

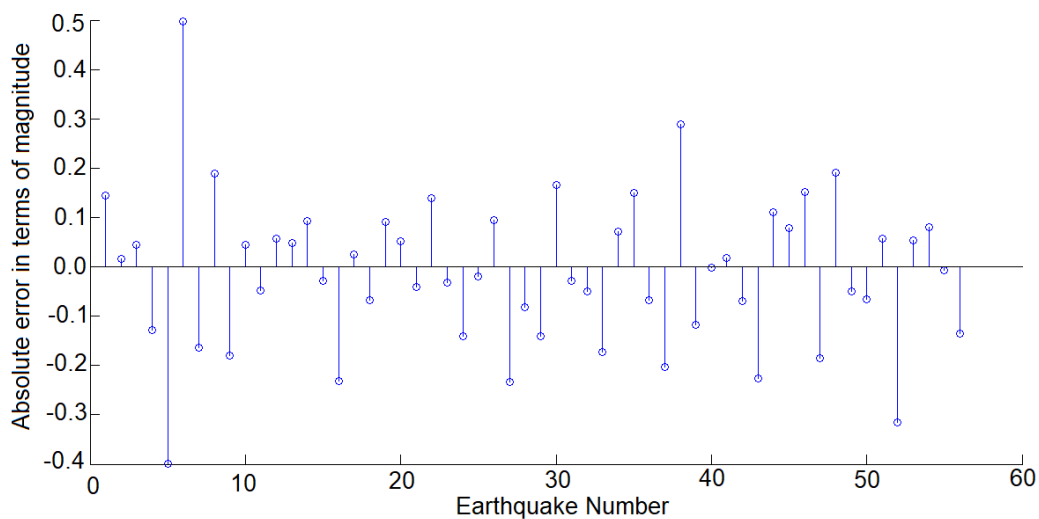
های مختلف برحسب بزرگی

دامنه بزرگی	متوسط فواصل زمانی برحسب روز					
- ۵/۰ ۴/۵	۱۳۳۱/۸	۴۸۴/۱	۲۶۸/۱	۱۰۲/۸	۳۶/۲	۱۹/۷
- ۴/۵ ۴/۰	۷۵۳/۷	۵۸۸/۲	۳۴۰/۵	۱۴۷/۱	۸۱/۱	۳۶/۴
- ۴/۰ ۳/۵	۳۷۲/۲	۲۷۱/۱	۱۹۱/۷	۱۲۸/۶	۷۰/۵	۴۹/۱

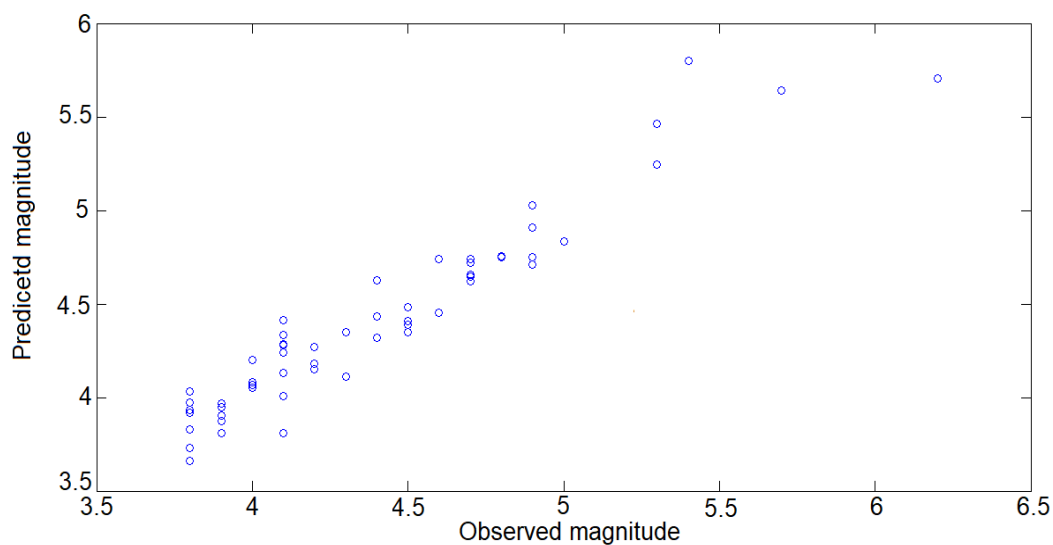
پارامترهای مدل با تکرار مناسب تعیین شد، به نحوی که مدل قادر است بزرگی زلزله را با خطای متوسط مطلق ۰/۱۲، خطای ریشه مربعی متوسط ۰/۰۲ و انحراف معیار ۰/۱۵ در مقیاس ناتلی از داده‌ها عبور دهد. بیشترین خطا در مدل فرکانسی حاصل، برابر با ۰/۳۹- و ۰/۴۹+ در مقیاس ناتلی است. میزان کارایی مدل برازش شده در مقایسه با داده‌های واقعی را می‌توان در شکل‌های (۲) تا (۴) مشاهده کرد. در شکل (۲)، مقدار بزرگی زلزله‌های پیش‌بینی شده توسط مدل فرکانسی در طول زمان، با مقادیر واقعی مقایسه شده است. در شکل (۳)، خطای مطلق برآورد بزرگی زلزله توسط مدل فرکانسی نسبت به مقادیر واقعی بزرگی برای هر یک از ۵۷ زلزله نشان داده است. همبستگی بین مقادیر بزرگی حاصل از مدل فرکانسی و مقادیر واقعی نیز در شکل (۴) نمایش داده شده است. هر سه شکل مذکور نشان‌دهنده انطباق مناسب داده‌های واقعی با نتایج حاصل از مدل فرکانسی است. ضرایب مدل فرکانسی برای مدل بزرگی در جدول ۴ ارائه شده است. این نتایج دلالت بر این دارد که می‌توان از تبدیل فوریه معکوس به‌عنوان یک مدل ریاضی مناسب برای بیان الگوی وقوع رویداد زلزله‌ها استفاده کرد. دستیابی به شناخت هرچه بهتر از الگوی وقوع زلزله در یک منطقه، در برنامه‌ریزی مناسب برای کاهش مخاطرات زلزله نتیجه‌بخش خواهد بود. با همین داده‌ها و به همین روش می‌توان مدلی برای برآورد فاصله زمانی بین زلزله‌ها (برحسب روز) نیز به دست آورد. برای تعیین ضرایب این مدل، از ۱۷ فرکانس با فاز و دامنه مختلف و یک ضریب ثابت که مجموعاً به ۵۲ مجهول می‌رسد، استفاده شده است. با تکرار مناسب می‌توان ضرایب مدل را طوری به دست آورد که فاصله زمانی با خطای متوسط مطلق $\pm 60/3$ و ریشه مربعی متوسط ۲۱/۷ و انحراف معیار ۷۹/۷ روز از داده‌ها عبور کند. بیشترین



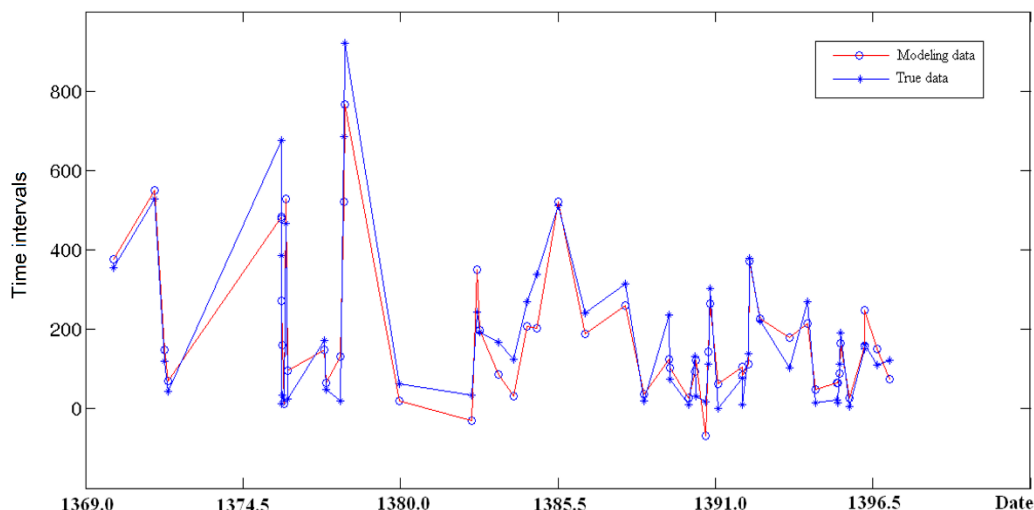
شکل ۲- میزان انطباق مدل فرکانسی برآورد بزرگی زلزله در مقیاس ناتلی و داده‌های واقعی ۲۹ ساله برحسب تغییرات زمانی (سال شمسی)



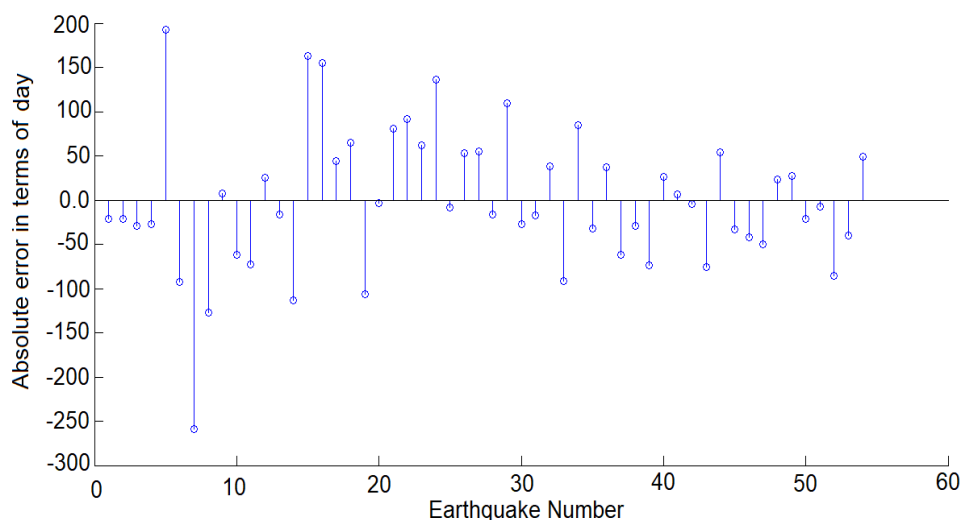
شکل ۳- خطای عدم انطباق مدل برآورد بزرگی زلزله در مقیاس ناتلی نسبت به هر یک از ۵۷ زلزله مورد مطالعه



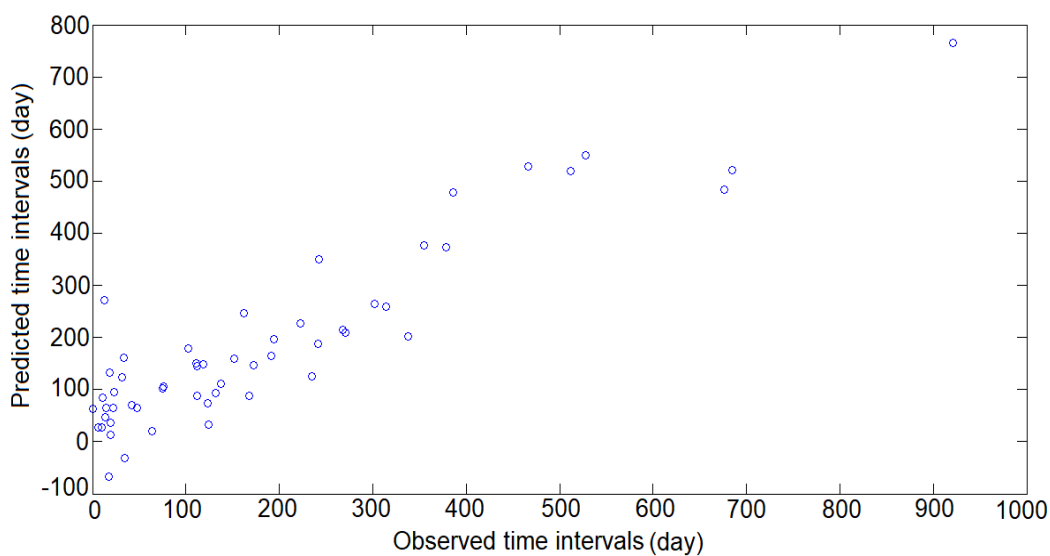
شکل ۴- همبستگی بین بزرگی زلزله‌های رخ داده و بزرگی برآورد شده از مدل فرکانسی برحسب مقیاس ناتلی



شکل ۵- میزان انطباق مدل برآورد فاصله زمانی بین زلزله‌ها و داده‌های واقعی ۲۹ ساله برحسب تغییرات زمانی (سال شمسی)



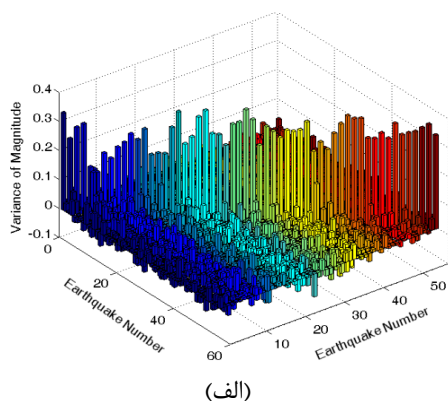
شکل ۶- خطای عدم انطباق مدل برآورد فاصله زمانی بین زلزله‌ها برحسب روز نسبت به مقادیر مشاهده شده



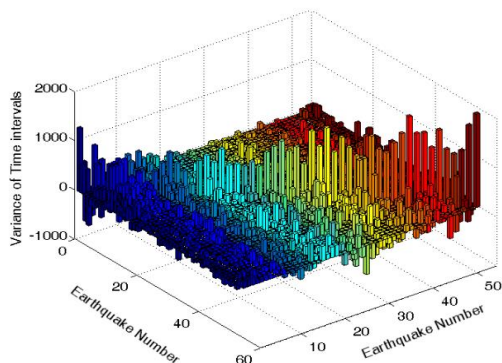
شکل ۷- همبستگی بین فاصله زمانی زلزله‌های رخ داده و فاصله زمانی برآورد شده از مدل فرکانسی برحسب روز

جدول ۵- ضرایب مدل برآورد فاصله زمانی بین دو زلزله

شماره موج	فاز (درجه)	پریود (روز)	دامنه (ب; جزء روز)
۰	-	-	۱۳۹/۶۲
۱	۷۲/۹۴۴	۲/۹۰۰۱	۵۹/۹۸۱
۲	۴۴/۵۸۶	۶/۰۰۰۳	۷۵/۷۹۲
۳	۵۲/۲۵۶	۸/۷۹۹۰	۶۴/۹۴۰
۴	۲۱۶/۶۳	۱۸/۹۰۵	۷۳/۸۸۱
۵	۹۴/۶۴۴	۲۰/۹۹۹	۳۶/۰۷۰
۶	۳۰/۰۷۲	۲۵/۰۹۲	۳۲/۹۰۶
۷	۶۵/۱۱۳	۴۷/۹۹۷	۵۸/۸۰۷
۸	۷۶/۳۰۴	۶۲/۰۳۷	۶۲/۸۹۴
۹	۲۹۳/۳۷	۱۰۴/۹۹	۹۸/۰۴۸
۱۰	۱۶۸/۸۸	۱۸۵/۴۸	۹۸/۰۵۷
۱۱	۲۴۲/۷۷	۲۴۲/۴۳	۲۰/۹۵۶
۱۲	۳۳۵/۹۲	۳۹۶/۸۷	۴۷/۹۱۱
۱۳	۲۲۵/۶۳	۴۳۵/۷۷	۷۱/۰۲۲
۱۴	۲۵۳/۱۷	۱۳۲۴/۱	۶۷/۹۰۰
۱۵	۱۷۶/۱۹	۱۵۳۷/۱	۱۹/۸۸۶
۱۶	۱۱۲/۳۹	۲۹۴۹/۳	۷۴/۸۷۸
۱۷	۳۶۳/۳۹	۵۰۶۸/۸	۵۷/۰۹۷



(الف)



(ب)

شکل ۸- ماتریس دقت مدل فرکانسی برای ۵۷ زلزله مورد مطالعه در این مقاله، الف) برآورد بزرگی زلزله در مقیاس ناتلی، ب) برآورد فاصله زمانی بین زلزله‌ها برحسب روز

همچنین با توجه به نتایج به دست آمده می‌توان گفت روش مدل سازی فرکانسی، قادر است فرکانس‌های متعدّد وقوع زلزله را با دقت خوبی تعیین کند. همان طور که در جدول ۷ دیده می‌شود، بزرگی زلزله دارای یک دوره بازگشت کوتاه‌مدت (برحسب روز) و یک دوره بازگشت میان‌مدت (برحسب ماه) و یک دوره بازگشت بلندمدت (برحسب سال) است. مزیت این روش نسبت به دوره‌های بازگشت روش گوتنبرگ- ریشتر (جدول ۸) این است که این روش می‌تواند با دقت زیاد، همه فرکانس‌های زلزله را مشخص کند. از طرفی، بعضی فرکانس‌ها نظیر ۶ ماه، ۱، ۲/۵ و ۲۵ سال بین دو روش برابر است که نشان می‌دهد هماهنگی کلی بین مدل فرکانسی و روش گوتنبرگ- ریشتر وجود دارد. به‌عنوان مثال، دوره بازگشت ۱۷۹ روز، ۱/۰۷ سال (۳۹۰ روز)، ۲/۳۴ سال (۸۵۴ روز) و ۲۴/۵۰ سال (۸۹۴۳ روز) به ترتیب برای زلزله‌هایی با بزرگی ۴/۲۵ و ۴/۷۵ و ۵/۲۵ و ۶/۷۵ انطباق بسیار خوبی با فرکانس‌های مدل پیشنهادی در این مطالعه دارد. از بررسی دامنه به دست آمده برای فرکانس‌های مختلف در جدول ۴ می‌توان نتیجه گرفت که بیشترین تأثیر زلزله‌ها از دامنه‌های بزرگ مربوط به پریودهای ۷۷ و ۹۲۵۴ روز با دامنه ۰/۳۷، پریود ۱۸۱ روز با دامنه ۰/۳۴ و پریودهای ۳۲۶ و ۳۵۹ روز با دامنه

۷- بحث و بررسی در خصوص فرکانس‌های مدل

نتایج مربوط به مدل فرکانسی برای بزرگی، نشان دهنده شباهت زیاد بین فرکانس‌های وقوع زلزله با فرکانس‌های جزر و مدّ ماه و خورشید در زمین است. در جدول ۶، فرکانس‌های حاصل از مدل فرکانسی و مهم‌ترین فرکانس‌های جزر و مد نشان داده شده است. ضریب همبستگی بین این دو دسته فرکانس، ۰/۹۳۷ (یا ۹۳/۷ درصد) به دست آمده است. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که آزادسازی انرژی ذخیره شده حاصل از تکتونیک صفحه ای در گسل‌های فعال منطقه، ارتباطی مستقیم با نیروهای جزر و مدّی ماه و خورشید دارد. اگرچه در تحقیقات گذشته، همبستگی بالا بین فرکانس‌های وقوع زلزله و فرکانس‌های جزر و مد بدین شکل مطرح نشده است، تحقیقات یک قرن گذشته روی هزاران زلزله به وقوع پیوسته در سراسر جهان، ارتباط قطعی بین این دو رویداد طبیعی را نشان می‌دهد. همبستگی بالای به دست آمده از ۴۱۲ هزار زمین‌لرزه در سطح اطمینان ۹۹ درصد برای وقوع زلزله‌های کوچک و کم عمق در زمان مدّ ماه و خورشید و در زمان ماکزیمم جزر و مد به دست آمده است [۳۴]. در تحقیق دیگر که روی ۱۶۷ هزار زمین‌لرزه به روش آنالیز خوشه انجام شده، ارتباط ۱۶ درصد از زمین‌لرزه‌های عمیق با جزر و مد در یک دوره ۲۴ ساله محرز گردیده است [۳۵].

جدول ۸- تعداد متوسط وقوع زلزله در سال برای هر دامنه بزرگی در منطقه بجنورد به کمک مدل گوتنبرگ-ریشر

دامنه بزرگی	تعداد وقوع زلزله	پریود متوسط
بزرگ‌تر از ۷	۰/۳۴۳	سال ۲۹/۱۱
۶/۷-۵	۰/۰۴۸	سال ۲۴/۵۰
۶-۶/۵	۰/۰۸۹	سال ۱۱/۲۰
۵/۶-۵	۰/۱۹۵	سال ۵/۱۲
۵-۵/۵	۰/۴۲۷	سال ۲/۳۴
۴/۵-۵	۰/۹۳۴	سال ۱/۰۷
۴-۴/۵	۲/۰۴۴	روز ۱۷۴

۸- نتیجه‌گیری

در این پژوهش، با هدف ارائه برآورد دقیق و قابل اطمینان از دوره بازگشت زلزله‌ها در یک منطقه مشخص، مثل بجنورد، استفاده از مدل سازی فرکانسی بزرگی زلزله با استفاده از تابع تبدیل فوریه پیشنهاد شد که نتایج زیر به دست آمد:

- بزرگی زلزله‌های رخ داده در بجنورد در بازه زمانی بررسی شده در این پژوهش، از الگوی تابع تبدیل فوریه معکوس پیروی می‌کند. نتایج نشان می‌دهد که می‌توان به کمک مدل فرکانسی، بزرگی زلزله را با خطای کمتر از ۰/۵ ناتلی برآورد کرد.
- برخلاف روش گوتنبرگ-ریشر که براساس آن تنها می‌توان مقدار متوسط احتمال فراگذشت رویداد زلزله با بزرگی بیشتر از یک مقدار مشخص را در یک دوره زمانی یک‌ساله محاسبه کرد، در مدل سازی فرکانسی، تمام فرکانس‌های کوتاه‌مدت، میان‌مدت و بلندمدت برای منطقه مورد نظر محاسبه می‌شود.
- مدل فرکانسی نشان می‌دهد که دوره‌های ۲، ۶ و ۱۰ ماه، ۱ و ۲۵ سال جزء اصلی‌ترین دوره‌های بازگشت زلزله در این منطقه هستند.
- برخی از دوره‌های بازگشت حاصل از مدل فرکانسی، نظیر ۶ ماه، ۱، ۲/۵ و ۲۵ سال با دوره‌های بازگشت برآورد شده در روش گوتنبرگ-ریشر برای شهر بجنورد برابر است که نشان می‌دهد هماهنگی کلی بین مدل فرکانسی و روش گوتنبرگ-ریشر وجود دارد.
- نتایج این پژوهش نشان می‌دهد شباهت زیادی بین فرکانس‌های مدل پیشنهادی برای بزرگی زلزله و فرکانس‌های جزر و مد ماه و خورشید در زمین وجود دارد. ضریب همبستگی بین این دو دسته فرکانس، ۰/۹۳۷ (یا ۹۳/۷ درصد) به دست آمده است. این موضوع نشان می‌دهد آزادسازی انرژی ذخیره‌شده حاصل از تکتونیک صفحه‌ای در

۰/۳۲ در مقیاس ناتلی است. همچنین کمترین دامنه، مربوط به پریود ۱۲۱ روز است. بنابراین پریودهای اصلی و تأثیرگذار را می‌توان به همین پریودها نسبت داد؛ یعنی دوره‌های ۲، ۶ و ۱۰ ماه، ۱ و ۲۵ سال جزء اصلی‌ترین فرکانس‌های بازگشت زلزله در این منطقه هستند. شایان ذکر است دوره‌های بازگشت کوتاه‌مدت و میان‌مدت به دلیل اینکه مرتبط با زلزله‌های کوچک هستند، در طراحی ساختمان‌ها در برابر زلزله مورد توجه قرار نمی‌گیرند. با این حال، تعیین جزئیات کامل از دوره‌های بازگشت زلزله‌ها شامل دوره‌های بازگشت کوتاه‌مدت، میان‌مدت و بلندمدت به کمک مدل فرکانسی، در شناخت هرچه بهتر الگوی رویداد زلزله در منطقه به منظور تعیین پارامترهای مورد نیاز در تحلیل خطر زلزله، ثمربخش خواهد بود.

جدول ۶- مقایسه پریود نیروهای جزر و مدی ماه و خورشید و پریودهای حاصل از مدل فرکانسی برآورد بزرگی زلزله

شماره فرکانس	پریود جزر و مد (روز) [۳۶]	پریود مدل فرکانسی زلزله (روز)
۱	۰/۴۹۸، ۰/۵۱۷، ۰/۵۲۷	۰/۳۸۰۰
۲	۰/۹۹۷، ۱/۰۷۶	۱/۰۷۵۰
۳	۳×۱/۰۷۶=۳/۲۳	۳/۶۰۰۰
۴	۹/۱۳۳	۹/۰۹۷۰
۵	۱۳/۶۶۰۸	۱۲/۴۹۵
۶	۲۷/۵۵۴۵	۲۷/۵۱۵
۷	۵×۹/۱۳=۴۵/۶۶	۴۸/۰۱۲
۸	۶۲/۱۶	۷۷/۰۳۰
۹	۱۲۱/۷۴۹۳	۱۲۱/۳۲
۱۰	۱۸۲/۶۲۱۱	۱۸۱/۰۲
۱۱	۲×۱۲۱/۷۵=۲۴۲/۵	۲۸۶/۸۵
۱۲	۱۲×۲۷/۵=۳۳۰/۶	۳۲۶/۹۶
۱۳	۳۶۵/۲۵۹۷	۳۵۹/۴۱
۱۴	۵۳۸/۷۵	۶۶۲/۶۶
۱۵	۸۰۸/۱۲	۸۲۰/۴۹
۱۶	-	۱۷۰۶/۳
۱۷	-	۲۸۲۲/۵
۱۸	۶۷۹۸/۳۷۳۸	۹۲۵۳/۹

جدول ۷- طبقه‌بندی دوره‌های بازگشت به دست آمده از مدل فرکانسی برای بزرگی زلزله در این مقاله

پریود کوتاه‌مدت (روز)	پریود میان‌مدت (ماه)	پریود بلندمدت (سال)
۰/۳۸	۱/۶	۱/۰
۱/۰۷	۲/۵	۱/۸
۳/۶	۴	۲/۲
۹/۱	۶	۷/۷
۱۲/۵	۹/۴	۲۵/۳
۲۷/۵	۱۰/۷	-

گسل‌های فعال، ارتباطی مستقیم با نیروهای جزر و مدی ماه و خورشید دارد.

مراجع

- [۱] محمدیاسر رادان، «پیش‌یابی میان‌مدت زمین‌لرزه‌های ایران با روش اطلاعات الگو»، رساله دکتری رشته ژئوفیزیک زلزله‌شناسی، پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله، تهران، ایران، ۱۳۹۲.
- [2] G.F. Panza et al., "Seismic hazard and strong ground motion: an operational neo-deterministic approach from national to local scale", Encyclopedia of Life Support Systems (EOLSS), Developed under the Auspices of the UNESCO, 2013.
- [3] C.R. Allen, "Responsibilities in earthquake prediction: to the seismological society of America, delivered in Edmonton, Alberta", Bulletin of the Seismological Society of America, Vol.66, No. 6, 1976, pp. 2069-2074.
- [۴] سید علی رضویان امرئی، فرزاد علی‌دوست ابدی‌خواه و رامین جعفری، «ارزیابی خطرپذیری لرزه‌ای شهر همدان»، مجله مدل‌سازی در مهندسی، دوره ۱۶، شماره ۵۵، ۱۳۹۷، صفحه ۲۴۷-۲۶۶.
- [5] M. Ishimoto, "Seismological observation by tremometer, 1. Magnitude and distribution pattern", Bull. Earthq. Res. Inst. Univ., Vol. 17, 1939, pp. 443-478.
- [6] K. Khorshidian, M. Pashapoor, and M. Khalili, "Parametric Estimation of Expected Number of Earthquakes and Hitting Time Distribution Based on Semi-Markov Model in south of Iran South", Journal of Advanced Mathematical Modeling, Vol. 3, NO, 2, 2014, pp. 1-20.
- [7] M.-H. Wu, J. Wang and K. Ku, "Statistical study on earthquake data: Poisson and Weibull distributions", Physica A: Statistical Mechanics and its Applications, Vol. 256, 2019.
- [8] J. Guo et al., "Singular spectrum analysis of ionospheric anomalies preceding great earthquakes: Case studies of Kaikoura and Fukushima earthquakes", Journal of Geodynamics, Vol. 124, 2019, pp. 1-13.
- [9] A. Mahmoudian and M.J. Kalae, "Study of ULF-VLF Wave Propagation in the Near-Earth Environment for Earthquake Prediction", Advances in Space Research, Vol. 63, No. 12, 2019, pp. 4015-4024.
- [10] Y. Zhu et al., "Earthquake prediction from China's mobile gravity data", Geodesy and Geodynamics, Vol. 6, No. 2, 2015, pp. 81-90.
- [۱۱] علی ساکت، «پیش‌بینی زمین‌لرزه براساس تغییرات الگوی لرزه‌خیزی در استان کرمان و هرمزگان»، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، گروه زمین‌شناسی، دانشگاه خوارزمی، کرج، ایران، ۱۳۸۶.
- [12] G. Gutenberg and C. Richter, "Seismicity of the earth and associated phenomena, Howard Tatel", Journal of Geophysical Research, Vol. 55, 1950, pp. 97.
- [13] H. Adeli and A. Panakkt, "A probabilistic neural network for earthquake magnitude prediction", Neural networks, Vol. 22, No. 7, 2009, pp. 1018-1024.
- [14] G. Asencio-Cortés et al., "Medium-large earthquake magnitude prediction in Tokyo with artificial neural networks", Neural Computing and Applications, Vol. 28, No. 5, 2017, pp. 1043-1055.
- [۱۵] حسین بخشی، مه‌الله رخشانی مهر و مسعود نوروزی، «تحلیل خطر لرزه‌ای و تهیه نقشه‌های هم‌شتاب شهرستان نیشابور»، مدل‌سازی در مهندسی، دوره ۱۵، شماره ۵۰، ۱۳۹۶، صفحه ۲۱۱-۲۲۳.
- [16] H. Thráinsson, A.S Kiremidjian and S.R. Winterstein, Modeling of earthquake ground motion in the frequency domain, John A. Blume earthquake engineering center, Stanford University, 2000.
- [17] F. Naeim, The seismic design handbook, Springer Science & Business Media, 1989.
- [۱۸] آیین‌نامه طراحی ساختمان‌ها در برابر زلزله (استاندارد ۲۸۰۰ ایران)، ویرایش چهارم، مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی، تهران، ایران، ۱۳۹۴.
- [19] Bulletin of International Seismological Center, 2018.
- [20] M. Rahimi and A. Yahyaabadi, "Bayesian probabilistic seismic hazard analysis with respect to near-fault effects", Asian Journal of Civil Engineering, Vol. 20, No. 3, 2019, pp. 341-349.
- [۲۱] علی‌اکبر یحیی‌آبادی، مهدی ادیبی و محمد خندان بکاولی، «بررسی تحلیلی زلزله ۲۳ اردیبهشت ۱۳۹۶ بجنورد»، دانشگاه بجنورد، بجنورد، ایران، ۱۳۹۷.

- [22] B. Hofmann-Wellenhof and H. Moritz, "Introduction to spectral analysis", in *Mathematical and Numerical Techniques in Physical Geodesy*, Springer, 1986, pp. 157-259.
- [۲۳] سید علی سلیمانی ابوری، محمدرضا فدوی امیری و حسین مروی، «تولید سیگنال مصنوعی زلزله به کمک مدلی جدید در فشرده‌سازی و آموزش شبکه‌های عصبی مصنوعی»، مجله مدل‌سازی در مهندسی، دوره ۱۴، شماره ۴۶، ۱۳۹۵، صفحه ۷۵-۸۵.
- [24] R.N. Bracewell, *The Fourier transform and its applications*, McGraw-Hill, New York, 1986.
- [25] P. Dienes, *The Taylor series: an introduction to the theory of functions of a complex variable*, Clarendon Press, Oxford, 1931.
- [26] R.A. Green and W.J. Hall, *An overview of selected seismic hazard analysis methodologies*, University of Illinois, 1994.
- [27] D. McKenzie, "Active tectonics of the Mediterranean region", *Geophysical Journal International*, Vol. 30, No. 2, 1972, pp. 109-185.
- [۲۸] شبکه ملی شتاب‌نگاری ایران، مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی، ایران، ۱۳۹۷.
- [۲۹] مرکز لرزه‌نگاری ایران، مؤسسه ژئوفیزیک، دانشگاه تهران، ایران، ۱۳۹۷.
- [۳۰] راهنمای کاربردی انجام تحلیل خطر زلزله (نشریه شماره ۶۲۶)، امور نظام فنی، معاونت نظارت راهبردی رئیس جمهور، تهران، ایران، ۱۳۹۲.
- [31] E. Scordilis, "Empirical global relations converting M_S and m_b to moment magnitude", *Journal of seismology*, Vol. 10, No. 2, 2006, pp. 225-236.
- [32] J. Shoja-Taheri, S. Naserieh and H. Ghofrani, " M_L and M_W scales in the Iranian Plateau based on the strong-motion records", *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 97, No. 2, 2007, pp. 661-669.
- [33] R. Mead, *The design of experiments: statistical principles for practical applications*, Cambridge university press, 1990.
- [34] L. Métivier et al., "Evidence of earthquake triggering by the solid earth tides", *Earth and Planetary Science Letters*, Vol. 278, No. 3-4, 2009, pp. 370-375.
- [35] G.A. Moncayo, J.I. Zuluaga and G. Monsalve, "Correlation between tides and seismicity in Northwestern South America: The case of Colombia", *Journal of South American Earth Sciences*, Vol. 89, 2019, pp. 227-245.
- [36] P. Vanicek, "The Earth Tides", *Lectures Notes*, Vol. 36, 1973. pp. 38.
- [37] P. Vanicek, *Tidal corrections to geodetic quantities*, Department of Commerce, United States of America, 1980.