

## واهم‌افزایی خطر زمینلرزه در شهر فیروزکوه

مریم آقاخانی<sup>۱</sup>، الهام شعبانی<sup>۲\*</sup> و نوربخش میرزائی<sup>۳</sup>

<sup>۱</sup>دانشجوی کارشناسی ارشد، مؤسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران، ایران

آستادیار، مؤسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران، ایران

آستاد، مؤسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران، ایران

(تاریخ دریافت: ۹۳/۱۱/۱۱، تاریخ پذیرش: ۹۴/۰۹/۲۲)

### چکیده

به‌منظور ارزیابی سطوح جنبش نیرومند روی سنگ بستر برای بیشینه شتاب و مقادیر طیفی در شهر فیروزکوه، برآورد خطر زمینلرزه به روش احتمالاتی اصلاح‌شده انجام شده است. برای این منظور، در محدوده  $33^{\circ}$  تا  $37^{\circ}$  عرض شمالی و  $52^{\circ}$  تا  $55^{\circ}$  طول شرقی، کلیه چشمه‌های بالقوه زمینلرزه‌ای موثر تعیین شده و با استفاده از توابع توزیع مکانی، پارامترهای لرزه‌خیزی در هر چشمه به‌دست آمده است. ناحیه مورد مطالعه به شبکه‌ای از نقاط با فواصل  $0/1^{\circ}$  تقسیم‌بندی شده و نقشه‌های خطر زمینلرزه برای اوج شتاب جنبش زمین (PGA) و شتاب طیفی (Sa) در دوره‌های تناوب  $0/2$  و  $2$  ثانیه روی سنگ بستر با  $5\%$  میرایی برای  $10\%$  و  $63\%$  احتمال فزونی در  $50$  سال تهیه شده است. فرآیند واهم‌افزایی برای تعیین سهم مشارکت زلزله ناشی از گسل‌های مختلف در بازه‌های متفاوت بزرگی و فاصله انجام شده است. نتایج نشان می‌دهد که زمینلرزه‌های بزرگ‌تر و دورتر از ساختگاه کنترل‌کننده سطوح خطر در دوره‌های تناوب بالا هستند و زمینلرزه‌های کوچک‌تر و نزدیک‌تر سطوح خطر در شتاب‌های طیفی کوتاه دوره و PGA را کنترل می‌کنند.

**واژه‌های کلیدی:** تحلیل خطر زمینلرزه، واهم‌افزایی، پارامترهای لرزه‌خیزی، سناریوی غالب زمینلرزه، شتاب طیفی، فیروزکوه

### ۱ مقدمه

یکی از مسائل مبهم در تحلیل خطر احتمالاتی چگونگی تعبیر و تفسیر نتایج حاصل از آن و یافتن متناظر فیزیکی برای پارامترهای به‌دست آمده است. به عبارت دیگر، از آنجا که خطر احتمالاتی برآورد شده حاصل ترکیب خطر لرزه‌ای زمینلرزه‌های محتمل با بزرگی متفاوت در فواصل مختلف از ساختگاه است، همواره این سؤال مطرح است که اساساً مشخصات زمینلرزه‌ای که این خطر را در ساختگاه ایجاد می‌کند، چیست؟ اهمیت مسئله در این است که زمینلرزه‌های با بزرگی متفاوت و در فواصل مختلف از ساختگاه دارای ویژگی‌های متفاوتی از نظر محتوای بسامدی، مدت دوام و نیز سایر پارامترهای جنبش

در روش احتمالاتی برآورد خطر زمینلرزه، اثر تمام چشمه‌های بالقوه که ممکن است ساختگاه را تهدید کنند، برای محاسبه احتمال فزونی جنبش زمین از یک سطح مشخص جمع زده می‌شود که حاصل به‌صورت منحنی خطر یا طیف خطر یکنواخت نشان داده می‌شود. یکی از مزیت‌های روش احتمالاتی، در نظر گرفتن عدم قطعیت پارامترهای لرزه‌خیزی (بزرگی، مکان رویداد و شدت جنبش زمین حاصل از زمینلرزه در ساختگاه) در محاسبات است که سبب شده‌است این رویکرد از رایج‌ترین روش‌های برآورد خطر برای اهداف کاربردی باشد. با این حال

\*Corresponding author:

eshabani@ut.ac.ir

\*نگارنده رابط:

کمیته ملی تحقیقات امریکا نوعی روش برآورد خطر احتمالاتی وارون را پیشنهاد کرد که با آن امکان تعیین زمینلرزه کنترل کننده برای هر سطح مشخص خطر فراهم می شود. این روش، واهم افزایی خطر زمینلرزه نام گذاری شد. در ابتدا، این روش تنها در طرح های ساخت نیروگاه و یا تأسیسات هسته ای توسط کمیته نظارت هسته ای ایالات متحده و سازمان انرژی ایالات متحده مورد استفاده قرار می گرفته است (برای نمونه، بنتر و همکاران، ۱۹۹۶؛ بویسوناد و همکاران، ۱۹۹۵؛ کیمبال و چندر، ۱۹۹۶). به تدریج با تکامل و بهبود روش واهم افزایی خطر زمینلرزه و نرم افزارهای مرتبط با آن دامنه کاربرد این روش وسعت یافت و امروزه در بسیاری از کشورها به عنوان بخش تفکیک ناپذیر محاسبات برآورد خطر زمینلرزه برای تدوین استانداردهای لازم برای مقاوم سازی سازه ها در برابر خطر زمینلرزه محسوب می شود. علاوه بر این، روز به روز محققان جنبه های جدیدی از کاربرد این روش ارائه می دهند. در ایران نیز در سال های اخیر قدم هایی در راستای کاربرد روش واهم افزایی خطر زمینلرزه برداشته شده است (برای نمونه، عبدی و همکاران، ۲۰۱۳).

در این مطالعه، واهم افزایی خطر زمینلرزه برای شهرستان فیروزکوه که با گسل های بزرگ و با توان لرزه-زایی بالا (گسل های شمال البرز، مازندران - خزر، دامغان، آستانه، شاهرود، فیروزکوه، مشاء، بایجان، شمال تهران) احاطه گردیده، بررسی شده است. این مطالعه برای محدوده  $34^{\circ}$  تا  $37^{\circ}$  عرض شمالی و  $52^{\circ}$  تا  $55^{\circ}$  طول شرقی انجام شده است. نتایج واهم افزایی به صورت سهم سناریوهای زمینلرزه با بزرگی و فواصل متفاوت از ساختگاه برای اوج شتاب زمین (Peak Ground Acceleration, PGA) و شتاب طیفی  $0.2$  و  $2$  ثانیه با  $5\%$  میرایی برای دوره های بازگشت  $50$  و  $475$  سال ارائه شده است. واهم افزایی شتاب طیفی در دوره تناوب  $2$  ثانیه برای دوره بازگشت  $475$  سال، سناریو با بزرگی میانگین  $6/6$  در

زمین هستند. این مسئله به خصوص برای محاسبات و تحلیل های دینامیکی سازه ها دارای اهمیت ویژه ای است. تعیین زمینلرزه طرح به منظور طراحی و محاسبات مربوط به مقاوم سازی سازه ها در مقابل خطر زمینلرزه و عواقب ناشی از آن، از جمله روانگرایی، امری ضروری است؛ زیرا انتخاب و یا مدل سازی تاریخچه زمانی، متناسب با زمینلرزه طرح مشخص شده برای ساختگاه، صورت می گیرد و به دنبال آن بررسی و مدل سازی خصوصیات دینامیکی جنبش زمین و تأثیر آن بر سازه ها از جمله مدت دوام زمینلرزه، تپ های بحرانی و تحلیل رفتار غیرخطی سازه ها، به این وسیله امکان پذیر می شود (مک گایر، ۱۹۹۵؛ کرامر و پترسون، ۱۹۹۶). دو پارامتر اصلی و مهم از مشخصات زمینلرزه طرح، فاصله و بزرگی آن است. در واقع، مسئله مهم یافتن فاصله و بزرگی زمینلرزه ای است که خطر لرزه ای به دست آمده در یک سطح معین را بتوان به آن نسبت داد. به دلیل ماهیت انتگرالی این محاسبات امکان معرفی زمینلرزه ای که بیشترین خطر در یک سطح مشخص از جنبش زمین برای ساختگاه را به دنبال خواهد داشت، وجود ندارد (مک گایر، ۱۹۹۵). سناریوی زمینلرزه ای که بیشترین سهم در فزونی پارامتر جنبش زمین از سطح مشخصی در ساختگاه را بتوان به آن نسبت داد با تعبیر زمینلرزه کنترل کننده (بنتر، ۱۹۹۲)، رویداد مد (چپمن، ۱۹۹۵) یا رویداد غالب (بازارو و کرنل، ۱۹۹۹) نامیده می شود (عبدی و همکاران، ۲۰۱۳).

از طرف دیگر، در سطوح متفاوت خطر، سناریوی غالب برای یک ساختگاه، یعنی دوره های تناوب مختلف شتاب طیفی و دوره بازگشت های مختلف، می تواند متفاوت باشد. این تفاوت به خصوص در ساختگاه هایی که خطر لرزه ای ناشی از تأثیر چندین چشمه است، بارز می شود. در نتیجه، تعیین سناریوی غالب برای هر یک از سطوح مورد نظر از جنبش زمین، ضرورت بیشتری پیدا می کند.

را در طول تاریخ تجربه کرده است. زمینلرزه ۲۰ ژوئن ۱۹۹۰ رودبار با بزرگی  $M_w = 7/2$  (پریستلی و همکاران، ۱۹۹۴)، مخرب‌ترین زمینلرزه دستگامی در این ایالت است. سازوکار کانونی زمینلرزه‌های البرز نشان‌دهنده گسلش راندگی، و همچنین، گسلش امتدادلغز در این ناحیه است، اما، سازوکار غالب از نوع راندگی است (پریستلی و همکاران، ۱۹۹۴).

## ۲-۲ برآورد خطر زمینلرزه

در روش مرسوم برآورد خطر زمینلرزه به روش احتمالاتی، نخستین مرحله اساسی، تعیین چشمه‌های بالقوه زمینلرزه و مرحله دوم تعیین پارامترهای لرزه‌خیزی در هر چشمه بالقوه زمینلرزه است. به‌علت کمبود داده‌های زمینلرزه، این روش در عمل با مشکلاتی مواجه است. برای غلبه بر این کاستی‌ها، شی و همکاران (۱۹۹۲) روش احتمالاتی اصلاح‌شده را ارائه داده‌اند که شامل مراحل زیر است:

۱. تعیین پارامترهای لرزه‌خیزی (مقدار  $b$ ، آهنگ متوسط سالانه رویداد زمینلرزه،  $\lambda$ ، و بزرگ‌ترین زمینلرزه محتمل) در هر ایالت لرزه‌زیمینساختی.
۲. تعیین چشمه‌های بالقوه زمینلرزه موثر در خطر ساختگاه و تخمین  $M_{max}$  برای هر چشمه و تخمین آهنگ متوسط سالانه رویداد زمینلرزه،  $\lambda$ ، برای هر بازه بزرگی در هر چشمه با استفاده از مفهوم تابع توزیع مکانی.

## ۱-۲-۲ تعیین پارامترهای لرزه‌خیزی در ایالت‌های لرزه‌زیمینساختی

پارامترهای لرزه‌خیزی در ایالت لرزه‌زیمینساختی ایران مرکزی و شرق ایران را میرزائی و همکاران (۱۹۹۷) به روش کیکو و سلفول (۱۹۹۲) برای دو مدل عدم قطعیت مرز پایدار و مرز ملایم محاسبه کرده‌اند. همچنین برای زیرایالت لرزه‌زیمینساختی البرز (طاهرنیا و همکاران،

فاصله میانگین حدود ۴۳ کیلومتر از مرکز شهر فیروزکوه و برای دوره بازگشت ۵۰ سال، سناریو با بزرگی میانگین ۶/۳ در فاصله میانگین ۶۵ کیلومتر به‌دست می‌دهد. همچنین، شتاب طیفی در دوره تناوب ۰/۲ ثانیه برای دوره بازگشت ۴۷۵ سال، تعیین‌کننده سناریو با بزرگی میانگین ۶ در فاصله میانگین ۲۳ کیلومتر از مرکز شهر فیروزکوه است و برای دوره بازگشت ۵۰ سال سناریو با بزرگی میانگین ۵/۷ در فاصله میانگین ۳۴ کیلومتر است. به‌طور کلی روند نتایج واهم‌افزایی نشان می‌دهد که آهنگ متوسط فزونی شتاب‌های طیفی بلنددوره را زمینلرزه‌هایی که بزرگ‌تر و دورتر از ساختگاه هستند، کنترل می‌کنند، درحالی‌که سطوح خطر در شتاب‌های طیفی کوتاه‌دوره و PGA با زمینلرزه‌های نزدیک‌تر و کوچک‌تر کنترل می‌شود.

## ۲ روش تحقیق

### ۱-۲ جایگاه لرزه‌زیمینساختی منطقه مورد مطالعه

برپایه تقسیم‌بندی ایران‌زمین به ایالت‌های اصلی لرزه‌زیمینساختی که بر اساس جایگاه زمینساختی و ویژگی‌های لرزه‌زیمینساختی توسط میرزائی و همکاران (۱۹۹۸) انجام گرفته است، بخش اعظم گستره مورد مطالعه در ایالت لرزه‌زیمینساختی البرز - آذربایجان و قسمت جزئی آن در ایالت لرزه‌زیمینساختی ایران مرکزی - شرق ایران و ایالت لرزه‌زیمینساختی کپه‌داغ قرار می‌گیرد. ایالت لرزه‌زیمینساختی پهنه‌ای است که تحت رژیم‌های ژئودینامیکی کنونی دارای جایگاه زمینساختی همانند و الگوی لرزه‌خیزی یکسان است (یی و همکاران، ۱۹۹۳).

ایالت لرزه‌زیمینساختی البرز - آذربایجان پهنه‌ای لرزه‌خیز است که بخش‌های شمال و شمال‌غربی ایران را دربرمی‌گیرد. رشته‌کوه البرز از شمال به فرونشست دریای خزر و از جنوب به فلات ایران مرکزی منتهی می‌گردد. ایالت لرزه‌زیمینساختی البرز - آذربایجان لرزه‌خیزی شدیدی

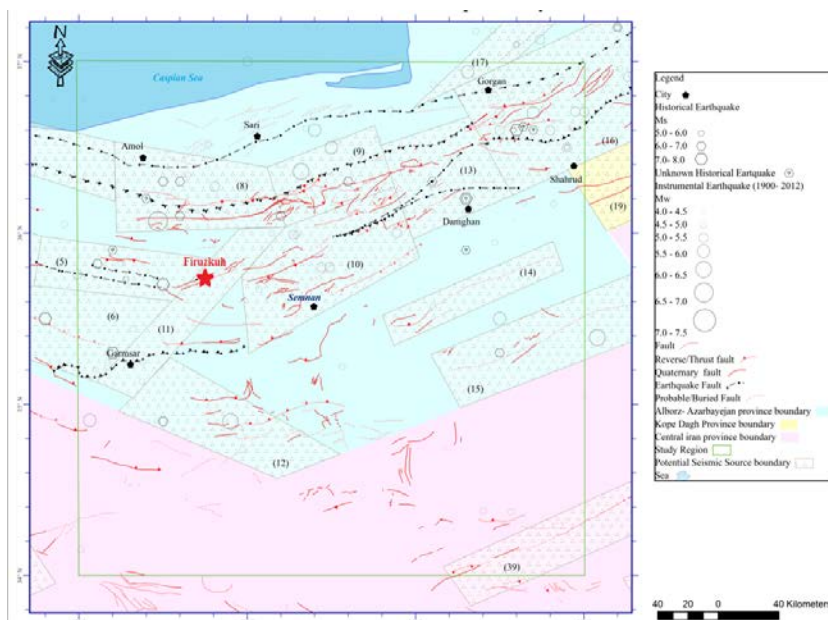
سازی و هندسه چشمه‌های زمینلرزه، بر پایه دیدگاه‌ها و تجربیات پژوهشگران صورت می‌گیرد (یاسمین و گولکن، ۱۹۹۴).

برای تعیین چشمه‌های بالقوه زمینلرزه، از کاتالوگ زمینلرزه‌های ایران و نواحی مجاور (میرزائی و همکاران، ۱۳۸۱) که پارامترهای مبنایی زمینلرزه‌های تاریخی و دستگامی ایران و نواحی مجاور از سده چهارم پیش از میلاد تا سال ۲۰۰۰ میلادی را شامل است، و از داده‌های USGS و ISC تا پایان سال ۲۰۱۱ و از داده‌های EMSC برای سال‌های ۲۰۱۱ تا آخر ۲۰۱۳ استفاده شده است. همچنین، نقشه‌های زمین‌شناختی، لرزه‌زمین‌ساختی، ژئوفیزیکی و توپوگرافی منتشرشده از سوی سازمان زمین‌شناسی کشور و گزارش‌های موجود از تعیین سازوکار کانونی زمینلرزه‌ها نیز مورد استفاده قرار گرفته است. با استفاده از معیارهای فوق در محدوده مورد مطالعه ۳۹ چشمه بالقوه زمینلرزه تعیین شده است (شکل ۱).

(۲۰۱۱)، که عمده مساحت ناحیه مورد مطالعه در این زیرایالت قرار دارد، به روش کیکو و گراهام (۱۹۹۸) با فرض مدل عدم قطعیت مرز ملایم مقادیر پارامتر لرزه-خیزی محاسبه شده است (جدول‌های ۱ تا ۴).

## ۲-۲-۲ تعیین چشمه‌های بالقوه زمینلرزه

تعیین چشمه‌های بالقوه زمینلرزه، مهم‌ترین مرحله برآورد خطر زمینلرزه است. در بسیاری از نواحی، حتی در مناطق با زلزله‌خیزی شدید، اطلاعات کافی در دست نیست تا بتوان بر اساس آن چشمه‌های بالقوه زمینلرزه را با اعتماد کافی تعیین کرد. بنابراین، لازم است با اتخاذ تدابیر مناسب از کلیه اطلاعات زمین‌شناختی، لرزه‌زمین‌ساختی، زلزله‌شناختی و ژئوفیزیکی موجود استفاده شود. اگرچه روش استاندارد برای تعیین چشمه‌های بالقوه زمینلرزه وجود ندارد، اما در عمل، نقشه‌های لرزه‌زمین‌ساختی و نقشه‌های رومرکز زمینلرزه‌ها به‌منزله راهنما مورد استفاده قرار می‌گیرد و تصمیم‌نهایی در مورد چگونگی مدل-



شکل ۱. چشمه‌های بالقوه زمینلرزه و ایالت‌های لرزه‌زمین‌ساختی در محدوده ۳۴° تا ۳۷° عرض شمالی و ۵۲° تا ۵۵° طول شرقی و اطراف، کادر سبزرنگ محدوده مطالعه تحلیل خطر زمینلرزه است.

جدول ۱. پارامترهای لرزه‌خیزی در ایالت لرزه‌زمین‌ساختی البرز-آذربایجان (میرزائی و همکاران، ۱۹۹۷).

مدل عدم قطعیت	$\beta$	$\lambda_{3.0}$	$M_{\max}$
مرز پایدار	$1.91 \pm 0.04$	$41.08 \pm 3.35$	$8.02 \pm 0.62$
مرز ملایم	$1.97 \pm 0.07$	$37.86 \pm 4.24$	$8.07 \pm 0.67$

جدول ۲. پارامترهای لرزه‌خیزی در ایالت لرزه‌زمین‌ساختی کپه‌داغ (میرزائی و همکاران، ۱۹۹۷).

مدل عدم قطعیت	$\beta$	$\lambda_{3.0}$	$M_{\max}$
مرز پایدار	$1.52 \pm 0.08$	$6.59 \pm 1.04$	$7.71 \pm 0.58$
مرز ملایم	$1.56 \pm 0.12$	$6.13 \pm 1.47$	$7.73 \pm 0.60$

جدول ۳. پارامترهای لرزه‌خیزی در ایالت لرزه‌زمین‌ساختی ایران مرکزی- شرق ایران (میرزائی و همکاران، ۱۹۹۷).

مدل عدم قطعیت	$\beta$	$\lambda_{3.0}$	$M_{\max}$
مرز پایدار	$1.94 \pm 0.06$	$31.21 \pm 3.26$	$7.80 \pm 0.71$
مرز ملایم	$1.99 \pm 0.09$	$27.93 \pm 4.00$	$7.88 \pm 0.81$

جدول ۴. پارامترهای لرزه‌خیزی در زیرایالت البرز از ایالت لرزه‌زمین‌ساختی البرز - آذربایجان.

مدل عدم قطعیت	$\beta$	$\lambda_{3.0}$	$M_{\max}$
مرز ملایم	$1.96 \pm 0.06$	$16.74 \pm 1.64$	$8.40 \pm 0.71$

ارزشمندی برای تخمین بیشینه زمینلرزه استفاده شده است. در چشمه‌هایی که کلان‌زمینلرزه در آن‌ها روی داده باشد، بزرگی بزرگ‌ترین زمینلرزه، به‌مثابه حداقل مقدار در نظر گرفته می‌شود و با توجه به تاریخچه زلزله‌خیزی، دقت ثبت زمینلرزه، جایگاه لرزه‌زمین‌ساختی و سایر اطلاعات مرتبط، به این حداقل مقدار ۰/۵ تا ۱ واحد افزوده می‌شود و یا مستقیماً به‌عنوان بیشینه بزرگی، مورد استفاده قرار می‌گیرد. در سایر موارد، توجه ویژه به شرایط زمین‌شناختی و جایگاه لرزه‌زمین‌ساختی به همراه استفاده از وضعیت زلزله‌خیزی چشمه بالقوه زمینلرزه الزامی است (میرزائی و همکاران، ۱۹۹۹؛ شعبانی و میرزائی، ۲۰۰۷).

۲-۲-۴ میانگین آهنگ رویداد سالانه زمینلرزه‌ها در چشمه‌های بالقوه زمینلرزه

عموماً، در برآورد خطر زمینلرزه، میانگین آهنگ رویداد سالانه زمینلرزه‌ها در چشمه‌های بالقوه زمینلرزه با

۲-۲-۳ تخمین  $M_{\max}$  در چشمه‌های بالقوه زمینلرزه آگاهی از بزرگ‌ترین زمینلرزه‌ای که ممکن است در یک چشمه بالقوه زمینلرزه اتفاق بیفتد از اهمیت فوق‌العاده‌ای برخوردار است، اما، تعیین آن به سادگی امکان‌پذیر نیست. تخمین  $M_{\max}$ ، معمولاً، با استفاده از رابطه‌های تجربی بین بزرگی زمینلرزه و پارامترهای مختلف گسل صورت می‌پذیرد. برآورد بیشینه بزرگی زمینلرزه برای چشمه‌های بالقوه زمینلرزه در ایران، عموماً، برپایه مفهوم تشابه زمین‌ساختی صورت می‌گیرد. بر اساس این مفهوم ساخت‌های فعال زمین‌شناختی که دارای ویژگی‌های مشابهی هستند، پتانسیل زلزله‌خیزی مشابهی دارند و عدم ثبت رویداد زمینلرزه مرتبط با آنها نشانه پایین بودن استعداد زلزله‌خیزی آنها نیست. در هر حال، برآورد بیشینه بزرگی برای یک زون چشمه، قضاوت علمی قابل توجهی را می‌طلبد. در شرایطی که چشمه زمینلرزه‌ای دارای تاریخچه زلزله‌خیزی مستندی باشد، از آن به‌مثابه راهنمای

بزرگی در ایالت لرزه‌زمینساختی برابر است با (شی و جانگ، ۱۹۹۶):

$$\lambda_{m_j} = \frac{2\lambda \exp[-\beta(m_j - M_{\min})sh(0.5\beta\Delta M)]}{1 - \exp[-\beta(M_{\max} - M_{\min})]},$$

$$M_{\min} \leq m \leq M_{\max} \quad (2)$$

که در آن،  $\beta = b \ln 10$  و  $b$  همان مقدار به کاررفته در رابطه بزرگی - فراوانی گستره مورد مطالعه،  $m_j$  مقدار مرکزی  $j$  آمین بازه بزرگی،  $sh$  تابع سینوس هیپربولیک و  $\Delta M$  پهنای بازه بزرگی،  $M_{\max}$  و  $M_{\min}$  به ترتیب کمترین مقدار بزرگی که می‌تواند سازه‌های مهندسی را تحت تأثیر قرار دهد (معمولاً  $M_s = 4.0$ ) و بیشینه بزرگی مورد انتظار در گستره مورد مطالعه است. برای  $l$  آمین چشمه بالقوه زمینلرزه در ایالت لرزه‌زمینساختی، میانگین آهنگ رویداد سالانه  $j$  آمین بازه بزرگی به صورت زیر است (شی و جانگ، ۱۹۹۶؛ شعبانی و میرزائی، ۲۰۰۷):

$$\lambda_{l,m_j} = \frac{2\lambda \exp[-\beta(m_j - M_{\min})sh(0.5\beta\Delta M)]}{1 - \exp[-\beta(M_{\max} - M_{\min})]} f_{l,m_j},$$

$$M_{\min} \leq m \leq M_{\max} \quad (3)$$

که در آن،  $\lambda_{l,m_j}$  و  $f_{l,m_j}$  به ترتیب آهنگ رویداد سالانه و تابع توزیع مکانی  $j$  آمین بازه بزرگی در  $l$  آمین چشمه بالقوه زمینلرزه هستند. شعبانی و میرزائی (۲۰۰۷) جزئیات روش محاسبه تابع توزیع مکانی را شرح داده‌اند. تابع توزیع مکانی مربوط به ۳۹ چشمه بالقوه زمینلرزه در بازه‌های بزرگی مختلف در هر ایالت لرزه‌زمینساختی به تفکیک در جدول پ-۱ پیوست نشان داده شده است. در مناطقی که کمبود اطلاعات اجازه تعیین چشمه‌های بالقوه زمینلرزه را نمی‌دهد و حتی در نواحی‌ای که گسل‌های

انتگرال‌گیری معین بر روی رابطه بزرگی - فراوانی محاسبه می‌شود. این روش نمی‌تواند ناهمگنی مکانی لرزه‌خیزی را منعکس کند. برای مشخص کردن آهنگ فعالیت زمینلرزه‌های کوچک و بزرگ در چشمه‌های بالقوه زمینلرزه، مفهوم تابع توزیع مکانی برای بازه‌های بزرگی معین توسط شی و همکاران (۱۹۹۲) معرفی شده، که در این مطالعه مورد استفاده قرار گرفته است. تابع توزیع مکانی، به نوعی پیوند توزیع احتمال بزرگی و مکان را نمایش می‌دهد (شی و گائو، ۱۹۹۳). در این روش، ایالت لرزه‌زمینساختی به منزله واحد آماری برای تخمین پارامترهای لرزه‌خیزی (مقدار  $b$ ، میانگین آهنگ رویداد سالانه  $\lambda$ ) در نظر گرفته می‌شود.

میانگین آهنگ رویداد سالانه زمینلرزه‌ها در ایالت لرزه‌زمینساختی، در نهایت، به بازه‌های بزرگی تعیین شده در چشمه‌های بالقوه زمینلرزه نسبت داده خواهد شد. در عمل، هر چشمه بالقوه زمینلرزه در ایالت لرزه‌زمینساختی با حرف  $l$  نمایش داده خواهد شد، و بازه بزرگی  $M_{\min} \leq m \leq M_{\max}$ ، به مجموعه ناپیوسته‌ای از بازه‌های بزرگی تقسیم خواهد شد که مقدار مرکزی  $j$  آمین بازه بزرگی  $m_j$  می‌باشد. رابطه تابع توزیع احتمال  $l$  و  $j$  (و  $l$  به ترتیب متغیرهای تصادفی توصیف‌کننده موقعیت چشمه بالقوه زمینلرزه در یک ایالت لرزه‌زمینساختی و بازه‌های بزرگی هستند)، می‌تواند به صورت زیر نوشته شود (شی و گائو، ۱۹۹۳؛ شعبانی و میرزائی، ۲۰۰۷):

$$p\{L=l, J=j\}$$

$$l=1,2,3,\dots,N_s,$$

$$j=1,2,3,\dots,N_m, \quad (1)$$

که در آن،  $N_s$  تعداد کل چشمه‌های بالقوه زمینلرزه در ایالت لرزه‌زمینساختی و  $N_m$  تعداد بازه‌های بزرگی را نشان می‌دهد. میانگین آهنگ رویداد سالانه  $j$  آمین بازه

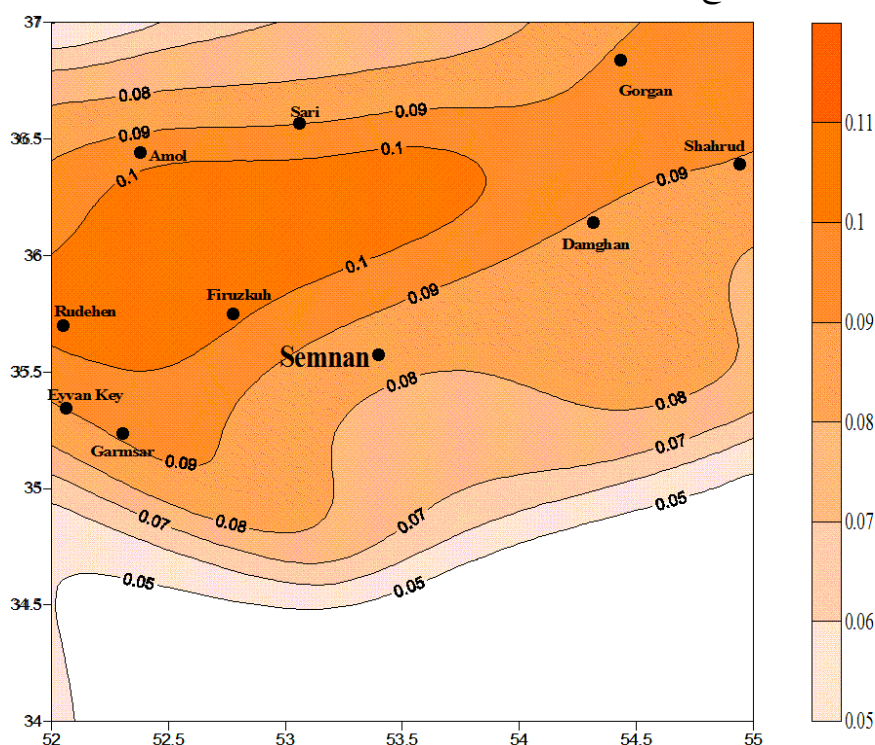
احتمال فزونی در ۵۰ سال (به ترتیب دوره بازگشت ۵۰ و ۴۷۵ سال) با استفاده از میانگین با ضریب وزنی یکسان سه رابطه تضعیف بور و اتکینسون (۲۰۰۸)، کمبل و بزرگ‌نیا (۲۰۰۸) و چیو و یانگ (۲۰۰۸)، محاسبه شده و براساس مقادیر به دست آمده، نقشه‌های پهنه‌بندی اوج شتاب جنبش زمین برای دو دوره بازگشت ۵۰ و ۴۷۵ سال در گستره مورد مطالعه ترسیم شده است (شکل‌های ۲ و ۳).

با توجه به نقشه‌های پهنه‌بندی (شکل‌های ۲ و ۳) مشاهده می‌شود که سطوح خطر ۱۰٪ و ۶۳٪ در ۵۰ سال به خوبی با روند چشمه‌های بالقوه زمینلرزه و گسل‌های فعال منطقه هماهنگی دارند. بخش جنوبی این گستره در ایالت لرزه‌زمین‌ساختی ایران مرکزی-شرق ایران قرار دارد که خطر نسبی بسیار کمتری دارد. هرچه در این گستره به سمت شمال، شمال غرب و غرب پیش می‌رویم به دلیل وجود گسل‌های فعال، خطر نسبی افزایش می‌یابد.

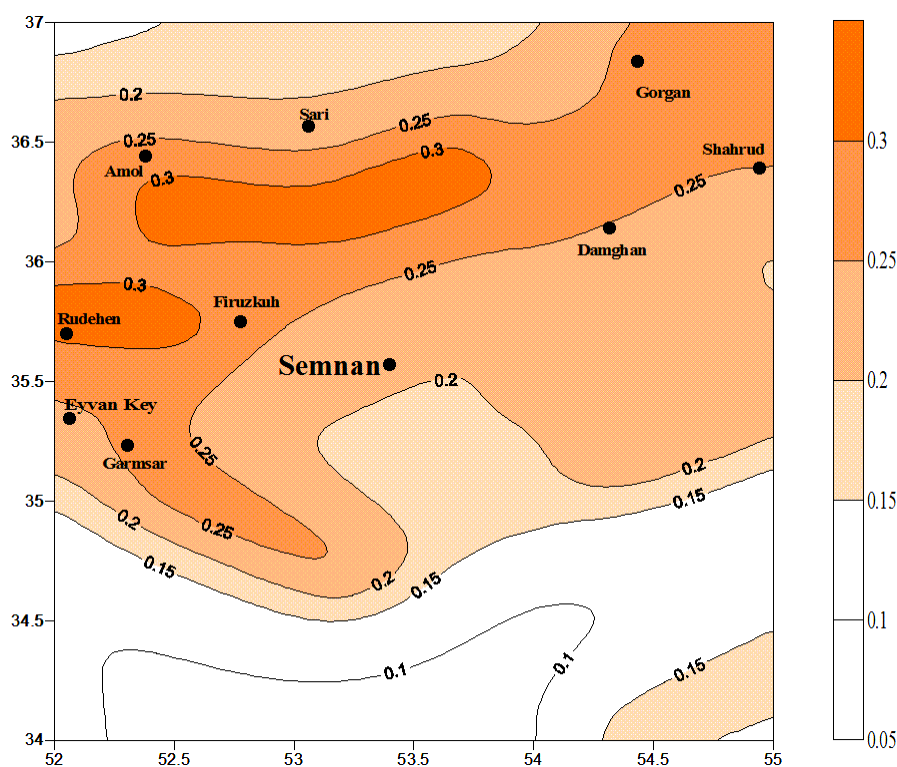
فعال تعیین شده‌اند، لازم است که لرزه‌خیزی زمینه مدل-سازی شود. در مفهوم لرزه‌خیزی زمینه، زمینلرزه‌های کوچک و متوسط در هر ناحیه به‌طور تصادفی روی می‌دهند. زمینلرزه زمینه، بسته به سطح زلزله‌خیزی منطقه، با بزرگی در حدود ۶/۵ و پایین‌تر تعیین می‌شود. در این مطالعه برای ایالت‌های لرزه‌زمین‌ساختی کپه‌داغ و ایران مرکزی-شرق ایران، بزرگی ۵/۵ و برای ایالت لرزه‌زمین-ساختی ایالت البرز-آذربایجان بزرگی ۶/۰، به منزله زمینلرزه زمینه در نظر گرفته شده است.

### ۳-۲ برآورد خطر و پهنه‌بندی زمینلرزه‌ای گستره مورد مطالعه

با استفاده از روش احتمالاتی اصلاح‌شده، برای شبکه‌ای از نقاط با فاصله ۰/۱ درجه، در محدوده ۵۲° تا ۵۵° طول شرقی و ۳۴° تا ۳۷° عرض شمالی، مقادیر اوج شتاب جنبش زمین (PGA) برای سطوح خطر ۶۳٪ و ۱۰٪



شکل ۲. نقشه پهنه‌بندی خطر زمینلرزه به روش احتمالاتی اصلاح‌شده برای اوج شتاب جنبش زمین با احتمال فزونی ۶۳٪ در ۵۰ سال، دوره بازگشت ۵۰ سال، واحد شتاب برحسب  $g$  است.



شکل ۳. نقشه پهنه‌بندی خطر زمینلرزه به روش احتمالاتی اصلاح‌شده برای اوج شتاب جنبش زمین با احتمال فزونی ۱۰٪ در ۵۰ سال، دوره بازگشت ۴۷۵ سال، واحد شتاب برحسب  $g$  است.

مختلف و در فواصل مختلف از ساختگاه، ترکیب می‌شوند و به‌صورت کمی مشخص نیست که جنبش زمین به‌دست آمده در یک ساختگاه، ناشی از مشارکت کدام چشمه‌ها است و کدام چشمه نقش بیشتری دارد. مفهوم واهم‌افزایی خطر زمینلرزه به‌منظور تعیین مشارکت نسبی رویدادهای مختلف در کل خطر برآورد شده، معرفی شده است (بارانی و همکاران، ۲۰۰۹). اهمیت مسئله در این است که زمینلرزه‌های با بزرگی متفاوت و در فواصل مختلف از ساختگاه دارای ویژگی‌های متفاوتی از نظر محتوای بسامدی، مدت دوام و نیز سایر پارامترهای جنبش زمین هستند. این مسئله به‌خصوص برای محاسبات و تحلیل‌های دینامیکی سازه‌ها دارای اهمیت ویژه‌ای است. تعیین زمینلرزه طرح به‌منظور طراحی و محاسبات مربوط به مقاوم‌سازی سازه‌ها در مقابل خطر زمینلرزه و عواقب ناشی از آن، ضروری است؛ زیرا، انتخاب و یا مدل‌سازی

اوج شتاب جنبش زمین در محدوده چشمه ۵، شامل گسل - های مشا و بایجان، و چشمه شماره ۸، شامل گسل لله‌بند و قطعه غربی گسل شمال البرز، و چشمه شماره ۹، شامل قطعه شرقی گسل شمال البرز و مازندران - خزر و گسل بادله به‌دست آمده است. با توجه به نقشه‌پهنه‌بندی اوج شتاب جنبش زمین با دوره بازگشت ۴۷۵ سال مناطق دارای بیشترین خطر مربوط به گسل‌های شمال البرز، مازندران - خزر، مشا، بایجان، آستانه و دامغان می‌شود.

## ۲-۵ واهم‌افزایی خطر زمینلرزه

در تحلیل خطر احتمالاتی، پارامترهای بزرگی ( $M$ )، فاصله ( $R$ ) و انحراف معیار ( $\varepsilon$ )، در انتگرال‌گیری وارد می‌شوند تا میانگین سالانه آهنگ فزونی پارامتر جنبش زمین از یک مقدار معین در یک ساختگاه به‌دست آید. بنابراین، جنبش ناشی از همه زمینلرزه‌ها با بزرگی‌های



خود را دارند. مزیت انتخاب مقدار میانگین بزرگی و فاصله، مستقل بودن از ابعاد خانک است، اما، در صورتی - که دو یا چند چشمه با سهم مشابه مشارکت در خطر وجود داشته باشند، سناریوی حاصل از میانگین‌گیری را نمی‌توان به یک سناریوی واقعی نسبت داد.

واهم‌افزایی خطر زمینلرزه می‌تواند در حالت‌های یک-بُعدی برای  $M$  یا  $R$ ، دو بُعدی برای  $M$  و  $R$  و سه بُعدی برای  $M$ ،  $R$  و  $\varepsilon$  انجام شود. پارامترهای مورد نیاز برای مشخص کردن یک سناریوی زمینلرزه، بزرگی،  $M$  و فاصله چشمه تا ساختگاه،  $R$  و  $\varepsilon$  توصیف‌کننده تعداد انحراف استاندارد لگاریتم پارامتر جنبش زمین از مقدار محاسبه شده است (مک‌گایر، ۱۹۹۵).

برای انجام فرآیند واهم‌افزایی خطر زمینلرزه در مرکز شهر فیروزکوه، نخست برای مختصات جغرافیایی سنگ بستر ساختگاه شهر فیروزکوه، مقادیر اوج شتاب جنبش زمین و شتاب طیفی با ۵٪ میرایی در دوره‌های تناوب ۰/۲ و ۲/۰ ثانیه برای سطوح خطر ۶۳٪ و ۱۰٪ با استفاده از روابط تضعیف بور و اتکینسون (۲۰۰۸)، کمبل و بزرگ‌نیا (۲۰۰۸) و چیو و یانگ (۲۰۰۸) با کمک نرم‌افزار EZ - FRISK7.43 به روش احتمالاتی محاسبه شده‌است؛ سپس، برای هر یک از مقادیر  $S_a(T, 5\%)$  محاسبات واهم‌افزایی با ابعاد خانک یکنواخت بزرگی، ۰/۴ واحد و فاصله، ۱۰ کیلومتر انجام شده است.

تاریخچه زمانی، متناسب با زمینلرزه طرح مشخص شده برای ساختگاه، صورت می‌گیرد و به دنبال آن بررسی و مدل‌سازی خصوصیات دینامیکی جنبش زمین و تأثیر آن بر سازه‌ها از جمله مدت دوام زمینلرزه، تپ‌های بحرانی و تحلیل رفتار غیرخطی سازه‌ها، به این وسیله امکان‌پذیر می‌شود (مک‌گایر، ۱۹۹۵؛ کرامر و پترسون، ۱۹۹۶). در واقع، مسئله مهم یافتن فاصله و بزرگی زمینلرزه‌ای است که خطر زمینلرزه به دست آمده در یک سطح معین را بتوان به آن نسبت داد. به دلیل ماهیت انتگرالی این محاسبات امکان معرفی زمینلرزه‌ای که بیشترین خطر در یک سطح مشخص از جنبش زمین برای ساختگاه را به دنبال خواهد داشت، وجود ندارد (مک‌گایر، ۱۹۹۵). مشارکت نسبی هر یک از بازه‌های  $M$ ،  $R$  و  $\varepsilon$  در میانگین آهنگ فزونی سالانه برای مقدار معین پارامتر جنبش زمین در هر ساختگاه قابل ارزیابی است. همچنین، بازه‌هایی با عنوان سناریوی کنترل‌کننده خطر غالب معرفی می‌شوند که بیشترین مشارکت نسبی در کل خطر زمینلرزه را دارند. بازه‌های با بیشترین مشارکت نسبی در خطر، با تابع جرمی احتمال یا تابع چگالی احتمال بزرگی، فاصله و انحراف معیار  $(M, R, \varepsilon)$ ، بیشتر با عبارات آماری میانگین و مُد، تعیین می‌شود (بنرتز، ۱۹۹۲ و چپمن، ۱۹۹۵). معمولاً، هر دو مقدار میانگین و مُد  $M$ ،  $R$  و  $\varepsilon$  برای معرفی رویداد سناریو به کار می‌روند و هر یک مزایا و معایب

جدول ۵. نتایج واهم‌افزایی  $M - R$  برای مقادیر اوج شتاب جنبش زمین و شتاب طیفی در دوره‌های تناوب ۲/۰ و ۰/۲ ثانیه در دوره بازگشت ۵۰ و ۴۷۵

سال برای شهر فیروزکوه.

MRP (yr)	Sa (0.2 s)		Sa (2.0 s)		PGA	
	Mean Mag.	Mean Dis. (km)	Mean Mag.	Mean Dis. (km)	Mean Mag.	Mean Dis. (km)
50	5.7	34	6.3	65	5.7	32.6
474	6.0	23	6.6	43.5	5.9	22.5

نتایج نشان می‌دهد اوج شتاب جنبش زمین با دوره بازگشت ۵۰ سال توسط سناریو با بزرگی میانگین ۵/۷ با فاصله میانگین ۳۲/۶ کیلومتر و برای دوره بازگشت ۴۷۵ سال توسط سناریو با بزرگی میانگین ۵/۹ در فاصله میانگین ۲۲/۵ کیلومتر کنترل می‌شود. سناریو با بزرگی ۵/۷ و فاصله میانگین ۳۴ کیلومتر کنترل‌کننده دامنه شتاب طیفی ۰/۲ ثانیه با ۵٪ میرایی با دوره بازگشت ۵۰ سال و سناریو با بزرگی ۶/۳ در فاصله میانگین ۶۵ کیلومتر کنترل‌کننده دامنه شتاب طیفی ۲/۰ ثانیه با ۵٪ میرایی با دوره بازگشت ۵۰ سال می‌باشند. با افزایش دوره بازگشت به ۴۷۵ سال، برای شتاب طیفی دوره تناوب ۰/۲ ثانیه با ۵٪ میرایی، سناریو با بزرگی ۶ و فاصله میانگین ۲۳ کیلومتر و برای شتاب طیفی دوره تناوب ۲/۰ ثانیه با ۵٪ میرایی، سناریو با بزرگی ۶/۶ و فاصله میانگین ۴۳/۵ کیلومتر کنترل‌کننده خطر در ساختگاه هستند. با توجه به نتایج حاصل، در دوره‌های تناوب پایین سناریوهای با بزرگی متوسط تا بزرگ در فواصل نسبتاً نزدیک و در دوره‌های تناوب بالا سناریوهای با مقادیر بزرگی بیشتر در فواصل دورتر کنترل‌کننده خطر در ساختگاه هستند و با افزایش دوره بازگشت مقدار پارامتر فاصله سناریوهای مُد و میانگین کاهش می‌یابد.

#### تشکر و قدردانی

این تحقیق در قالب طرح پژوهشی شماره 28625/1/01 با استفاده از اعتبارات پژوهشی دانشگاه تهران صورت گرفته است. از معاونت پژوهشی دانشگاه تهران و مؤسسه ژئوفیزیک برای فراهم آوردن این پژوهش قدردانی می‌نمایم. همچنین، از داوران محترم برای پیشنهادات ارزنده و دقت نظر در بررسی مقاله حاضر سپاسگزاریم.

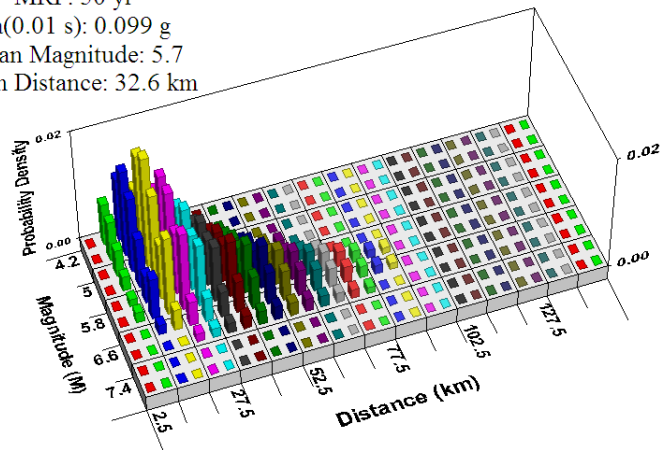
این نرم‌افزار توانایی انجام محاسبات واهم‌افزایی برحسب  $(M-R-E)$  و واهم‌افزایی جغرافیایی را ندارد، به همین سبب نتایج به‌صورت تابع چگالی احتمال (PDF) یک‌بُعدی بزرگی  $(M)$  و فاصله  $(R)$  و PDF مشترک  $(M-R)$  به‌دست می‌آید که در این مطالعه نتایج PDF مشترک  $(M-R)$  در شکل‌های ۴-الف تا ۴-ج برای سطح خطر ۶۳٪ در ۵۰ سال و شکل‌های ۵-الف تا ۵-ج برای سطح خطر ۱۰٪ در ۵۰ سال ارائه شده است. جدول ۵ نتایج واهم‌افزایی دو‌بُعدی  $M-R$  را برای مقادیر اوج شتاب جنبش زمین و شتاب طیفی در دوره‌های تناوب ۲ و ۰/۲ ثانیه در دوره‌های بازگشت ۵۰ و ۴۷۵ سال نشان می‌دهد.

چنانچه جدول ۵ نشان می‌دهد، نتیجه واهم‌افزایی تخمین بزرگی و فاصله  $(M, R)$  زمینلرزه‌ای (و گاهی بیش از یک زمینلرزه) است که بیشترین سهم مشارکت را در خطر برآورد شده در ساختگاه مورد نظر دارد. پارامترهای جنبش زمین برای اهداف مهندسی، از جمله محتوای بسامدی و مدت دوام را می‌توان برای این زوج بزرگی و فاصله با استفاده از شتاب‌نگاشت‌های موجود و یا با شبیه‌سازی تاریخیچه زمانی جنبش زمین و تهیه طیف پاسخ یا طیف فوریه آنها تعیین کرد.

واهم‌افزایی قویاً وابسته به ویژگی‌های لرزه‌خیزی چشمه‌های هم‌جوار ساختگاه است (هارمسن و همکاران ۱۹۹۹؛ پلاتز مونتینلا و همکاران، ۲۰۰۲). سناریوهای دور و بزرگ کنترل‌کننده خطر در ساختگاه، در نواحی با فعالیت کم لرزه‌ای، هستند؛ برعکس در مناطق با فعالیت لرزه‌خیزی بالا یا نواحی‌ای که مکرر زمینلرزه‌های کوچک تا متوسط را تجربه می‌کنند، سهم عمده مشارکت در خطر به سناریوهای نزدیک با بزرگی کوچک تا متوسط تعلق می‌گیرد.

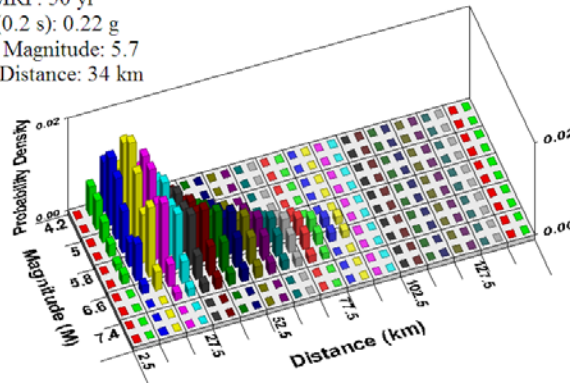
#### ۳ نتیجه‌گیری

MRP: 50 yr  
 Sa(0.01 s): 0.099 g  
 Mean Magnitude: 5.7  
 Mean Distance: 32.6 km



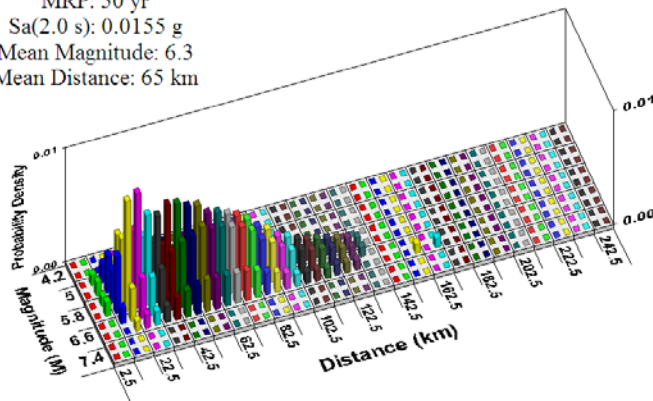
(الف)

MRP: 50 yr  
 Sa(0.2 s): 0.22 g  
 Mean Magnitude: 5.7  
 Mean Distance: 34 km



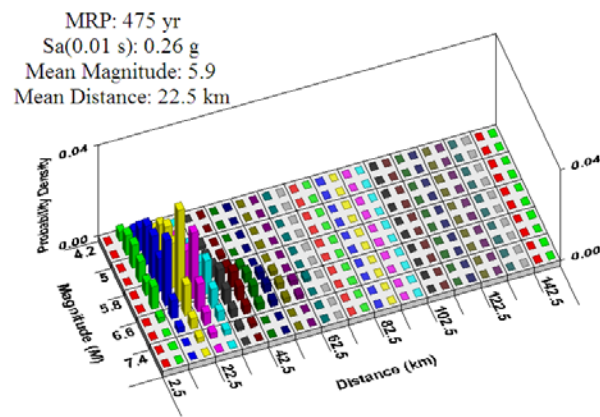
(ب)

MRP: 50 yr  
 Sa(2.0 s): 0.0155 g  
 Mean Magnitude: 6.3  
 Mean Distance: 65 km

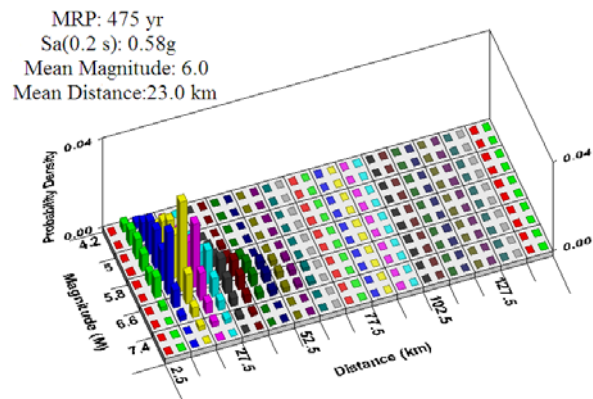


(ج)

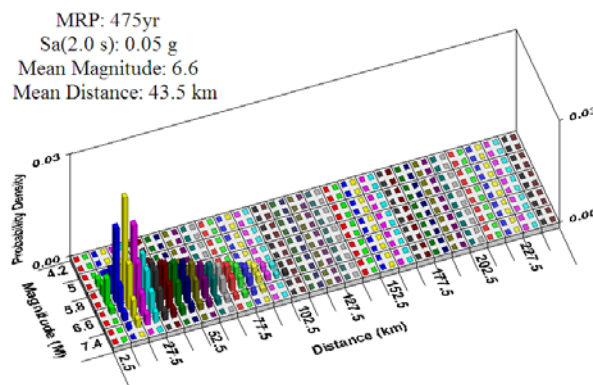
شکل ۴. نمودارهای PDF برحسب  $(M - R)$  برای (الف) اوج شتاب جنبش زمین؛ (ب) شتاب طیفی با ۰.۵ میرایی در دوده تناوب ۰/۲ ثانیه؛ (ج) شتاب طیفی با ۰.۵ میرایی در دوره تناوب ۲/۰ ثانیه؛ با دوره بازگشت ۵۰ سال (۶۳٪ احتمال فزونی در ۵۰ سال) در مرکز شهر فیروزکوه.



(الف)



(ب)



(ج)

شکل ۵. PDF برحسب  $(M - R)$  برای (الف) اوج شتاب جنبش زمین؛ (ب) شتاب طیفی با ۰/۵ میرایی در دوره تناوب ۰/۲ ثانیه؛ (ج) شتاب طیفی با ۰/۵ میرایی در دوره تناوب ۲/۰ ثانیه؛ با دوره بازگشت ۴۷۵ سال (۱۰٪ احتمال فزونی در ۵۰ سال) در مرکز شهر فیروزکوه.

## منابع

- میرزائی، ن.، قیطانچی، م.، ناصریه، س.، رئیسی، م.، ظریفی، ز. و طبائی، ق.، ۱۳۸۱، پارامترهای مبنایی زمینلرزه‌های ایران: انتشارات دانش‌نگار.
- Abdi, F., Mirzaei, N., and Shabani, E., 2013, Ground-motion scenarios consistent with PSH deaggregation for Tehran, capital city of Iran: *Nat. Hazards, Earth Syst. Sci.*, **13**, 679–688.
- Barani, S., Spallarossa, D., and Bazzurro, P., 2009, Disaggregation of probabilistic ground-motion hazard in Italy, *Bull. Seismol. Soc. Am.*, **99**, 2638–2661.
- Bazzurro, P., and Cornell, C. A., 1999, Disaggregation of seismic hazard, *B. Seismol. Soc. Am.*, **89**, 501–520, 1999.
- Benreuter, D. L., 1992, Determining the controlling earthquake from probabilistic hazards for the proposed Appendix B: Lawrence Livermore National Laboratory Report UCRL-JC-111964, Livermore, California.
- Benreuter, D. L., Boissonnade, A. C., and Short, C. A., 1996, Investigation of techniques for the development of seismic design basis using probabilistic seismic hazard analysis: Lawrence Livermore National Laboratory, Rept. NUREG/CR-6606, prepared for U.S. Nuclear Regulatory Commission.
- Boissonnade, A., Chokshi, N., Benreuter, D., and Murphy, A., 1995, Determination of controlling earthquake from probabilistic seismic hazard analysis for nuclear reactor site: Proc. of the Thirteenth International Conference on Structural Mechanics in reactor technology, SMiRT 13, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Brazil, August 13–18, 771–776.
- 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 0.01s and 10.0s: *Earthquake Spectra*, **24**(1), 99–138.
- Campbell, K. W., and Bozorgnia, Y., 2008, Empirical ground motion model for shallow crustal earthquakes in active tectonic environments developed for the NGA project: Proceedings of Fourteenth World Conference on Earthquake Engineering, Paper No. 03-02-0004.
- Chapman, M. C., 1995, A probabilistic approach for ground-motion selection for engineering design: *Bull. Seismol. Soc. Am.*, **85**, 937–942.
- Chiou, B. S. J., and Youngs, R. R., 2008, An NGA model for the average horizontal component of peak ground motion and response spectra: *Earthquake Spectra*, **24**(1), 173–215.
- Cramer, C. H., and Petersen, M. D., 1996, Predominant seismic source distance and magnitude maps for Los Angeles, Orange, and Ventura Counties, California: *Bull. Seismol. Soc. Am.*, **86**, 1645–1649.
- EZ-FRISK 7.43- Software for Earthquake Ground Motion Estimation. <http://www.ez-frisk.com/> Last visited on 23 August 2010.
- Harmsen, S., Perkins, D., and Frankel, A., 1999, Deaggregation of probabilistic ground motions in the central and eastern United States: *Bull. Seismol. Soc. Am.*, **89**, 1–13.
- Kijko, A., and Graham, G., 1998, "Parametric-Historic" procedure for probabilistic seismic hazard analysis. Part I: Assessment of maximum regional magnitude  $m_{max}$ : *Pure Appl. Geophys.*, **152**, 413–442.
- Kijko, A., and Sellevoll, M. A., 1992, Estimation of earthquake hazard parameters from incomplete data files, Part II: Incorporation of magnitude heterogeneity, *Bull. Seismol. Soc. Am.*, **82**, 120–134.
- Kimball, J. K., and Chander, H., 1996, Department of Energy seismic siting and design decisions: Consistent use of seismic hazard analysis: Proc. Twenty-Fourth Water Reactor Safety Information Meeting 3, 141–160, Bethesda, October 21–23, U.S. Nuclear Regulatory Commission, NUREG/CP-0157.
- McGuire, R. K., 1995, Probabilistic seismic hazard analysis and design earthquakes:

- closing the loop: *Bull. Seismol. Soc. Am.*, **85**, 1275–1284.
- Mirzaei, N., Gao, M., and Chen, Y. T., 1997, Seismicity in major seismotectonic provinces of Iran: *Earthquake Research in China*, **11**, 351–361.
- Mirzaei, N., Gao, M., and Chen, Y. T., 1998, Seismic source regionalization for seismic zoning of Iran: Major seismotectonic provinces: *J. Earthquake Prediction Research*, **7**, 465–495.
- Mirzaei, N., Gao, M., and Chen, Y. T., 1999, Delineation of potential seismic sources for seismic zoning of Iran: *J. Seismology*, **3**, 17–30.
- Peláez Montilla, J. A., Casado, C. L., and Romero, J. H., 2002, Deaggregation in magnitude, distance, and azimuth in the south and west of the Iberian Peninsula: *Bull. Seismol. Soc. Am.*, **92**, 2177–2185.
- Priestley, K., Baker, C., and Jackson, J., 1994, Implications of earthquake focal mechanism data for the active tectonics of the south Caspian Basin and surrounding regions: *Geophys. J. Int.*, **118**, 111–141.
- Shabani, E., and Mirzaei, N., 2007, Probabilistic seismic hazard assessment of the Kermanshah-Sanandaj region of western Iran: *Earthq. Spectra*, **23**, 175–197.
- Shi, Z., and Zhang, Y., 1996, Seismic intensity zoning map of China: in *Achievements of Hazard Prevention and Reduction in China*, Seismological Press, Beijing, 153–164.
- Shi, Z., and Gao, M., 1993, Seismic zoning map of China (review): in *Continental Earthquake*, IASPEI publication series for the IDNDR, **3**, 62–68.
- Shi, Z., Yan, J. and Gao, M., 1992, Research on the principles and methodology of seismic zonation: Results of the trials in North China: *Acta Seismol. Sinica*, **5**, 305–314.
- Tahernia, N., Khodabin, M., and Mirzaei, N., 2011, Mixed model for interoccurrence times of earthquakes based on the expectation-maximization algorithm: *Acta Geophysica*, **59**, 872–890.
- Ye, H., Zhou, Y., Zhou, Q., Yang, W., Chen, G. and Hao, C., 1993, Study on potential seismic sources for seismic zonation and engineering seismic hazard analysis in continental areas: in *Continental Earthquakes*, IASPEI publication series for the IDNDR **3**, 473–478.
- Yucemen, M. S., and Gulkan, P., 1994, Seismic hazard analysis with randomly located sources: *Natural Hazards*, **9**, 215–233.

پیوست

جدول پ-۱. مقادیر تابع توزیع مکانی برای بازه‌های بزرگی در چشمه‌های بالقوه زمینلرزه در ایالت‌های لرزه‌زمین‌ساختی.

ایالت لرزه- زمینساختی	شماره چشمه	5.5< M≤6	6<M ≤6.5	6.5< M≤7	7<M ≤7.5	7.5< M≤8	Mmax
البرز - آذربایجان	۱		۰/۰۶۹	۰/۰۸۴	۰/۰۸۶		۷/۵
	۲		۰/۰۵۰	۰/۰۵۳	۰/۰۸۸		۷/۵
	۳		۰/۰۳۹				۶/۵
	۴		۰/۰۵۱	۰/۰۷۴	۰/۱۴۰		۷/۵
	۵		۰/۰۷۳	۰/۰۸۸	۰/۰۹۱		۷/۵
	۶		۰/۰۴۳	۰/۰۸۹	۰/۱۹۳		۷/۵
	۷		۰/۰۷۵	۰/۱۰۴	۰/۱۶۱		۷/۵
	۸		۰/۱۰۵	۰/۱۵۴			۷
	۹		۰/۰۷۳	۰/۰۸۸			۷
	۱۰		۰/۰۳۷	۰/۰۴۳			۷
	۱۱		۰/۰۴۳				۶/۵
	۱۲		۰/۰۷۶				۶/۵
	۱۳		۰/۰۴۳	۰/۰۵۱	۰/۰۹۲	۱/۰۰۰	۸
	۱۴		۰/۰۳۱				۶/۵
	۱۵		۰/۰۶۴	۰/۰۷۷	۰/۰۵۹		۷/۵
	۱۶		۰/۰۹۳	۰/۱۰۱	۰/۰۹۱		۷/۵
	۱۷		۰/۰۳۴				۶/۵
کهمداغ	۱۸	۰/۲۵۲	۰/۱۹۲				۶/۵
	۱۹	۰/۲۵۲					۶
	۲۰	۰/۲۵۲	۰/۱۹۱		۰/۲۵۲		۷/۵
	۲۱	۰/۲۵۲	۰/۱۸۳		۰/۲۴۳		۷/۵
	۲۲	۰/۲۵۲	۰/۱۹۴		۰/۲۵۵		۷/۵
	۲۳	۰/۲۵۲	۰/۲۴۱		۰/۲۵۱		۷/۵
ایران مرکزی - شرق ایران	۲۴	۰/۲۵۲					۶
	۲۵	۰/۰۴۶					۶
	۲۶	۰/۰۷۲	۰/۱۳۱				۶/۵
	۲۷	۰/۰۷۲	۰/۱۷۲				۶/۵
	۲۸	۰/۰۴۰					۶
	۲۹	۰/۰۸۳					۶
	۳۰	۰/۰۴۶					۶
	۳۱	۰/۱۳۰	۰/۲۶۵				۶/۵
	۳۲	۰/۰۷۳					۶
	۳۳	۰/۰۵۰					۶
	۳۴	۰/۰۵۶					۶
	۳۵	۰/۰۶۹	۰/۱۲۷				۶/۵
	۳۶	۰/۰۵۴					۶
	۳۷	۰/۰۳۶					۶
	۳۸	۰/۰۵۰					۶
	۳۹	۰/۰۷۸	۰/۳۰۴	۱/۰۰۰			۷