



## شبیه‌سازی جنبش نیرومند زمین و ارائه‌ی روابط کاهندگی برای ساختگاه نیروگاه اتمی بوشهر براساس روش تصادفی گسل محدود

محمد رضا آرم\*<sup>۱</sup>، علی حسنخانی<sup>۲</sup>

۱. پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، سازمان انرژی اتمی ایران، صندوق پستی: ۱۳۳۹-۱۴۱۵۵، تهران - ایران  
۲. پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله تهران، صندوق پستی: ۱۹۳۹۵-۳۹۱۳، تهران - ایران

**چکیده:** براساس مقررات IAEA و USNRC، محاسبه‌ی جنبش نیرومند زمین در هنگام زلزله، برای طراحی سازه‌های حاوی مواد پرتوزا، به ویژه نیروگاه‌های اتمی از اهمیت زیادی برخوردار است. در صورت عدم به‌کارگیری مطالعات دقیق لرزه‌خیزی و وقوع زلزله‌های شدید، آلاینده‌های بسیاری از انواع مواد پرتوزا در محیط رها می‌شوند و ضررهای جانی و مالی جبران‌ناپذیری به تأسیسات هسته‌ای، مردم و محیط زیست وارد خواهد شد. در این پژوهش به منظور ارائه‌ی روابط کاهندگی معتبر برای منطقه‌ی مهم بوشهر، از شبیه‌سازی جنبش نیرومند زمین به روش تصادفی (احتمالی) گسل محدود استفاده شده است. نتایج به دست آمده از شبیه‌سازی و نیز رابطه‌ی کاهندگی حاصل، با نتایج استخراج شده از روابط معتبر جهانی و روابط ارائه شده برای منطقه‌ی زاگرس مقایسه شده‌اند و هم‌خوانی خوبی را نشان می‌دهند. مدل پیشنهادی در این مطالعه، رابطه‌ی کاهندگی تئوری-تجربی برای منطقه‌ی حساس بوشهر است که می‌تواند برای ارزیابی ایمنی نیروگاه اتمی موجود، و برای طراحی واحدهای جدید نیروگاه اتمی در این منطقه استفاده شود.

**کلیدواژه‌ها:** ایمنی هسته‌ای، نیروگاه اتمی بوشهر، شبیه‌سازی زلزله، روابط کاهندگی، روش تصادفی گسل محدود

### Simulation of Ground Motion and Development of Earthquake Attenuation Relationships for Boushehr NPP Site Using the Stochastic Finite Fault Method

M.R. Aram\*<sup>1</sup>, A. Hasankhani<sup>2</sup>

1. Nuclear Science and Technology Research Institute, AEOI, P.O.Box: 14155-1339, Tehran-Iran  
2. International Institute of Earthquake Engineering and Seismology, P.O.Box: 19395-3913, Tehran-Iran

**Abstract:** According to the IAEA and USNRC (United State Nuclear Regulatory Commission) regulations, calculating a strong ground motion during an earthquake is of great importance for the design of nuclear facilities, especially nuclear power plants. In the absence of precise seismic studies and in case of severe earthquakes, many radioactive contaminants are released into the environment, with irreparable physical and financial losses, hazarding the nuclear facilities, people and the environment. In this research, in order to develop the earthquake attenuation relationships for Boushehr, an important region, simulation of the ground motion was used along with the stochastic finite fault method. The results obtained from the simulation have been compared with the results obtained from the valid world relations for the Zagros region. Evidently, they show good consistency. The proposed model is a theory-empirical relationship of the Bushehr susceptible region, which can be used to assess the safety of the existing nuclear power plant in Boushehr and to design new nuclear power plants in the future.

**Keywords:** Nuclear Safety, Boushehr Nuclear Power Plant, Earthquake Simulation, Seismic Ground Motion, Attenuation Relation Ships, Stochastic Finite Fault Method



## ۱. مقدمه

در صورت وقوع حوادث بحرانی پس از زلزله‌های شدید، آلاینده‌های بسیاری از انواع مواد پرتوزا در محیط رها می‌شوند و موجب تلفات جانی، بی‌استفاده ماندن زمین‌های کشاورزی و اماکن مسکونی، آلوده شدن منابع آبی، گیاهان و حیوانات خواهند شد. به عنوان نمونه می‌توان به آلودگی‌های منتشر شده و خسارات وارد شده پس از وقوع زلزله ۶/۸ ریشتری در نیروگاه اتمی کاشیوازاکی در سال ۲۰۰۷، و زلزله‌ی ۹ ریشتری در نیروگاه اتمی فوکوشیما در سال ۲۰۱۱ اشاره کرد [۱-۵].

یکی از روش‌های بررسی زمین‌لرزه‌ها با استفاده از شتاب‌نگاشت‌ها، شبیه‌سازی جنبش نیرومند زمین است. شبیه‌سازی جنبش نیرومند زمین به ویژه برای مناطقی که از آن داده‌ای در دسترس نیست، نقش مهمی در برآورد پارامترهای جنبش نیرومند زمین ایفا می‌کند. ویژگی جنبش نیرومند زمین برای طراحی، مقاوم‌سازی و بهسازی سازه‌ها اهمیت زیادی دارد، به طوری که از شبیه‌سازی آن به روش تصادفی (احتمالی) گسل محدود می‌توان برای ارائه‌ی روابط کاهندگی معتبر برای منطقه‌ی مهم بوشهر بهره برد. استفاده از این روش برای ارزیابی ایمنی تأسیسات هسته‌ای موجود مانند واحد اول نیروگاه اتمی بوشهر نیز ضروری است. انجام دقیق این محاسبات به خصوص پس از حادثه‌ی نیروگاه اتمی فوکوشیما اجتناب‌ناپذیر است [۶-۱۰].

به منظور شبیه‌سازی زلزله‌ی منطقه‌ی نیروگاه اتمی بوشهر، ابتدا لازم است لرزه‌خیزی فلات ایران بررسی شود. کمربند کوه-زایی آلپ-همیالیا از اروپای غربی آغاز می‌شود و با عبور از خاورمیانه تا هند و چین گسترش می‌یابد. پژوهش‌های زمین‌ساختی

بیان‌کننده‌ی تراکم بسیار زیاد گسل‌های جوان و فعال در فلات ایران است. زمین‌ساخت کنونی ایران نتیجه‌ی همگرایی جنوب غربی-شمال شرق بین صفحه‌ی عربی در جنوب غرب و اوراسیا در شمال شرق آنست [۱۰]. سرعت همگرایی صفحه‌ی عربی نسبت به اوراسیا براساس اندازه‌گیری‌های GPS حدود  $22 \pm 2$  mm بر سال برآورد شده است [۱۱، ۱۲]. ایران به منزله‌ی یکی از فعال‌ترین مناطق لرزه‌خیز دنیا شناخته می‌شود و تاکنون متحمل زمین‌لرزه‌های ویرانگری شده است. با توجه به کمبود رکوردهای واقعی ثبت شده‌ی جنبش نیرومند زمین، شبیه‌سازی زلزله‌ها با هدف شناخت بهتر پارامترهای آن اجتناب‌ناپذیر است.

متأسفانه باید گفت که حداکثر پنجاه سال تاریخچه‌ی ثبت رکورد در سراسر دنیا برای دربرگیرنده‌ی همه حالات انتشار موج در محیط، نوع ساختگاه، فرایند گسیختگی روی گسل و رابطه‌ی هندسی بین ساختگاه و گسل که امکان وقوع دارند، برای این هدف کافی نیست. این مسئله به ویژه در حوزه‌ی نزدیک گسل شدیدتر احساس می‌شود. به عنوان نمونه، پالس‌های حاصل از رکوردهای زلزله‌های حوزه‌ی نزدیک گسل در منطقه‌ی کالیفرنیا شبیه‌سازی، و در نهایت روابط کاهندگی مدنظر استخراج شده‌اند [۱۳]. قبل از وقوع زلزله ۱۹۹۹ چی چی در تایوان و زلزله ۱۹۹۹ از میت ترکیه، در سراسر دنیا تنها حدود ۲۰ رکورد ناشی از زلزله‌های با بزرگای بیش از ۷ در فاصله‌ی کم‌تر از ۲۰ km از گسل وجود داشت [۱۴]. زلزله‌ی ترکیه ۵ رکورد و زلزله‌ی تایوان ۶۵ رکورد به این مجموعه اضافه کرد، اما تنها دو سناریوی گسیختگی گسل، به دانش ما اضافه شد، در حالی که هزاران سناریوی محتمل دیگر امکان وقوع دارند [۱۴]. این موضوع زلزله‌شناسان و مهندسان زلزله را برآن داشت که با استفاده از روش‌های گوناگون شبیه‌سازی اعم از تجربی و تئوری، به تخمین پارامترهای مربوط به جنبش نیرومند زمین در حوزه‌ی نزدیک گسل با ضریب اطمینان قابل قبولی اقدام کنند. برای نمونه، به منظور گسترش روابط کاهندگی نسل جدید (NGA) در کالیفرنیا، برای مطالعه‌ی ضریب اثر فرا-دیواره در زوایای مختلف گسل و هندسه‌ی ساختگاه نسبت به آن، از روش‌های شبیه‌سازی کمک گرفته شده است [۱۵]. زعفرانی و همکاران [۱۶] از رابطه‌ی تئوری برای شبیه‌سازی پالس پریرود بلند زلزله‌ی بم در ایستگاه بم استفاده کرده‌اند و نتایج مناسبی به دست آورده‌اند. این روش هم‌چنین برای تهیه‌ی طیف طرح ویژه‌ی ساختگاه برای سد گتوند در استان خوزستان به کار رفته است [۱۷]. این سد در فاصله پنج کیلومتری گسل فشاری لهری قرار دارد و با توجه به اهمیت حرکات حوزه‌ی نزدیک در طراحی آن، مطالعات تکمیلی برای آن ضروری بوده است. در پژوهشی دیگر زعفرانی و سقراط [۱۸]، با استفاده از مدل بریر<sup>(۱)</sup> و شبیه‌سازی احتمالی، روابطی را برای پیش‌بینی جنبش نیرومند زمین در منطقه زاگرس ارائه داده‌اند.

هدف از این پژوهش، استفاده از نتایج شبیه‌سازی تصادفی و تجزیه و تحلیل رکوردهای شبیه‌سازی شده، به منظور ارائه‌ی



۴۰ ۴۵ ۵۰ ۵۵ ۶۰ ۶۵



شکل ۲. تقسیم‌بندی ایالت‌های لرزه‌زمن ساختی ایران [۲۰].

به دلیل شرایط خاص زمین‌شناسی و وجود گسل‌های فعال بسیار در ایران، کشور ما جزو مناطق زلزله‌خیز دنیا به شمار می‌آید. همه‌جا در ایران به یک میزان لرزه‌خیز نیست. لرزه‌خیزترین ناحیه‌ی ایران (که بیش‌ترین آمار رخداد زلزله‌ها به آن مربوط است) منطقه‌ی زاگرس است. در این ناحیه بیش‌ترین میزان تغییر شکل در پوسته‌ی ایران رخ می‌دهد، ولی فقط حدود ۳٪ از تغییر کل به صورت لرزه‌ای و بقیه به صورت بی‌لرزه (تغییر شکل به صورت خزش و خمش) رخ می‌دهند.

### ۱.۲ ایالت لرزه‌زمن ساختی زاگرس

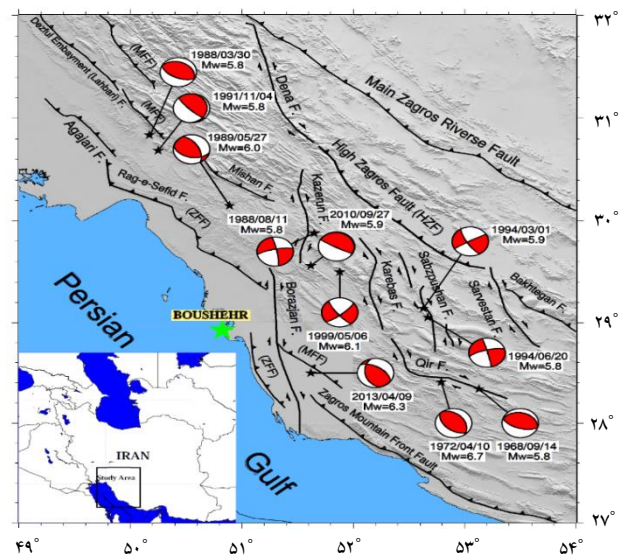
نوار چین‌خورده-رانندگی زاگرس، بخشی از کمربند کوه‌زایی آلپ-همالیا و یکی از جوان‌ترین پهنه‌های برخورد قاره‌ای در زمین است [۲۱] که در حدود ۱۵۰۰ km از کوه‌های تاروس در جنوب غرب ترکیه تا گسل میناب در شرق جزیره‌ی هرمز در جنوب ایران امتداد دارد. زاگرس در حاشیه‌ی شمالی جزیره‌ی عربستان و بر روی پی‌سنگ دگرگونی پرکامبرین قرار گرفته است. از دیدگاه ساختمانی، شکل‌گیری آن با حرکت همگرای مداوم صفحه‌ی عربستان در جنوب غرب و خُرد قاره‌ی ایران مرکزی در شمال شرق مرتبط است که خود ناشی از حرکت به سوی شمال شرق صفحه‌ی آفریقا-عربستان نسبت به اوراسیا است [۲۲، ۲۳]. اگرچه تقریباً همه‌ی پژوهشگران علوم زمین، زون بخیه‌ای بین ایران و زاگرس مرکزی را در امتداد گسل اصلی معکوس زاگرس در نظر می‌گیرند، اما علوی [۲۲، ۲۴]، محل آن را در امتداد مرز شمال شرقی نوار سنندج-سیرجان پیشنهاد کرده

روابط آماری کالیبراسیون است. این روابط در دفاتر فنی و مهندسی کاربرد خواهند داشت.

### ۲. ایالت‌های لرزه‌زمن ساختی ایران

بخشی از نوار آلپی که سطح بالایی از فعالیت‌های لرزه‌ای را نشان می‌دهد و دارای دگرشکلی منحصر به فردی است، فلات ایران است (شکل ۱).

ایالت لرزه‌زمن ساختی، پهنه‌ای است که تحت رژیم‌های ژئودینامیکی کنونی، دارای جایگاه تکتونیکی همانند و الگوی لرزه‌خیزی یکسان باشد [۱۹]. با توجه به این مفهوم، میرزایی و همکاران [۲۰] ایران را به پنج ایالت لرزه‌زمن ساختی عمده: (۱) البرز-آذربایجان، (۲) کپه‌داغ، (۳) زاگرس، (۴) ایران مرکزی و شرق ایران و (۵) مکران تقسیم کرده‌اند (شکل ۲).



شکل ۱. موقعیت لرزه‌شناسی محدوده‌ی ۲۰۰km منطقه‌ی بوشهر در فلات ایران.



مجدد یافته‌اند را تجربه می‌کند [۳۵-۳۷]. این نظریه با حل سازوکار کانونی زمین‌لرزه‌های زاگرس، که گسلش به طور همسان، معکوس نسبتاً بزرگ زاویه (۴۰ تا ۵۰ درجه) در تمامی پهنای گستره‌ی زاگرس را نشان می‌دهد، حمایت می‌شود [۳۶]. بردارهای لغزش زمین‌لرزه‌های زاگرس، جنبش با سمت شمال تا شمال شرق (۳۰ تا ۴۰ درجه) را نشان می‌دهد [۱۰].

قطعات گسلی در زاگرس به ندرت از ۱۱۰ km طولانی‌تر است و قطعات رانندگی پنهان با عدم گسلش در عمق، که با عدم گسلش‌هایی بین تاقدیس‌ها در سطح زمین مرتبط است، جدا شده است [۲۳]. زمین‌لرزه‌های بزرگ در زاگرس عمدتاً بر روی قطعات مختلف گسل اصلی عهد حاضر با راستای غالب شمال غرب- جنوب شرق و سازوکار غالب امتداد لغز راستگرد، در امتداد حاشیه‌ی شمال شرق زاگرس، روی داده‌اند (به عنوان مثال، زمین‌لرزه‌ی ۲۳ ژانویه ۱۹۰۹ سیلاخور، با بزرگی  $M_s=7.4$ ، که بر اثر جنبش گسل دورود روی داده است و بزرگ‌ترین زمین‌لرزه‌ی ثبت شده در زاگرس است).

با توجه به مطالب ذکر شده و آمار رخداد زلزله‌ها به جرأت می‌توان گفت که ایالت زاگرس لرزه‌خیزترین ناحیه ایران است. منطقه‌ی بوشهر در استان بوشهر، از جمله‌ی مراکز حساس ایران است که در پهنه‌ی لرزه‌خیز زاگرس قرار دارد و به دلیل فعالیت‌های صفحه‌ای، از لرزه‌خیزی بالایی برخوردار است. این استان شامل سه گسل کازرون، برازجان، کره‌بس و نواحی زاگرس است. در این منطقه، گسل‌های متعدد فشاری، کششی و تراستی به موازات خمیدگی کوهستان زاگرس وجود دارند و مهم‌ترین آنها گسل عسلویه است که فعالیت لرزه‌خیزی بالایی دارد. روند آنها نیز عمدتاً شمال غربی- جنوب غربی با تمایل به سمت شرقی- غربی است.

## ۲.۲ پیشینه لرزه‌خیزی ناحیه‌ی زاگرس

در سده‌ی گذشته، بیش از هزار رویداد لرزه‌ای در منطقه رخ داده است که ۱۰۹ مورد از آنها دارای بزرگای ۵ و بیش‌تر بوده‌اند و این نشان‌دهنده‌ی لرزه‌خیزی بالا در منطقه‌ی زاگرس است. در بندر طاهری (سیراف) در ۱۷ ژوئن ۹۷۸ (حدود ۱۰۳۴ سال قبل)،

در کناره‌ی جنوب شرق گسل اصلی معکوس زاگرس، سری‌های به شدت تکنونیزه متشکل از توالی رسوبی همراه با رادیولاریت<sup>(۲)</sup> و اُفیولیت‌ها<sup>(۳)</sup> وجود دارند که منطقه‌ی خُرد شده‌ی زاگرس نامیده می‌شود. این ناحیه در رشته‌کوه‌های زاگرس، به علت داشتن مرتفع‌ترین توپوگرافی، زاگرس مرتفع نیز نامیده می‌شود.

زاگرس از دیدگاه زلزله‌خیزی بسیار فعال و زلزله‌خیزترین منطقه‌ی ایران است. بیش از ۵۰٪ زمین‌لرزه‌های ایران که شبکه‌های جهانی آن‌ها را به ثبت رسانده‌اند (داده‌های دور لرزه‌ای)، در گستره‌ی زاگرس روی داده‌اند [۲۵]. زمین‌لرزه‌ها در تمامی پهنه‌ی زاگرس، به طول حدود ۱۵۰۰ و عرض ۲۰۰ تا ۳۰۰ km، روی می‌دهند.

در سوی شمال شرق، لرزه‌خیزی با قطع شدگی ناگهانی مشخصی با راستای شمال غرب - جنوب شرق، که تقریباً بر گسل اصلی زاگرس منطبق شده است، همراه است. اگرچه زمین لرزه‌های نیمه‌عمیق (بین ۷۰ تا ۳۰۰ km)، در مناطق برخورد قاره‌ای می‌توانند بین زمین لرزه‌های کم عمق (عمق کانونی کم‌تر از ۷۰ km) به صورت پراکنده رخ دهند [۲۶]. اما به نظر می‌رسد لرزه‌خیزی در زاگرس از نوع کم عمق است، هرچند اظهارات مغایری نیز وجود دارد [۲۷]. مدل‌سازی قابل اعتماد شکل موج [۲۸-۳۰] نشان می‌دهد که زمین‌لرزه‌های بزرگ در زاگرس معمولاً در حدود ۸ تا ۱۵ km فوقانی پوسته‌ی زمین (زون لرزه‌زا) سرچشمه می‌گیرند. این نتیجه با مطالعات خُرد لرزه‌خیزی [۳۱، ۳۲] که تمامی آنها فعالیت لرزه‌ای در زاگرس را در اعماق کم‌تر از ۲۰ km یافته‌اند، حمایت می‌شود. مطالعات انجام شده‌ی جکسون و فیچ [۳۳] نشان می‌دهد که تمامی زمین‌لرزه‌های به ظاهر عمیق در زاگرس، کوچک بوده، به خوبی ثبت نشده، و نگاشت‌های آنها کیفیت مناسب برای تعیین عمق نداشته است. نشانه‌ی قابل اعتمادی برای رویداد زمین‌لرزه در اعماق زیر پوسته وجود ندارد و به سوی گسل اصلی معکوس زاگرس نیز بر عمق زمین‌لرزه‌ها در زاگرس افزوده نمی‌شود [۳۴].

زاگرس منطقه‌ی وسیعی است که به طور پیوسته دگر شکلی فشاری و کوتاه‌شدگی پی‌سنگ (نه زیر رانندگی ساده‌ی صفحه‌ی عربستان به زیر فلات ایران) در روی گسل‌های نرمال که فعالیت



روش مورد استفاده در این مطالعه از دسته روش‌های تصادفی (کاتوره‌ای)، است که قادر به شبیه‌سازی فرکانس‌های زلزله در محدوده‌ی مورد نظر مهندسان زلزله است.

### ۱.۳ روش‌های تصادفی

روش‌های تصادفی که اولین بار هنکس و مک‌گایر [۳۹] ارائه کردند و بور آن را تکمیل کرد، شتاب زلزله را که سیگنالی با فرکانس‌های بالاتر (اغلب بیش از ۱ Hz) است، به صورت یک نوفه‌ی تصادفی در گستره‌ی بین فرکانس گوشه‌ی  $f_c$  و فرکانس حداکثر  $f_{max}$  و با فرض شکل اسکلت طیف به صورت معلوم (که اغلب طیف مجذور اُمگا است) مدل می‌کنند. این روش از لحاظ محاسباتی بسیار به صرفه است، زیرا بدون نیاز به محاسبه‌ی تاریخچه‌های زمانی، به کمک اصول ارتعاشات تصادفی نظیر قضیه‌ی پارسوال، مقادیر مورد انتظار و میانگین شتاب حداکثر حرکت را تعیین می‌کند. با فرض مشخص بودن طیف فوریه‌ی دامنه‌ی حرکت و استفاده از قضایای مرتبط با فرایندهای تصادفی بور [۴۰] روشی برای به دست آوردن حداکثر سرعت، شتاب و تغییر مکان زمین یا مقادیر متناظر برای پاسخ یک نوسان‌کننده‌ی هارمونیک (مقادیر طیفی) بدون نیاز به محاسبه‌ی تاریخچه‌ی زمانی حرکت ارائه شده است. این روش‌ها با ترکیب حوادث کوچک و وارد کردن مفهوم "گسل‌های محدود" به مدل‌سازی تصادفی، توسعه‌ی چشمگیری یافته‌اند. هنکس، با استفاده از مدل براون، رابطه‌ی ساده‌ای بین طیف شتاب حرکت و لغزش متوسط روی گسل (حاصل ضرب شعاع گسل در کرنش متوسط آن) ارائه کرد و سپس با استفاده از قضیه‌ی پارسوال، در نهایت اُفت تنش مدل براون را به مجذور میانگین مربعات شتاب،  $a_{rms}$  ارتباط داد [۳۸]. تحلیل او از، قضیه‌ی پارسوال<sup>(۷)</sup> شروع شده است.

### ۱.۱.۳ شبیه‌سازی جنبش نیرومند زمین به روش تصادفی گسل محدود

روش منبع نقطه‌ای نمی‌تواند پارامترهای کلیدی لرزش زمین در یک زمین لرزه‌ی بزرگ، مانند مدت زمان طولانی و وابستگی دامنه‌ها به سمت نجومی ایستگاه مشاهده (اثر جهت‌پذیری) را در

زلزله تاریخی بزرگی رخ داده است که از جمله زلزله‌های معروف در خلیج فارس محسوب می‌شود و در آن ۲۰۰۰ نفر کشته شدند. براساس گزارش‌های موجود، این زلزله موجب حمله‌ور شدن امواج سهمگین به ساحل شده که احتمالاً سونامی رخ داده است، ضمن آن که بخش‌های ساحلی بندر سیراف را به زیر آب برده است. با توجه به موارد اشاره شده و زلزله‌های ثبت شده در این منطقه، پیش‌بینی خطرهای ناشی از این زلزله‌ها در منطقه اهمیت ویژه‌ای دارد و لازم است به منظور استحکام هر چه بیش‌تر سازه‌ها در این منطقه‌ی حیاتی کشور، مطالعات گسترده‌تری صورت گیرد.

### ۳. اساس تقسیم‌بندی روش‌های شبیه‌سازی

در مهندسی لرزه‌شناسی، روش‌های بررسی و تحلیل پدیده‌ی زلزله و حرکت‌های حاصل از آن به طور کلی به دو دسته‌ی دینامیکی و سینماتیکی تقسیم شده است. سینماتیکی، شاخه‌ای از مکانیک است که تنها با حرکت‌های مختلف، بدون تجزیه و تحلیل نیروهای دخیل در آن، سر و کار دارد. در مقابل، دینامیک علمی است که به طور مستقیم با سیستم‌های نیرویی و تعادل انرژی مبتنی بر حرکت، روبه‌رو است. بر این مبنای مدل‌ها و مسائل لرزه‌شناسی نیز به دو دسته تقسیم می‌شوند. مدل‌های سینماتیکی بر پایه‌ی توزیع لغزش‌اند که به وضعیت تنش روی گسل اعتنایی ندارند. در حالی که مدل‌های دینامیکی، با فیزیک مسئله‌ی گسیختگی گسل و علل وقوع آن سر و کار دارد. متأسفانه مدل‌های دینامیکی به دلیل پیچیدگی‌های خاص خود، هنوز نتوانسته‌اند جای خود را بازکنند، اما روش‌های سینماتیکی در قالب الگوهای مختلف در کاربردهای عملی برای شبیه‌سازی زلزله‌ها نیز وارد شده‌اند. روش‌های دینامیکی برای درک پدیده‌ی زلزله و نیز استفاده از نتایج حاصل از آنها، در مدل‌های سینماتیکی مفیدند [۳۸].

روش‌های شبیه‌سازی از یک دیدگاه به سه دسته‌ی اصلی روش‌های تعیینی<sup>(۴)</sup> (فرکانس‌های پایین)، تصادفی<sup>(۵)</sup> (فرکانس‌های بالا) و ترکیبی<sup>(۶)</sup> (باند پهن) تقسیم می‌شوند [۳۸].



می‌تواند به صورت منبعی نقطه‌ای در نظر گرفته شود و از آنجا که شبیه‌سازی با منبع نقطه‌ای به محاسبات کم‌تری نیاز دارد، مناسب‌تر است. ارزیابی نتایج منبع نقطه‌ای و صفحه‌ای مشخص می‌کند که مدل منبع صفحه‌ای برآوردهای دقیق‌تری را نسبت به نقطه‌ای

تواب‌های بیش از ۱۵ می‌دهد. برای تواب‌های کم‌تر از ۱۵، هر دو مدل نتایج قابل مقایسه و خوبی را به دست می‌دهند [۳۸].

۲.۱.۳ پیشرفت برنامه‌های شبیه‌سازی به روش گسل محدود اولین برنامه‌ی شبیه‌سازی زمین‌لرزه با روش گسل محدود که براساس روش احتمالی بور نوشته شد FINISM بود که برگرفته از عبارت FINITE FAULT SIMULATION است. این برنامه را که برسنو و اتکینسون در ۱۹۹۷ نوشته‌اند، از سوی بسیاری پژوهشگران استفاده شده است [۴۴]. معتضدیان و اتکینسون نسخه‌ی جدیدتر این برنامه را با نام EXSIM<sup>(۹)</sup> را در سال ۲۰۰۲ نوشته‌اند که مزایای بسیاری نسبت به روش‌های پیشین دارد. این دو، روشی که برای شبیه‌سازی نگاشت‌های نزدیک گسل آثار پالسی مناسبی دارد را به صورت این برنامه عرضه کردند [۴۵]. در این روش از مدل‌سازی تصادفی گسل محدود براساس فرکانس گوشه‌ی دینامیکی استفاده شده است. هم‌چنین برای در نظر گرفتن حالت پالس مانند در نگاشت، از مدل ریاضی مطرح شده‌ی ماورودیس و پاپاجورجیو [۴۶] استفاده شده است. در این روش صفحه‌ی گسل به المان‌هایی تقسیم، و برای هر المان یک رویداد کوچک شبیه‌سازی می‌شود. در نهایت در ایستگاه ثبت نگاشت، شتاب-نگاشت کلی از جمع اثر رویدادهای کوچک حاصل می‌شود. در این مدل یک گسل بزرگ به  $N$  ریزگسل تقسیم، و هر ریزگسل در حکم یک چشمه‌ی نقطه‌ای کوچک در نظر گرفته می‌شود. جنبش‌های نیرومند زمین در هر ریزگسل با استفاده از روش تصادفی چشمه‌ی نقطه‌ای محاسبه، و سپس در نقطه‌ی مورد نظر با یک تأخیر زمانی مناسب، برای به دست آوردن آن در کل گسل، جمع می‌شوند.

نظر بگیرد. به خاطر این محدودیت‌ها در سال ۱۹۷۸ روش مدل‌سازی براساس گسل محدود از سوی هاتزل ارائه شد و در دهه‌های بعد مقبولیت زیادی یافت [۴۱]. این روش جنبه‌های منبع صفحه‌ای را با مدل لرزش زمین براساس منبع نقطه‌ای ترکیب می‌کند و چون محدودیت‌های ذکر شده به‌طور طبیعی در این روش وجود ندارند، هندسه‌ی شکست و اثر جهت‌پذیری در نظر گرفته می‌شوند و نتایج خوبی به دست می‌آید. برای شبیه‌سازی با استفاده از گسل محدود، از روش تأخیر زمانی و جمع شتاب نگاشت‌های مربوط به یک شبکه‌ی دو بُعدی شامل المان‌ها استفاده می‌شود [۴۲].

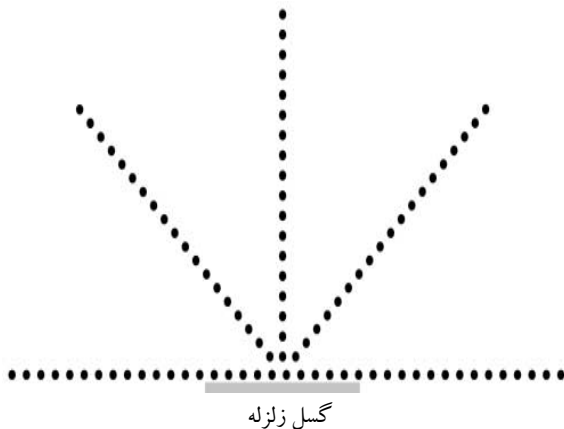
مدل منبع سینماتیکی شامل هندسه‌ی شکست گسل (مساحت شکست خورده، راستای گسل و شیب گسل)، نقطه‌ی شروع شکست و سرعت شکست می‌شود. در این روش یک صفحه‌ی مستطیلی برای گسل در نظر می‌گیرند، صفحه‌ی گسل را نیز به المان‌های مستطیلی تقسیم می‌کنند و فرض می‌شود که شکست از مرکز یکی از المان‌ها (کانون زمین‌لرزه) شروع شده، و به صورت شعاعی انتشار یافته است. سرعت انتشار شکست معمولاً  $0.8$  سرعت موج برشی در نظر گرفته می‌شود [۴۳]. هر خرده گسل وقتی که شکستگی به مرکز آن می‌رسد، به صورت یک منبع کوچک مستقل لرزه‌ای عمل می‌کند و شروع به تابش انرژی لرزه‌ای می‌کند. تاریخچه‌ی زمانی شتاب با در نظر گرفتن روابط زمانی تجربی وابسته به فاصله، میرایی هندسی و مدل‌های میرایی  $Q$  به نقطه‌ی مشاهده انتشار پیدا می‌کند. میرایی شتاب نگاشت‌های به دست آمده از هر المان که براساس طیف منبع برون<sup>(۸)</sup> است، با در نظر گرفتن تأخیر زمانی متناظرشان با یک-دیگر جمع می‌شوند، تا شتاب‌نگاشت کلی حاصل از کل صفحه‌ی گسل به دست آید [۳۸].

در روش شبیه‌سازی براساس گسل محدود، هر المان از گسل به منزله‌ی یک منبع نقطه‌ای محسوب می‌شود که، از مدل ارائه شده از سوی برون با یک فرکانس گوشه و یک آفت تنش ثابت استفاده می‌کند. این روش شبیه‌سازی، روش مناسبی است و به طور گسترده‌ای در برآورد جنبش نیرومند زمین از آن استفاده می‌شود. البته در فواصل دور از گسل، یک منبع صفحه‌ای



صورت شعاعی در اطراف گسل مربوط در فواصل معین قرار بگیرند [۵۰]. در پژوهشی دیگر، گریگور و همکاران [۵۱] رکوردهایی با بزرگای ۸، ۸٫۵ و ۹ در منطقه‌ی کاسکادیا با استفاده از روش گسل‌های محدود را شبیه‌سازی، و به این وسیله رابطه‌ای برای پیش‌بینی جنبش نیرومند زمین در این منطقه ارائه کرده‌اند. آن‌ها در پژوهش خود از چیدمان خطی در اطراف گسل استفاده کرده‌اند.

با بهره‌گیری از مدل‌های اشاره شده‌ی بالا و با استفاده از چیدمان مطالعه‌ی بور و اتکینسون [۴۷] که از هر لحاظ پوشش بسیار خوبی نسبت به منطقه‌ی اطراف گسل دارد، تعداد ۱۷ ایستگاه در فواصل معین ۱، ۲، ۵، ۱۰، ۱۵، ۲۰، ۳۰، ۴۰، ۵۰، ۶۰، ۷۰، ۸۰، ۱۰۰، ۱۲۰، ۱۵۰، ۲۰۰، ۳۰۰ km و در سمت‌های ۰، ۴۵، ۹۰، ۱۳۵، ۱۸۰، ۲۲۵، ۲۷۰، ۳۱۵، ۳۶۰ درجه، در اطراف گسل مسبب فرضی تعبیه شد. برای هر ایستگاه فاصله‌ی جوینر بور از گسل مربوط به آن در شرایط مختلف هندسی گسل محاسبه شده است. نحوه‌ی چیدمان این ایستگاه‌ها در شکل ۳ ارائه شده است.



شکل ۳. چیدمان ایستگاهی مورد استفاده در این مطالعه در اطراف گسل مسبب فرضی [۴۷].

#### ۱.۵ تعاریف فاصله تا گسل

برای بیان فاصله‌ی ساختگاه از گسل، تعاریف مختلفی پیشنهاد شده است. این فواصل شامل فاصله تا تصویر صفحه‌ی گسل ( $r_{zjb}$ )، نزدیک‌ترین فاصله تا صفحه‌ی گسیختگی ( $r_{rup}$ )، فاصله تا کانون زلزله ( $r_{hypo}$ ) و فاصله تا قسمت لرزه‌زای گسل ( $r_{seis}$ ) است [۳۸].

#### ۴. پارامترهای مورد نیاز به منظور استفاده از برنامه‌ی شبیه‌سازی EXSIM

در بخش‌های مختلف ورودی برنامه، به منظور ایجاد پایگاه داده‌ای گسترده، پارامترهای مختلف اعم از شرایط گسل، چیدمان ایستگاه‌ها (دریافت‌کننده‌ها) و پارامترهای سینماتیک مختلف مرتبط با جنبش نیرومند زمین و مورد نیاز در حالت‌های متفاوت در نظر گرفته شده است. در جدول ۱، بخش‌های مختلف و پارامترهای مربوط معرفی شده است. لازم به ذکر است که واحدهای تمام داده‌های ورودی بر مبنای یکاهای جهانی (SI) است.

برای تعیین مختصات گسل، جهت مثبت محور X شمال جغرافیایی، جهت مثبت محور Y شرق، و جهت محور Z راستای عمق گسل در نظر گرفته می‌شوند. بنابراین زاویه‌ی امتداد گسل با شمال جغرافیایی<sup>(۱۰)</sup> صفر لحاظ می‌شود.

جدول ۱. پارامترهای ورودی مدل شبیه‌سازی EXSIM

مرجع	مقدار	داده
[۴۷]	۴.۵-۵.۵-۶-۶.۵-۷-۷.۵	بزرگای گشتاوری زلزله
[۴۸]	۳۵ بار	پارامتر تنش
[۴۸]	۰٫۰۴۳	فاکتور کاپا مربوط به میرایی نزدیک سطح امواج
[۴۹]	استفاده از روابط ولز-کوپراسمیت برای هر بزرگای	اندازه‌ی گسل
[۴۷]	۱۰-۳۰-۵۰-۷۰-۹۰	شیب گسل
[۲۷]	گسل در عمق ۲km زمین فرض شده است.	عمق بالاترین نقطه‌ی گسل ( $Z_{top}$ )
[۳۶]	امتداد لغز- معکوس	ساز و کار گسل
[۴۸]	$0.8 \beta$	سرعت گسیختگی روی گسل
[۴۸]	۳۵۰۰m/s	سرعت موج برشی
[۴۸]	$2.8 \text{ g/cm}^3$	چگالی لایه لرزه‌زا
[۴۸]	$Q(f) = 153 f^{-0.83} (Q_{min}=50)$	معادله‌ی میرایی مربوط به مسیر
[۴۸]	$R^{-1} (R \leq 40), R^{-1.7} (R > 40)$	مشخصات گسترش هندسی امواج
[۴۸]	$T = T_0 + 0.1 R$	زمان تداوم موج در مسیر

#### ۵. چیدمان ایستگاهی در اطراف گسل

در ادبیات فنی، مدل‌های مختلفی برای چیدمان ایستگاه‌های دریافت‌کننده‌ی لرزه‌نگاشت‌ها در اطراف گسل پیشنهاد شده است. به عنوان مثال، فرانکل در شبیه‌سازی‌های خود از مدل دایره‌ای استفاده کرده است، به این ترتیب که ایستگاه‌ها به



۱۲,۳۹                      ۳,۷۹  
۱۵                              ۳,۲۹

## ۶. اثر ساختگاه در فرکانس‌های مختلف

همان‌طور که قبلاً توضیح داده شد با توجه به جنس ساختگاه، دامنه‌ی امواج در فرکانس‌های مختلف دستخوش تغییرات می‌شود. این اثر برای منطقه‌ی بوشهر در جدول ۲ ارائه شده است.

## ۷. طبقه‌بندی نوع سایت

طبقه‌بندی نوع سایت (سنگی یا خاکی) براساس اندازه‌گیری میزان موج برشی در لایه‌ی ۳۰ متری زمین میسر است. به این ترتیب که اگر،  $V_{sp} < 300 \text{ m/s}$  نوع سایت خاکی،  $500 \text{ m/s} < V_{sp} < 700 \text{ m/s}$  رسوب‌های نرم،  $V_{sp} > 700 \text{ m/s}$  نوع سایت سنگی طبقه‌بندی می‌شود [۱۸]. به این منظور و با در نظر گرفتن این مطلب که در پژوهش حاضر، سنگ بستر لرزه‌ای مبنای سنجش اثر در محل ساختگاه در نظر گرفته شده است، از مقدار  $\text{m/s}$   $V_{sp} = 750$  استفاده شده است. بدیهی است که برای در نظر گرفتن اثر محلی ساختگاه، با توجه به شناسایی‌های صورت گرفته، مطالعه‌ی جداگانه‌ای لازم است.

حال با در نظر گرفتن ویژگی‌های بالا، جامعه‌ی آماری قابل اطمینانی از رکوردهای شبیه‌سازی شده برای استخراج پارامترهای مدل پالس در اختیار است. لازم به ذکر است که با توجه به گستردگی داده‌ها و پوشش تقریباً جامع بر تمام شرایط (برای هر ساز و کار، گسل ۵۳۵۵ پالس شبیه‌سازی شده برای ساز و کار امتداد لغز، و ۵۳۵۵ رکورد برای ساز و کار معکوس)، می‌توان روابطی با درصد اطمینان بالا استخراج کرد. در شکل ۴، نمونه‌ای از رکوردهای شبیه‌سازی شده در این پژوهش نمایش داده می‌شود.

## ۸. مقایسه‌ی نتایج حاصل از شبیه‌سازی با روابط کاهندگی معتبر

پیرو مطالعات جامع صورت گرفته در این زمینه، با استفاده از روش تصادفی گسل محدود و در نظر گرفتن شرایط هندسی، ساختگاهی و گسیختگی متفاوت برای منطقه‌ی زاگرس شرایط مختلف لرزه‌ای در نظر گرفته، و رکوردهای شبیه‌سازی شده زیادی تولید شد. به منظور صحت‌سنجی نتایج حاصل از لرزه‌نگاشت‌های شبیه‌سازی شده، نتایج حاصل از شبیه‌سازی‌ها، با دو رابطه‌ی کاهندگی اکار و بومر [۵۲] (پیشنهادی برای منطقه‌ی خاورمیانه) و زعفرانی و سقراط [۱۸] (پیشنهادی برای ایالت زاگرس) که هر دو در ادبیات فنی پیش‌بینی جنبش نیرومند زمین در ایران از اعتبار زیادی برخوردارند، مقایسه شدند. همان‌طور که در شکل‌های ۵ و ۶ مشاهده می‌شود، هم‌خوانی بسیار خوبی بین این نتایج دیده می‌شود و این بیان‌کننده‌ی آن است که رکوردهای شبیه‌سازی شده قابل اطمینان‌اند و خطای سیستماتیکی در روند شبیه‌سازی وارد نشده است.

## ۹. روابط آماری کالیبراسیون برای پیش‌بینی جنبش نیرومند زمین (روابط کاهندگی)

در سال‌های گذشته، مطالعه‌ی شبیه‌سازی رکوردهای جنبش نیرومند زمین به‌خصوص در حوزه‌ی نزدیک گسل گسترش زیادی یافته است و تلاش‌های زیادی برای توسعه‌ی روابط کاهندگی نسل جدید  $NGA^{(1)}$  یا روابط پیش‌بینی جنبش نیرومند زمین  $GMPEs^{(12)}$  و دست‌یابی به بینش دقیقی از جنبش

جدول ۲. مقادیر اثر سایت در فرکانس‌های مختلف [۴۸]

ضریب تقویت	فرکانس (Hz)
۲,۶۹	۰,۶
۲,۱۵	۰,۴۸
۲,۳۲	۰,۵۹
۲,۵۵	۰,۷۱
۲,۸۵	۰,۸۶
۳,۱۱	۱,۰۴
۳,۱۹	۱,۲۶
۳,۴۵	۱,۵۲
۴,۰۷	۱,۸۴
۴,۰۶	۲,۲۳
۴,۳۰	۲,۶۹
۵,۳۶	۳,۲۶
۵,۲۰	۳,۹۵
۵,۱۶	۴,۷۸
۶,۵۵	۵,۷۸
۵,۷۸	۶,۹۹
۴,۸۲	۸,۴۶
۴,۰۳	۱۰,۲۴



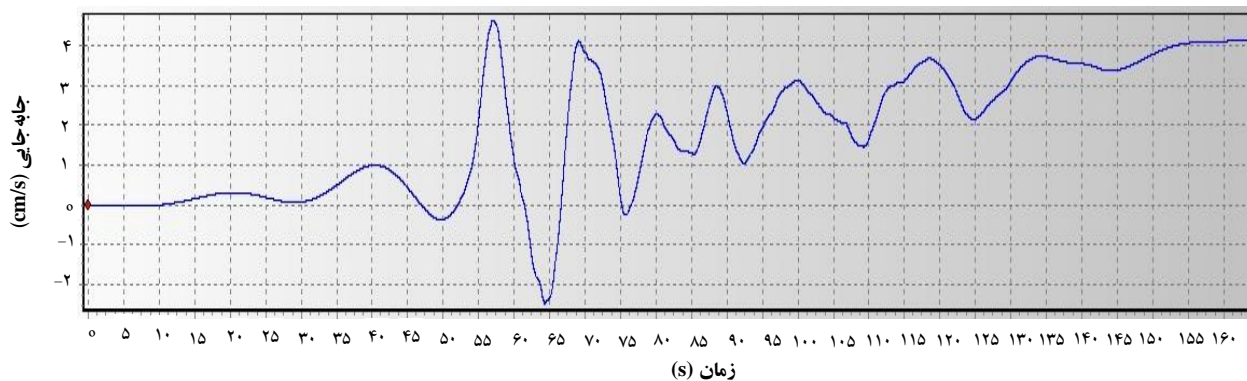
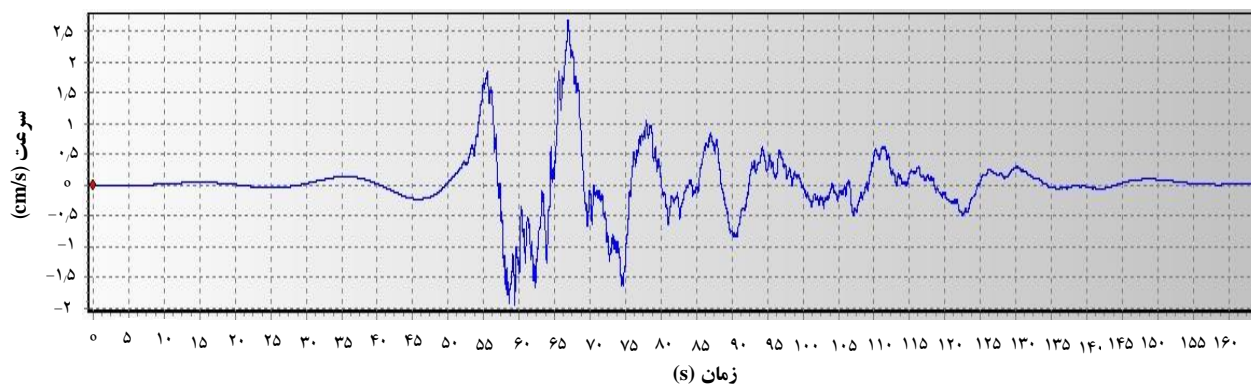
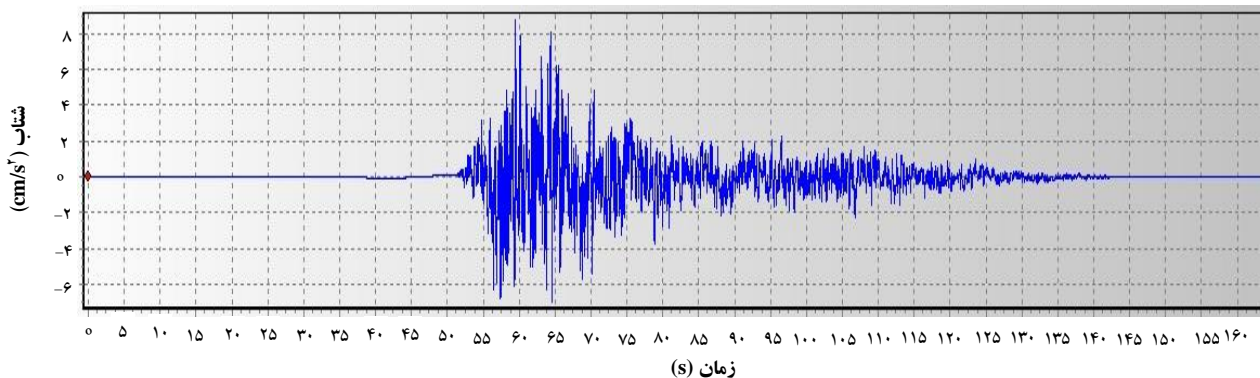


در این رابطه،  $Y$  پارامتر مورد نظر جنبش نیرومند زمین مثل بیشینه شتاب، سرعت یا جابه‌جایی است که به طور کلی با بزرگای  $M$  رابطه‌ی مستقیم، و با فاصله‌ی  $R$  رابطه‌ی معکوس دارد.  $F_1(M)$  تابع بزرگای،  $F_2(M)$  تابع فاصله،  $F_3(M, R)$  تابع مشترک بزرگای و فاصله است.  $F_4(Pi)$  تابع نشان‌دهنده‌ی پارامترهای زمین‌لرزه، نوع خاک است. در این رابطه  $\varepsilon$ ، خطای میانگین تصادفی با مقدار میانگین صفر و انحراف معیار معادل با خطای تخمین  $Y$  است. ضرایب ثابت این روابط به‌طور تجربی براساس نگاهت‌ها به دست می‌آید و با استفاده از روش‌های آماری حاصل می‌شود [۳۸].

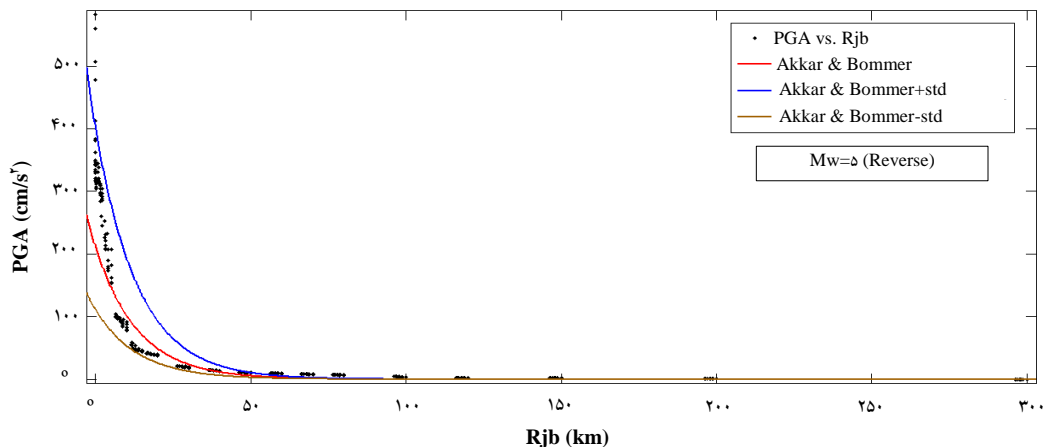
نیرومند زمین در نواحی مختلف زمین در ادبیات فنی انجام شده است. ارائه‌ی روابط آماری برای پیش‌بینی این پارامترها در تولید سازه‌های مقاوم در مقابل اثر تخریبی جنبش نیرومند زمین از اهمیت بالایی برای مهندسين سازه دارند.

روابط کاهندگی، که به صورت تجربی است، رابطه‌ی بین پارامتر جنبش نیرومند زمین (شتاب، سرعت، تغییر مکان، طیف پاسخ و ...) را با بزرگای و فاصله و یا سایر پارامترهای مورد نظر دیگر بیان می‌کند. شکل کلی روابط کاهندگی به صورت زیر بیان می‌شود:

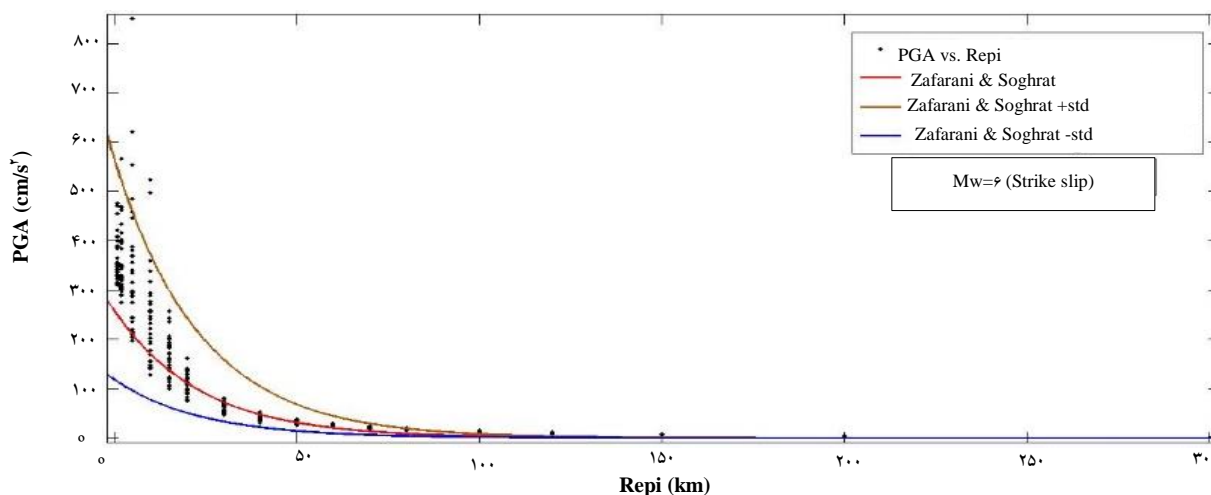
$$(1) \quad Y = b_1 \cdot F_1(M) \cdot F_2(M) \cdot F_3(M, R) \cdot F_4(Pi) \cdot \varepsilon$$



شکل ۴. نمونه‌ی رکورد شبه‌سازی شده در این پژوهش برای بزرگای ۷٫۵ در فاصله‌ی کانونی ۲۹۲ کیلومتری و ساز و کار گسلش امتداد لغز.



شکل ۵. مقایسه‌ی مقادیر PGA به دست آمده از رکوردهای شبیه‌سازی شده با میانگین مقادیر رابطه‌ی کاهندگی اکار و بومر [۵۲].



شکل ۶. مقایسه‌ی مقادیر PGA به دست آمده از رکوردهای شبیه‌سازی شده با میانگین مقادیر رابطه‌ی کاهندگی زعفرانی و سقراط [۱۸].

کالیبره شده باشند، بنابراین نیاز است علاوه بر تأثیر بزرگا، اثر فاصله‌ی ایستگاه‌ها از گسل مسبب (فاصله‌ی جویز- بور) در نظر گرفته شود. از این رو مقادیر پارامترهای به دست آمده در فرکانس‌های مختلف از پالس‌های شبیه‌سازی شده با استفاده از شکل اصلی رابطه‌ی کاهندگی اکار و بومر [۵۲] [رابطه‌ی (۲)] برازش، و ضرایب مربوطه برای هر ساز و کار استخراج شد (جدول‌های ۳ و ۴)، با این تفاوت که ضرایب مربوط به ساز و کار گسل (F) و نوع خاک (S) دخالت داده نشده‌اند. در واقع نتایج رابطه‌ی کاهندگی برای سنگ‌بستر لرزه‌ای ارائه می‌شود:

$$\text{Log}(PSA) = b_1 + b_2 M_w + b_3 (M_w^{\gamma}) + (b_4 + b_5 M_w) \quad (2)$$

$$\text{Log}_e((R_{jb}^{\gamma} + b_6^{\gamma})^{\gamma} + b_7 S_s + b_8 S_A + b_9 S_N + b_{10} F_R$$

پژوهشگران روابط کاهندگی را بر اساس داده‌های جنبش نیرومند زمین‌لرزه‌های رخ داده در نواحی مختلف یا برای کل دنیا ارائه کرده‌اند. بزرگا و فاصله در این روابط به شکل‌های مختلفی بیان شده است. با توجه به پدیده‌ی اشباع برای بزرگای امواج درونی و بزرگای امواج سطحی، روابط منتشر شده‌ی اخیر براساس بزرگای گشتاوری است. نکته‌ی بسیار مهم در استفاده از آنها این است که همگی براساس داده‌های مربوط به یک ناحیه با ویژگی‌های لرزه زمین ساختی متفاوت ارائه شده‌اند. بنابراین استفاده از این روابط برای منطقه‌ی خاص که داده‌های شتاب‌نگاری آن کم یا وجود ندارد، باعث خطا در برآورد پارامتر جنبش نیرومند زمین خواهد شد [۲۸].

از آن‌جا که از ابتدا هدف این پژوهش، توسعه‌ی روابط کاهندگی بود که با تعداد قابل‌قبولی از داده‌های مورد بررسی



۰,۱۱۶	۷,۰۷۴	۰,۲۱۳	-۲,۶۱۱	-۰,۰۵۶	۰,۶۵۲	۲,۲۱۵	۰,۱۷۳
۰,۱۱۴	۷,۲۸	۰,۲۰۵	-۲,۵۸۵	-۰,۰۵۷	۰,۶۸۳	۲,۰۸۳	۰,۱۴۳
۰,۱۱۳	۷,۳۴۹	۰,۲۰۶	-۲,۶۱۲	-۰,۰۵۷	۰,۶۶۳	۲,۱۶۳	۰,۱۱۸
۰,۱۱۳	۶,۸۳۲	۰,۲۰۹	-۲,۶۱۶	-۰,۰۵۵	۰,۶۳۳	۲,۱۷۸	۰,۰۹۸
۰,۱۰۵	۷,۲۶۴	۰,۲۳۹	-۲,۸۴۶	-۰,۰۵۴	۰,۵۵۷	۲,۵۸۵	۰,۰۸۱
۰,۱۰۷	۶,۶۵۶	۰,۲۵۱	-۲,۸۹۳	-۰,۰۵۴	۰,۵۵۳	۲,۵۲۵	۰,۰۶۷
۰,۱۰۵	۶,۲۷	۰,۲۳۵	-۲,۷۳۳	-۰,۰۶۳	۰,۷۰۳	۱,۶۹	(PGA) <sup>۰</sup>

که در این رابطه،  $PSA (cm/s^2)$  میزان طیف پاسخ شتاب حاصل از جنبش نیرومند زمین،  $M_w$  بزرگای گشتاوری زلزله،  $R_{jb} (km)$  فاصله ی جوینر- بور،  $S_s$  و  $S_A$  دو فاکتور مربوط به تعیین نوع خاک،  $F_R$  و  $F_N$  دو فاکتور برای تعیین ساز و کار گسل مربوط است.

شکل ۷، نتایج حاصل را که تغییرات PGA نسبت به بزرگای گشتاوری زلزله و فاصله ی جوینر- بور است، و شکل ۸ طیف پاسخ شتاب به دست آمده از شبیه سازی را نشان می دهند.

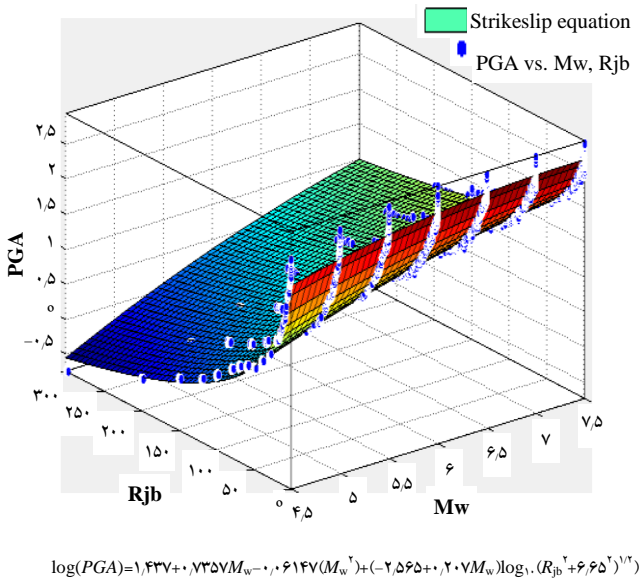
همان طور که پیش تر هم اشاره شد تاکنون محدودیت تعداد رکوردهای واقعی در منطقه ی بوشهر مانع از ارائه ی روابط آماری کالیبراسیون و دقیق برای تخمین پارامترهای مؤثر جنبش نیرومند زمین در این منطقه شده است. اما در این پژوهش، با در اختیار داشتن طیف وسیعی از رکوردهای شبیه سازی شده (حدود ۱۰۷۱۰ رکورد شتاب) می توان امیدوار بود که روابط به دست آمده از دقت و کارایی کافی برخوردار باشند. در این جا ذکر این نکته ضروری است که در تمامی برازش های صورت گرفته، ضریب همبستگی رگرسیون (R-Square) بالای ۰,۹۵ بوده است. باید توجه داشت به دلیل آن که عدم قطعیت در همه پارامترهای چشمه، ساختگاه و مسیر در نظر گرفته نشده است، عدم قطعیت کلی رابطه ی کاهندگی، پایین تر از روابط مشابه است. برای این منظور توصیه می شود که در کاربردهای عملی از انحراف معیار روابط مشابه استفاده شود.

جدول ۳. ضرایب رابطه ی (۲) برای پیش بینی طیف پاسخ شتاب برای ساز و کار گسلش امتداد لغز

$\sigma(std)$	$b_s$	$b_d$	$b_e$	$b_r$	$b_t$	$b_1$	$T$
۰,۰۸۷	۴,۹۵۳	۰,۲۱۴	-۲,۲۸۵	-۰,۱۷	۲,۳۵۱	-۵,۵۴۳	۲,۵۰۰
۰,۰۹۱	۵,۳۲۲	۰,۲۱۴	-۲,۳۲۴	-۰,۱۷	۲,۳۰۷	-۵,۰۵۵	۲,۰۶۶
۰,۱۰۸	۶,۰۵۴	۰,۲۰۲	-۲,۲۹۲	-۰,۱۶۸	۲,۲۴۸	-۴,۵۳۷	۱,۷۰۶
۰,۱	۶,۳۹۶	۰,۲۰۱	-۲,۳۱۸	-۰,۱۶	۲,۱۰۵	-۳,۸۱	۱,۴۱۰
۰,۱۰۲	۶,۶۱۳	۰,۲	-۲,۳۳۲	-۰,۱۴۵	۱,۸۹۴	-۲,۹۳	۱,۱۶۶
۰,۱۱۲	۶,۲۷۳	۰,۱۷۷	-۲,۱۷۳	-۰,۱۲۹	۱,۷۰۲	-۲,۳۰۱	۰,۹۶۳
۰,۱۰۸	۶,۳۵۵	۰,۱۹۶	-۲,۳۲۳	-۰,۱۱۴	۱,۴۸۹	-۱,۴۵	۰,۷۹۶
۰,۱	۵,۷۸۳	۰,۱۹۲	-۲,۲۸۳	-۰,۰۹۷	۱,۲۸۱	-۰,۷۹۷	۰,۶۵۸
۰,۰۹۳	۶,۲۸۹	۰,۲۰۴	-۲,۴۱۲	-۰,۰۸۳	۱,۰۷۷	۰,۰۹۳	۰,۵۴۳
۰,۱۰۷	۶,۱۸۶	۰,۱۹۵	-۲,۳۵۳	-۰,۰۷۲	۰,۹۲۹	۰,۰۶۷	۰,۴۴۹
۰,۱۰۴	۶,۵۶۶	۰,۱۹۶	-۲,۴۰۱	-۰,۰۶۶	۰,۸۳۲	۱,۱۷۴	۰,۳۷۱
۰,۱۰۴	۷,۰۹۷	۰,۱۸۷	-۲,۳۸۸	-۰,۰۶۲	۰,۷۷۹	۱,۵۱	۰,۳۰۷
۰,۰۹۵	۷,۰۱	۰,۱۹۲	-۲,۴۴۲	-۰,۰۶۱	۰,۷۵۷	۱,۶۲۱	۰,۲۵۳
۰,۱۰۳	۸,۳۲۸	۰,۱۸۱	-۲,۴۳۷	-۰,۰۶	۰,۷۵۶	۱,۷۷۹	۰,۲۰۹
۰,۱۰۸	۸,۰۰۱	۰,۱۷۷	-۲,۴۱۵	-۰,۰۵۹	۰,۷۴۸	۱,۷۷۵	۰,۱۷۳
۰,۱۰۹	۷,۷۹۹	۰,۱۷۶	-۲,۴۲۲	-۰,۰۵۹	۰,۷۴۹	۱,۷۴۸	۰,۱۴۳
۰,۱۰۶	۸,۰۴	۰,۱۷۴	-۲,۴۳۸	-۰,۰۵۶	۰,۶۹۶	۱,۹۲۱	۰,۱۱۸
۰,۱۰۸	۷,۳۸۵	۰,۱۷۸	-۲,۴۴	-۰,۰۵۵	۰,۶۵۸	۱,۸۶۹	۰,۰۹۸
۰,۱	۷,۵۷۸	۰,۲۰۷	-۲,۶۶۶	-۰,۰۵۳	۰,۶۰۸	۲,۲۶۲	۰,۰۸۱
۰,۱۰۲	۷,۱۱۹	۰,۲۱۹	-۲,۷۰۸	-۰,۰۵۳	۰,۵۹۵	۲,۲۳۱	۰,۰۶۷
۰,۱	۶,۶۵	۰,۲۰۷	-۲,۵۶۵	-۰,۰۶۱	۰,۷۳۶	۱,۴۴۷	(PGA) <sup>۰</sup>

جدول ۴. ضرایب رابطه ی (۲) برای پیش بینی طیف پاسخ شتاب برای ساز و کار گسلش معکوس

$\sigma(std)$	$b_s$	$b_d$	$b_e$	$b_r$	$b_t$	$b_1$	$T$
۰,۰۸۷	۴,۸۲۴	۰,۲۳۳	-۲,۴۰۷	-۰,۱۶۹	۲,۳۰۸	-۵,۲۹۹	۲,۵۰۰
۰,۰۸۹	۵,۳۱۳	۰,۲۲۹	-۲,۴۲۵	-۰,۱۷	۲,۲۸۲	-۴,۸۷۴	۲,۰۶۶
۰,۱۰۵	۵,۹۴۷	۰,۲۱۸	-۲,۳۹	-۰,۱۶۹	۲,۲۲۹	-۴,۳۸۷	۱,۷۰۶
۰,۰۹۹	۶,۳۰۹	۰,۲۱۵	-۲,۴۰۲	-۰,۱۶۲	۲,۱۱۵	-۳,۷۶۲	۱,۴۱۰
۰,۱۰۲	۶,۴۴۷	۰,۲۱۲	-۲,۴۰۵	-۰,۱۵	۱,۹۴۱	-۳,۰۰۷	۱,۱۶۶
۰,۱۱۶	۵,۹۴۱	۰,۱۹۲	-۲,۲۵۷	-۰,۱۳۵	۱,۷۴۹	-۲,۳۷۷	۰,۹۶۳
۰,۱۱۴	۵,۷۲	۰,۲۱۴	-۲,۴۱۶	-۰,۱۱۹	۱,۵۱۹	-۱,۴۷۳	۰,۷۹۶
۰,۱۰۷	۵,۰۲۷	۰,۲۱۵	-۲,۴۰۵	-۰,۱۰۱	۱,۲۹۸	-۰,۷۵	۰,۶۵۸
۰,۱۰۱	۵,۴۳۲	۰,۲۲۷	-۲,۵۲۷	-۰,۰۸۸	۱,۱۰۳	۰,۰۹۱	۰,۵۴۳
۰,۱۱۲	۵,۷۰۱	۰,۲۱۸	-۲,۴۸۴	-۰,۰۷۶	۰,۹۴۱	۰,۷۴۳	۰,۴۴۹
۰,۱۰۷	۶,۵۳۳	۰,۲۱۶	-۲,۵۲۲	-۰,۰۷	۰,۸۴۵	۱,۲۵۹	۰,۳۷۱
۰,۱۰۶	۶,۹۲۱	۰,۲۱	-۲,۵۲۷	-۰,۰۶۴	۰,۷۵۹	۱,۶۹۸	۰,۳۰۷
۰,۱	۶,۴۲۶	۰,۲۲۲	-۲,۶۱۱	-۰,۰۶۱	۰,۷۰۷	۱,۹۱۷	۰,۲۵۳
۰,۱۱۳	۷,۳۲۷	۰,۲۱۵	-۲,۶۱۷	-۰,۰۵۸	۰,۶۷۸	۲,۱۴۸	۰,۲۰۹





گسل‌های مورد بررسی، و جدول ۵ اطلاعات مربوط به تحلیل خطر تعیینی را ارائه می‌دهند.

یادآور می‌شود نباید انتظار داشت که گسل‌های یاد شده، تنها گسل‌های اصلی در منطقه باشند (شکل ۱). همان‌طور که اشاره شد ممکن است گسل‌هایی به صورت مدفون ناشناخته و در عمق زمین وجود داشته باشند که از دید ما خارج‌اند. از طرف دیگر اکثر گسل‌های کمربند چین‌خورده‌ی زاگرس به صورت پوشیده و عمقی است. به عنوان مثال، شاخه‌ای از گسل پیشانی کوهستان در فاصله‌ای بین ۵ تا ۱۵ کیلومتری مرکز بوشهر قرار دارد که به تازگی در مورد آن بحث و مطالعه شده است و در جدول ۵ مقادیر میانگین برای آنها به کار رفته است. نتایج آنالیز تعیینی خطر زلزله در جدول ۵ ارائه شده است. میزان PGA نیز برای چشمه‌های مختلف محاسبه شده است و برای زلزله‌های طراحی سطح OBE و یا SSE نیروگاه اتمی بوشهر قابل استفاده است.

#### ۱.۱. نتیجه‌گیری

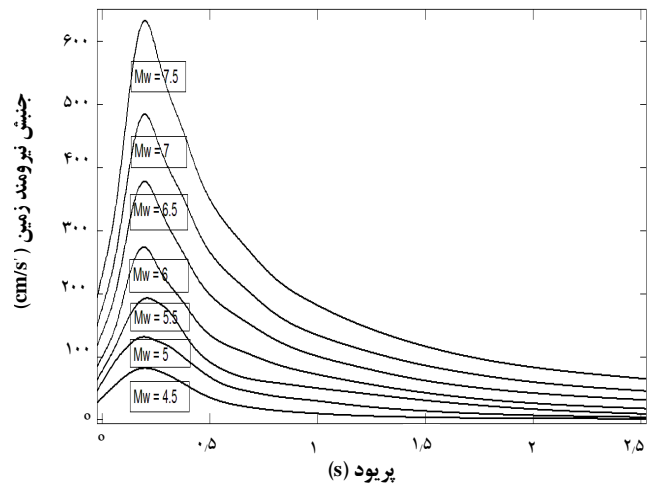
بهترین توصیف جنبش نیرومند زمین با شتاب‌نگارها به دست می‌آید. داده‌های جنبش نیرومند زمین به دست آمده از شتاب‌نگاشت‌ها برای بهبود در طراحی سازه‌های حساس مانند تأسیسات هسته‌ای و برای کاهش خسارات جانی و مالی ناشی از انتشار مواد پرتوزا پس از زلزله‌های آینده دارای اهمیت بسیار بالایی است.

روش‌های شبیه‌سازی اطلاعات مربوط به چشمه‌ی زمین لرزه، انتشار موج بین چشمه و ایستگاه، شرایط ایستگاه و کاهندگی در شبیه‌سازی جنبش نیرومند زمین را در نظر می‌گیرند که در نهایت باعث اطمینان بیش‌تری در تخمین ویژگی‌های جنبش نیرومند زمین در حوزه‌ی زمان و فرکانس می‌شود.

مدل پیشنهادی در این پژوهش، اولین رابطه‌ی کاهندگی تئوری- تجربی برای منطقه‌ی حساس بوشهر است که برای ارزیابی نیروگاه اتمی موجود و طراحی واحدهای جدید نیروگاه اتمی در این منطقه قابل استفاده است. هر چند برای حصول نتایج دقیق‌تر، به شبیه‌سازی‌های پیشرفته‌تر سینماتیکی که قابلیت در نظر گرفتن اثر حوزه‌ی نزدیک را داشته باشد، نیاز است. نتایج ارائه شده در این پژوهش، بر روی سنگ‌بستر لرزه‌ای است و بدیهی است که اثر موضعی ساختگاه، سبب تغییر شتاب‌های برآورد شده خواهد شد.

( $SSE=54.01$ ,  $R-square=0.985$ ,  $RMSE(std)=0.1005$ )

شکل ۷. برازش تغییرات PGA نسبت به بزرگای گشتاوری زلزله و فاصله‌ی جوینر-بور (ساز و کار گسلش امتداد لغز).



شکل ۸. مقایسه‌ی مقادیر میانگین طیف پاسخ شتاب برای بزرگای مختلف برای ساز و کار گسلش امتداد لغز (5% damped).

#### ۱.۰ تحلیل خطر ساختگاه نیروگاه اتمی بوشهر به روش

##### تعیینی

تحلیل خطر لرزه‌ای به دو روش مرسوم تعیینی (DSHA) و تصادفی یا احتمالی (PSHA) انجام می‌شود. در روش تعیینی مراحل کار به شرح زیر است:

۱. تعیین چشمه‌های لرزه‌زا
۲. محاسبه‌ی بزرگ‌ترین زلزله‌ی امکان‌پذیر در منطقه ( $R_{min}$ ,  $M_{max}$ )
۳. انتخاب رابطه‌ی کاهندگی مناسب برای منطقه‌ی مورد نظر که در بخش قبل استخراج شده‌اند.
۴. تجزیه و تحلیل نتایج و ارائه‌ی گزارش تحلیل خطر

برای برآورد تعیینی سطح خطر حداکثر، در ابتدا خصوصیات گسل‌های مهم مورد نظر منطقه، در شعاع محدوده‌ی ۲۲۰ کیلومتری نیروگاه اتمی تعیین شده است. در ادامه، با استفاده از هندسه‌ی گسل و روابط ولز کوپراسمیت (۱۱۹۴) (WeC94) بزرگ‌ترین زلزله امکان‌پذیر برای گسل‌های مسبب تعیین، و با استفاده از رابطه‌ی کاهندگی استخراج، و اکار بومر [۵۲] (AkB10) مقادیر PGA مربوطه محاسبه شده است. شکل ۸،



جدول ۵. مشخصات گسل‌های مهم محدوده و مقادیر PGA مربوطه با استفاده از روابط کاهندگی

شماره	گسل	نوع گسل	طول گسل	$R_{jb}$	$M_{WeC94}$	$PGA_{Eq,2}$	$PGA_{AkB1,0}$
۱	Rage sefid	Reverse	۸۰ km	۱۴۰ km	۷	۱۶ cm/s <sup>۲</sup>	۲۴ cm/s <sup>۲</sup>
۲	Mishan	Reverse	۷۰ km	۱۵۲ km	۷	۱۵ cm/s <sup>۲</sup>	۲۳ cm/s <sup>۲</sup>
۳	Kazerun	Strike Slip	۱۲۵ km	۹۲ km	۷,۳	۲۸ cm/s <sup>۲</sup>	۴۵ cm/s <sup>۲</sup>
۴	Karebas	Strike Slip	۱۵۰ km	۱۲۱ km	۷,۴	۲۳ cm/s <sup>۲</sup>	۳۸ cm/s <sup>۲</sup>
۵	Borazjan	Reverse	۱۸۰ km	۴۰ km	۷,۵	۷۶ cm/s <sup>۲</sup>	۱۱۹ cm/s <sup>۲</sup>
۶	MFF (پیشانی کوهستان)	Reverse	۳۰۰ km	۳۸ km	۷,۹	۹۰ cm/s <sup>۲</sup>	۱۲۵ cm/s <sup>۲</sup>
۶-۱	MFF <sub>2</sub> (پیشانی کوهستان)	Reverse	-	۱ km	۷,۵	۴۷۰ cm/s <sup>۲</sup>	۴۵۵ cm/s <sup>۲</sup>
۶-۲	MFF <sub>3</sub> (پیشانی کوهستان)	Reverse	-	۵ km	۷,۵	۳۸۰ cm/s <sup>۲</sup>	۳۹۷ cm/s <sup>۲</sup>
۶-۳	MFF <sub>4</sub> (پیشانی کوهستان)	Reverse	-	۱۰ km	۷,۵	۲۶۰ cm/s <sup>۲</sup>	۳۰۸ cm/s <sup>۲</sup>

## پی‌نوشت‌ها

1. Barrier
2. Radiolarite
3. Ophiolite
4. Deterministic
5. Stochastic
6. Hybrid

7. Parseval's Identity
8. Brune
9. Extended Fault Simulation
10. Strike
11. Next Generation Attenuation
12. Ground-Motion Predictive Equations

## مراجع

- [1] Probabilistic safety assessment for seismic events, IAEA, TECDOC-724 (1993).
- [2] A Performance-Based approach to define the Site-Specific earthquake ground motion, USNRC, RG 1.208 (2007).
- [3] Standard format and content of safety analysis EPORTS for nuclear power plants, USNRC, RG 1.70 (1978).
- [4] Identification and characterization of seismic sources and determination of safe shutdown earthquake ground motion, USNRC, RG 1.165 (1997).
- [5] Basic geologic and seismic information, USNRC, NUREG-0800, 2.5.1 (2014).
- [6] Evaluation of seismic safety for existing nuclear installations, IAEA Safety Guide, No. NS-G-2.13 (2009).
- [7] Earthquake engineering criteria for nuclear power plants, 10 CFR Part 50, Appendix S (2016).
- [8] Recommendations for probabilistic seismic hazard analysis: Guidance on Uncertainty and Use of Experts, USNRC, NUREG-6372 (1997).
- [9] Site characteristic and site parameters, USNRC, NUREG-0800, 2.0 (2016).
- [10] J.A. Jackson, D.P. McKenzie, Active tectonics of the Alpine-Himalayan belt between Western Turkey and Pakistan, *Geophys. J. R. astr. Soc.* **77** (1984) 185-264.
- [11] Ph. Vernant, F. Nilforoushan, D. Hatzfeld, M.R. Abbassi, C. Vigny, F. Masson, H. Nankali, J. Martinod, A. Ashtiani, R. Bayer, F. Tavakoli, J. Chery, Present day crustal deformation and plate kinematics in the Middle East constrained by GPS measurements in Iran



- and northern Oman, *Geophys. J. Int.* **157** (2004) 381–398.
- [12] F. Masson, M. Anvari, Y. Djamour, A. Walpersdorf, F. Tavakoli, M. Daignieres, H. Nankali, S. Van Gorp, Large scale velocity field and strain tensor in Iran inferred from GPS measurements: new insight for the present-day deformation pattern within NE Iran, *Geophys. J. Int.* **170** (2007) 995–1010.
- [13] A. Hasankhani, H. Zaferani, Prediction of the characteristics of the near-fault field pulses by applying the orientational effect, *J. Earth and Space Physics*, **41:3** (1394) 391-402 (In Persian).
- [14] L. Hutchings, E. Ioannidou, W. Foxall, N. Voulgaris, J. Savy, I. Kalogeras, L. Scognamiglio, G. Stavrakakis, A physically based strong ground-motion prediction methodology; application to PSHA and the 1999 Mw~6.0 Athens earthquake, *Geophys. J. Int.* **168** (2007) 659–680.
- [15] P. Spudich, Brian S.J. Chiou, Directivity in NGA Earthquake Ground Motions: Analysis Using Isochrone Theory, *Earthq. Spectra* **24** (2008) 279-298.
- [16] H. Zaferani, A. Noorzad, K. Bargi, Simulation of recorded movements during the Bam earthquake of 1382, by the Stochastic Finite Fault Method and quantitative study of the role of seismic source in the formation of observed destructions, *J. Eng. Faculty of Tehran Uni.* **41:6** (1386) 753-764 (In Persian).
- [17] H. Zafarani, A. Noorzad, A. Ansari, Generation of near-fault response spectrum for a large dam in Iran, *Hydropower and Dams* **12** (2005) 51-55.
- [18] H. Zafarani, M. Soghrat, Simulation of Ground Motion in the Zagros Region of Iran Using the Specific Barrier Model and the Stochastic Method, *Bulletin of the Seismological Society of America* **102** (2012) 2031–2045.
- [19] H. Ye, G. Chen, Q. Zhou, Study on the intra-plate potential seismic sources, *Proc. Fifth International Conf. Seismic Zonation, France* (1995) 1424-1430.
- [20] N. Mirzaei, M. Gao, Y.T. Chen, Seismic source regionalization for seismic zoning of Iran: major seismotectonic provinces, *J. Earthquake prediction Research* **7** (1998) 465-495.
- [21] D.B. Snyder, M. Barazangi, Deep crustal structure and flexure of the Arabian plate beneath the Zagros collisional mountain belt as inferred from gravity observation, *Tectonics J.* **5** (1986) 361-373.
- [22] M. Alavi, Tectonics of the Zagros orogenic belt of Iran: new data and interpretations, *Tectono-physics J.* **229** (1994) 211-238.
- [23] M. Berberian, Master blind thrust faults hidden under the Zagros folds: active basement tectonics and surface morphotectonics, *Tectonophysics J.* **241** (1995) 193-224.
- [24] M. Alavi, Tectonostratigraphic evolution of the Zagrosides of Iran, *Geology.* **8(3)** (1980) 144-149.
- [25] N. Mirzaei, M. Gao, Y.T. Chen, Seismic source regionalization for seismic zoning of Iran: major seismotectonic provinces, *J. Earthquake prediction Research* **7** (1998) 465-495.
- [26] L. Reiter, Earthquake hazard analysis: issues and insights, Columbia University Press (1990).
- [27] P. Molnar, W.P. Chen, Seismicity and mountain building, Academic Press (1982) 41-57.
- [28] J.A. Jackson, T.J. Fitch, Basement faulting and the focal depth of the large earthquakes in the Zagros mountains (Iran), *Geophys. J. R. Astr. Soc.* **64** (1981) 561-586.
- [29] J. Ni, M. Barazangi, Seismotectonics of the Zagros continental collision zone and a comparison with the Himalayas, *J. Geophys. Res.* **91** (1986) 8205-8218.
- [30] K. Priestley, C. Baker, J. Jackson, Implications of earthquake focal mechanism data for the active tectonics of the south Caspian basin and surrounding regions, *Geophys. J. Inter.* **118** (1994) 111-141.
- [31] F.J. Von Dollen, J.N. Alt, D. Tocher, A. Nowroozi, Seismological and geological investigations near Bandar Abbas, Iran, *Geol. Soc. Am. Abstr.* **9** (1977) 521.



- [32] M. Niazi, H. Shimamura, M. Matsuura, Micro earthquakes and crustal structure off the Makran coast of Iran, *Geophys. Res. Lett.* **7** (1980) 297-300.
- [33] J.A. Jackson, T.J. Fitch, Seismotectonic implications of relocated aftershock sequences in Iran and Turkey, *Geophys. J. R. Astr. Soc.* **57** (1979) 209-229.
- [34] J.W. Dewey, A. Grantz, The Qir earthquake of April 10, 1972 in the Zagros Mountains of southern Iran: seism tectonic aspects and some results of a field reconnaissance, *Bull. Seism. Soc. Am.* **63** (1973) 2071-2090.
- [35] J.A. Jackson, Reactivation of basement faults and crustal shortening in orogenic belts, *Nature J.* **283** (1980) 343-346.
- [36] J.A. Jackson, T.J. Fitch, D.P. McKenzi, Active thrusting and the evolution of the Zagros fold belt, *Geol. Soc. Spec. Pub.* **9** (1981) 371-379.
- [37] M. Berberian, Active faulting and tectonics of Iran, *Geol. Soc. Am. Geodyn.* **3** (1981) 33-69.
- [38] H. Zaferani, A. Noorzad, Earthquake engineering and earthquake simulation, Tehran University Press (1392) (In Persian).
- [39] T. Hanks, R. McGuire, The character of high-frequency strong ground motion, *Bull. Seism. Soc. Am.* **71** (1981) 2071-2095.
- [40] D. Boore, Stochastic simulation of high-frequency ground motions based on seismological models of the radiated spectra, *Bull. Seism. Soc. Am.* **73** (1983) 1865-1894.
- [41] S. Hartzell, Earthquake aftershocks as Green's functions, *Geophys. Res. Lett.* **5** (1978) 1-14.
- [42] K. Irikura, The construction of large earthquake by a superposition of small events, Earthquake Engineering Tenth World Conference. Rotterdam (1992).
- [43] I. Beresnev, G. Atkinson, Stochastic finite-fault modeling of ground motions from the 1994 Northridge, California earthquake, part I: Validation on rock sites, *Bull. Seism. Soc. Am.* **88** (1998) 1392-1401.
- [44] I. Beresnev, G. Atkinson, FINSIM a FORTRAN program for simulating stochastic acceleration time histories from finite faults, *Seism. Res. Lett.* **69** (1998) 27-32.
- [45] D. Motazedian, G. Atkinson, Stochastic finite-fault model based on dynamic corner frequency, *Bull. Seism. Soc. Am.* **95** (2005) 995-1010.
- [46] G.P. Mavroeidis, A.S. Papageorgiou, A Mathematical Representation of Near-Fault Ground Motions, *Bull. Seismol. Soc. Am.* **93:3** (2003) 1099-1131.
- [47] G.M. Atkinson, D.M. Boore, Earthquake Ground-Motion Prediction Equations for Eastern North America, *Bulletin of the Seismological Society of America* **96:6** (2006) 2181-2205.
- [48] H. Zafarani, B. Hassani, Site response and source spectra of S waves in the Zagros region, Iran, *J. Seismol.* **17:2** (2013) 645-666.
- [49] D.L. Wells, K.J. Coppersmith, New empirical relationships among magnitude, rupture length, rupture width, rupture area, and surface displacement, *Bull. Seism. Soc. Am.* **84** (1994) 974-1002.
- [50] A. Frankel, A Constant Stress-Drop Model for Producing Broad Band Synthetic Seismograms: Comparison with the Next Generation Attenuation Relations, *Bull. Seismol. Soc. Am.* **99:2** (2009) 664-680.
- [51] N.J. Gregor, W.J. Silva, I.G. Wong, R.R. Youngs, Ground-Motion Attenuation Relationships for Cascadia Subduction Zone Megathrust Earthquakes Based on a Stochastic Finite-Fault Model, *Bulletin of the Seismological Society of America* **92:5** (2002) 1923-1932.
- [52] S. Akkar, J.J. Bommer, Empirical equations for the prediction of PGA, PGV and spectral accelerations in Europe, the Mediterranean region, and the Middle East, *Seismol. Res. Lett.* **81** (2010) 195-206.

