

ارائه روابط کاهندگی برای رخدادهای حوزه نزدیک و دور گسل با استفاده از دو روش شبیه‌سازی برای ایالت لرزه زمین‌ساخت زاگرس

مهدی مدیری^۲

علی حسنجانی^۱

احمد نقوی^۳

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۶/۰۵/۱۴۰۲

تاریخ دریافت مقاله: ۱۵/۱۱/۱۴۰۱

چکیده

شبیه‌سازی جنبش نیرومند زمین به‌ویژه برای مناطقی که از آن‌ها داده‌ای در دسترس نیست، نقش مهمی در برآورد پارامترهای این جنبش ایفا می‌کند. یکی از روش‌های بررسی زمین‌لرزه‌ها با استفاده از شتاب‌نگاشت‌ها، شبیه‌سازی جنبش نیرومند زمین است. با معرفی دو مدل شبیه‌سازی تعیینی (اجزای محدود- عدد موج گسسته^۱) و گسل محدود که صحت‌سنجی و اعتبارسنجی آن‌ها مورد بررسی قرار گرفته است، برای رخدادهای حوزه نزدیک (فاصله کمتر از ۲۰ کیلومتر تا گسل مسبب) و دور ازگسل، نگاشت‌های شبیه‌سازی شده تولید، و روابط کاهندگی و پارامترهای جنبش نیرومند زمین برای ایالت لرزه زمین‌ساختی زاگرس ارائه شده‌اند. به‌منظور تعیین پارامترهای کلیدی ورودی شبیه‌سازی، مطالعات معتبر صورت‌گرفته زمین‌شناسی و لرزه‌شناسی مربوط به ناحیه لرزه‌خیز زاگرس، مورد استفاده قرار گرفته است. برای تولید بانک اطلاعاتی جامع تعداد زیادی ایستگاه فرضی در زوایای مختلف در اطراف گسل لحاظ شد. با در نظر گرفتن پارامترهای زلزله‌شناسی منطقه، حدود ۲۰۰۰۰ شتاب‌نگاشت مصنوعی تولید شده است. روابط کاهندگی ارائه شده براساس تحلیل نتایج پارامترهای بیشینه شتاب زمین^۲ و دامنه پالس با روابط معتبر جهانی و روابط ارائه شده برای ایالت لرزه زمین‌ساختی زاگرس مورد مقایسه قرار گرفته و همخوانی (درصد تطابق) قابل قبولی با آن‌ها نشان می‌دهد. این روابط می‌توانند چشم‌انداز تازه‌ای در مکانیابی‌ها، بررسی رفتار دینامیکی سازه‌ها و توسعه زیرساخت‌های مختلف در راستای کاهش حداکثری و پیش‌بینی خسارات ناشی از زلزله ارائه دهند.

واژه‌های کلیدی: شبیه‌سازی جنبش نیرومند زمین، حوزه نزدیک و دور گسل، ایالت لرزه زمین‌ساختی، رابطه کاهندگی

۱- کارشناس ارشد ژئوفیزیک-مهندسی زلزله (نویسنده مسئول) 1987haali@gmail.com

۲- استاد دانشگاه صنعتی مالک اشتر mmodiri.geo@gmail.com

۳- کارشناس ارشد هوش مصنوعی Ahmadnaghavi2@gmail.com

4- Finite fault-Discrete wave number

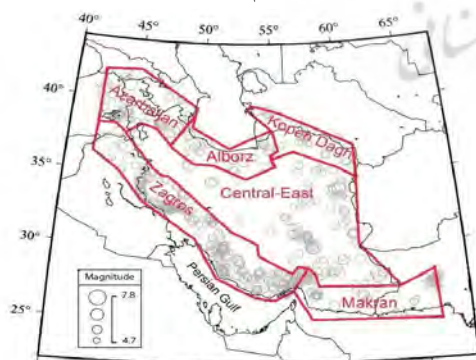
5- PGA(Peak Ground Acceleration)

۱- مقدمه

هدف این تحقیق هم استفاده از نتایج شبیه‌سازی و تجزیه و تحلیل رکوردهای شبیه‌سازی شده، به منظور ارائه روابط آماری کالیبراسیون است. این روابط برای ارزیابی و طراحی سازه‌های حیاتی بسیار پرکاربرد هستند (N.S.H Harith and et al 2020). برای مثال زعفرانی و همکاران (۱۳۸۶) از رابطه تئوری برای شبیه‌سازی پالس پریود بلند زلزله بم در ایستگاه بم استفاده کرده و نتایج مناسبی به دست آورده‌اند. این روش همچنین توسط زعفرانی و همکاران (۲۰۰۵) برای تهیه طیف طرح ویژه ساختگاه برای سد گتوند در استان خوزستان به کار رفته است. 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 Zafarani, H and Soghrot, (2012) M با استفاده از مدل بریر^۲ و شبیه‌سازی احتمالی، روابطی را برای پیش‌بینی جنبش نیرومند زمین در منطقه زاگرس ارائه داده‌اند.

۱-۱- ایالت لرزه زمین‌ساختی زاگرس

ناحیه زاگرس در جنوب غربی ایران از شمال تنگه هرمز در خلیج فارس تا شمال شرق عراق با روند NW-SE ادامه دارد. این کمربند میزبان بیش از نیمی از ذخایر شناخته شده هیدروکربنی جهان است (Sepehr and Cosgrove 2005). اکثر زمین‌لرزه‌های این کمربند کم عمق هستند.



نگاره ۱: تقسیم‌بندی ایالت‌های لرزه زمین‌ساختی ایران و زلزله‌های رخ داده براساس بزرگا (Karimiparidari et al 2013) و تعیین محدوده ایالت زاگرس

به دلیل شرایط خاص زمین‌شناسی و وجود گسل‌های فعال بسیار در ایران، کشور ما جزء مناطق زلزله‌خیز دنیا محسوب می‌شود. همه جای ایران به یک میزان لرزه‌خیز نیست. لرزه‌خیزترین ناحیه ایران (که بیشترین آمار رخداد زلزله‌ها به آن مربوط است) منطقه زاگرس است.

زاگرس از دیدگاه زلزله‌خیزی بسیار فعال و زلزله‌خیزترین منطقه‌ی ایران می‌باشد. بیش از ۵۰٪ زمین‌لرزه‌های ایران که توسط شبکه‌های جهانی به ثبت رسیده‌اند، در گستره‌ی زاگرس روی داده است (Mirzaie, etal 1998). این موضوع اهمیت بررسی و شناخت بیشتر این ایالت لرزه زمین‌ساختی را می‌طلبد. متأسفانه باید گفت که حداکثر پنجاه سال تاریخچه ثبت رکورد در سراسر دنیا، دربرگیرنده همه حالات انتشار موج در محیط، نوع ساختگاه، فرآیند گسیختگی روی گسل و رابطه هندسی بین ساختگاه و گسل، نیست. این مسئله خصوصاً در حوزه نزدیک گسل شدیدتر احساس می‌شود. قبل از وقوع زلزله ۱۹۹۹ چی چی در تایوان و زلزله ۱۹۹۹ ازمیت ترکیه، در سراسر دنیا تنها حدود ۲۰ رکورد ناشی از زلزله‌های با بزرگای بیش از هفت در فاصله کمتر از ۲۰ کیلومتر از گسل وجود داشت (Hutchings & et al, 2007).

زلزله ترکیه ۵ رکورد و زلزله 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 دارد (Hutchings & et al, 2007). این موضوع زلزله‌شناسان و مهندسين زلزله را برآن داشت که با استفاده از روش‌های گوناگون شبیه‌سازی اعم از تجربی و تئوری درصدد تخمین پارامترهای مربوط به جنبش نیرومند زمین در حوزه نزدیک گسل با ضریب اطمینان قابل قبولی برآیند. برای نمونه در توسعه روابط کاهندگی نسل جدید^۱ در کالیفرنیا، برای مطالعه ضریب اثر فرادایواره در زوایای مختلف گسل و هندسه ساختگاه نسبت به آن، از روش‌های شبیه‌سازی کمک گرفته شده است (Paul Spudich and Brian S. J. Chiou 2008).

به طور خلاصه در این روش جنبش‌های نیرومند زمین در هر ریزگسل با استفاده از روش تصادفی چشمه نقطه‌ای محاسبه و سپس در نقطه مورد نظر با یک تأخیر زمانی مناسب، برای به دست آوردن جنبش زمین در کل گسل، جمع می‌شوند (قایمیان و زعفرانی ۲۰۲۲).

کاربرد این روش در پژوهش‌های نوین توسعه داشته است. به عنوان نمونه جنبش نیرومند زمین حاصل از زلزله بم با همین روش شبیه‌سازی و مورد بررسی قرار گرفته است (شکیبا و همکاران ۲۰۱۸).

۲-۱-۲- اساس تقسیم‌بندی روش‌های شبیه‌سازی

در یک تقسیم‌بندی کلی در لرزه‌شناسی مهندسی، روش‌های بررسی و تحلیل پدیده‌ی زلزله و حرکت‌های حاصل از آن به دو دسته‌ی دینامیکی^۱ و سینماتیکی^۲ تقسیم شده است. روش‌های شبیه‌سازی از یک دیدگاه به سه دسته‌ی اصلی روش‌های تعیینی^۳ (فرکانس‌های پایین)، تصادفی^۴ (فرکانس‌های بالا) و ترکیبی^۵ تقسیم می‌شوند (زعفرانی و نورزاد، ۱۳۹۲).

۱-۲-۱- شبیه‌سازی جنبش نیرومند زمین به روش تصادفی

گسل محدود

روش منبع نقطه‌ای نمی‌تواند پارامترهای کلیدی لرزش زمین در یک زمین‌لرزه بزرگ، مانند مدت زمان طولانی و وابستگی دامنه‌ها به آزمون ایستگاه مشاهده (اثر جهت‌پذیری) را در نظر بگیرد. به دلیل این محدودیت‌ها در سال ۱۹۷۸ روش مدل‌سازی براساس گسل محدود از سوی هاتزل ارائه شد و در دهه‌های گذشته مقبولیت زیادی یافت (Hartzell, S. 1978). روش مدل‌سازی براساس گسل محدود جنبه‌های منبع صفحه‌ای را با مدل لرزش زمین براساس منبع نقطه‌ای ترکیب می‌کند و از آنجا که محدودیت‌های ذکر شده به طور طبیعی در روش مدل‌سازی براساس گسل محدود وجود ندارد، این روش هندسه شکست و اثر جهت‌پذیری را در نظر می‌گیرد و نتایج خوبی را به دست می‌دهد. برای شبیه‌سازی با استفاده از گسل محدود، از روش تأخیر زمانی و جمع شتاب نگاشت‌های مربوط به یک شبکه دو بعدی شامل المان‌ها استفاده می‌شود (Irikura, K., 1992).

این روش مراحل اعتبارسنجی و صحت‌سنجی را در پژوهش‌های مختلف طی کرده و نتایج قابل قبولی را ارائه نموده است (Motazedian, D., and G. Atkinson (2005)).

۲-۲-۱- روش تعیینی اجزای محدود- عدد موج گسسته

روش اجزای محدود - عدد موج گسسته یکی از روش‌های تعیینی شبیه‌سازی جنبش نیرومند زمین است که در این تحقیق مورد استفاده قرار گرفته است. از این روش به تازگی Zafarani et al (۲۰۱۲ و ۲۰۱۳) برای شبیه‌سازی حرکات حوزه نزدیک ناشی از فعالیت گسل شمال تهران استفاده نموده‌اند.

پالس‌های سرعت شبیه‌سازی شده با روش اجزای محدود- عدد موج گسسته توسط رکوردهای حوزه نزدیک واقعی در سه مؤلفه نرمال، موازی و عمودی مورد تجزیه و تحلیل و مقایسه قرار گرفته است که تطابق بسیار خوبی با رکوردهای واقعی نشان می‌دهد. در مطالعه حسنخانی و زعفرانی (۱۳۹۳) صحت رکوردهای حاصل از این روش مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته است.

در این پژوهش برای شبیه‌سازی رخدادهای ایالت لرزه زمین‌ساختی زاگرس در حوزه نزدیک از مدل تعیینی اجزای محدود- عدد موج گسسته و برای حوزه دور از روش تصادفی گسل محدود استفاده شده است. با بهره‌گیری از مدل‌های ذکر شده پایگاه داده بزرگی از رکوردهای شبیه‌سازی شده برای ایالت لرزه زمین‌ساختی زاگرس تولید و روابط کاهندگی براساس پارامترهای جنبش نیرومند زمین ارائه شده است، که می‌توانند در مطالعات و مکان‌یابی‌های سازه‌های خصوصاً حساس منطقه کاربرد داشته باشند.

- 1- Dynamic
- 2- Kinematic
- 3- Deterministic
- 4- Stochastic
- 5- Hybrid - Broad Band

جدول (۱): پارامترهای ورودی مدل شبیه‌سازی گسل محدود

Parameter	Value	شماره Reference
بزرگای گشتاوری زلزله	۴,۵-۵-۵,۵-۶-۶,۵-۷-۷,۵	[۱۰]
پارامتر تنش	۳۵ بار	[۳۲]
فاکتور کاپا مربوط به میرایی نزدیک سطح موج	۰/۰۴۳	[۳۲]
اندازه گسل	استفاده از روابط ولز- کوپراسمیت برای هر بزرگا	[۲۵]
شیب گسل	۱۰-۳۰-۵۰-۷۰-۹۰	[۱۰]
عمق بالاترین نقطه گسل (Ztop)	گسل در عمق ۲ کیلومتری زمین فرض شده است.	[۱۲]
ساز و کار گسل	امتداد لغز - معکوس	[۱۸]
سرعت گسیختگی روی گسل	$0/8 \beta$	[۳۲]
سرعت موج برشی	۳۵۰۰ متر بر ثانیه	[۳۲]
چگالی لایه لرزه‌زا	۲/۸ گرم بر سانتی متر مکعب	[۳۲]
معادله میرایی مربوط به مسیر	$Q(f) = 10^3 f^{-1/4} (Q_{min}=50)$	[۳۲]
مشخصات گسترش هندسی امواج	$(R^{-1} (R \leq 40), R^{-1/2} (R > 40))$	[۳۲]
نوع سایت	$V_s 30 = 750$ m/s سنگی	[۳۳]

۲- روش تحقیق

در این مرحله با انتخاب روش‌های شبیه‌سازی مناسب نگاشت‌های مصنوعی تولید و پس از اطمینان از صحت و اعتبار رکوردهای حاصل از روش شبیه‌سازی مورد نظر بارکوردهای واقعی موجود، یک شبکه گسترده داده‌ای، با شرایط متفاوت هندسی و گسیختگی با هدف پوشش کامل شرایط مختلف لرزه‌ای در نظر گرفته شد.

۱-۲- تولید نگاشت‌های مصنوعی با روش گسل محدود

و ارائه روابط کاهندگی

در بخش‌های ورودی داده برای ایجاد پایگاه داده‌ای گسترده، پارامترهای مختلف اعم از شرایط گسل، چیدمان ایستگاه‌ها (دریافت‌کننده‌ها) و پارامترهای سینماتیک مختلف مرتبط با جنبش نیرومند زمین مورد نیاز در حالت‌های متفاوت لحاظ شده است.

در جدول ۱ به معرفی بخش‌های مختلف و پارامترهای مربوطه می‌پردازیم. لازم به ذکر است که واحدهای تمام داده‌های ورودی بر مبنای نظام جهانی یکاها هستند. برای تعیین مختصات گسل جهت مثبت محور X را شمال جغرافیایی، جهت مثبت محور Y را جهت شرق و جهت محور Z را راستای عمق گسل در نظر می‌گیریم. بنابراین زاویه امتداد گسل با شمال جغرافیایی^۲ صفر لحاظ می‌شود.



۲-۱-۱- اثر ساختگاه در فرکانس‌های مختلف

(Site Amplification)

همان‌طور که در قبل توضیح داده شد با توجه به جنس ساختگاه، دامنه امواج در فرکانس‌های مختلف دستخوش تغییرات می‌شود. این اثرات برای منطقه زاگرس در جدول ۲ ارائه شده است.

نگاره ۲: چیدمان ایستگاهی مورد استفاده در این مطالعه در اطراف گسل مسبب فرضی (Gail M. Atkinson and David M. Boore)

1- SI

2- Strike

جدول (۲): مقادیر اثرات سایت در فرکانس‌های مختلف
(H. Zafarani & B. Hassani (2010))

Frequency (Hz)	Amplification Factor
0.4	2.686
0.484	2.151
0.586	2.317
0.709	2.548
0.858	2.854
1.038	3.114
1.256	3.189
1.52	3.447
1.84	4.074
2.227	4.059
2.695	4.301
3.261	5.364
3.946	5.197
4.776	5.160
5.779	6.546
6.994	5.780
8.464	4.824
10.242	4.026
12.395	3.795
15	3.294

۲-۲-۱- مدل سرعت امواج در لایه‌های زمین
اولین قدم در انجام شبیه‌سازی‌ها انتخاب یک مدل لایه‌ای سرعت مناسب می‌باشد. به‌عنوان نمونه Arthur Frankel (۲۰۰۹). با در نظر گرفتن مدل لایه‌ای سرعت ارائه شده توسط بور و جویئر (۱۹۹۷) و جداسازی لایه بالای این مدل به سه لایه زمین‌شناسی مدل لایه‌ای سرعت عمومی را برای منطقه‌ی کالیفرنیا ارائه کرده است.

نکته) با فرض اینکه کانون زلزله‌ها در پایین‌ترین نقطه عمق گسل مربوطه در نظر گرفته شده است، میزان سرعت موج برشی، مقدار میانگین آن می‌تواند برای عمق لایه‌ی لرزه‌زا حدود ۳۶۰۰ متر بر ثانیه فرض شود.

۲-۲-۲- بزرگای رویدادهای فرضی

پس از انتخاب منطقه مورد نظر برای انجام شبیه‌سازی‌ها و مطالعه‌ی زلزله‌های رخ داده در منطقه مقادیر فرضی بزرگا را برای ایجاد یک پایگاه داده جامع انتخاب می‌کنیم، همچنین گسل فرض شده را در عمق فرضی از سطح زمین در نظر می‌گیریم. به‌عنوان مثال ($Z_{top}=1 \text{ Km}$).

۲-۲-۳- هندسه گسل فرضی

برای تعیین مختصات گسل جهت مثبت محور X را شمال جغرافیایی، جهت مثبت محور Y را جهت شرق و جهت محور Z را راستای عمق گسل در نظر می‌گیریم. بنابراین میزان (Strike) گسل صفر تعیین می‌شود.

۲-۲-۲- تولید نگاشت‌های مصنوعی با مدل اجزای محدود

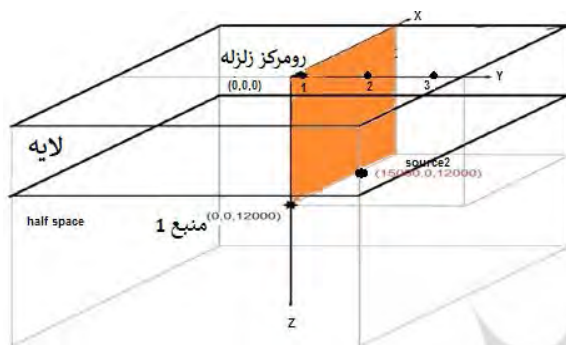
عدد موج گسسته

به‌این منظور لازم است پارامترهای مورد نیاز برای استفاده از این روش محاسبه شوند.

جدول (۳): مدل لایه‌ای سرعت برای منطقه کالیفرنیا استفاده شده در شبیه‌سازی‌ها (فرانکل ۲۰۰۹)

مختصات بالای لایه (m)	سرعت موج P (m/S)	سرعت موج S (m/S)	چگالی (Kg/m3)	ضریب کاهندگی موج P	ضریب کاهندگی موج S
0	1900	1000	2100	50	25
100	2600	1600	2100	50	25
200	3300	1900	2100	200	100
300	4000	2000	2400	200	100
1300	5500	3200	2700	400	200
3800	6300	3600	2800	400	200
18000	6800	3900	2900	400	200
30000	7800	4500	3300	2000	1000
130000	7800	4500	3300	9999	9999

گسل و عمیق‌ترین نقطه (X_{ave} , Y , Z_{max}) فرض شده است. به‌عنوان نمونه برای گسل به طول ۳۰ کیلومتر و عرض ۱۲ کیلومتر و زاویه شیب ۹۰ درجه مختصات کانون اول (۰، ۰، ۱۲۰۰۰) و مختصات کانون دوم (۰، ۱۵۰۰۰، ۰) در نظر گرفته شده است.



نگاره ۳: شمای کلی از نحوه قرار گیری محورها، صفحه گسل و ایستگاه‌ها

۲-۲-۶- زمان خیزش گسیختگی برای تابع زمانی چشمه تا به‌حال مدل‌های مختلفی برای بیان تابع زمانی چشمه به‌هنگام رویداد زلزله ارائه شده‌اند، این مدل‌ها عبارتند از مدل ضربه‌ای، مدل چهارگوش، مدل مثلثی، مدل دوزنقه، مدل گوسی و غیره.

با بهره‌گیری از رابطه Somerville & et al (1999) زمان خیزش برای زلزله‌های به بزرگای مختلف را می‌توان محاسبه نمود.

۲-۲-۷- نحوه توزیع لغزش در صفحه گسل
برای توزیع لغزش در صفحه گسل هنگام وقوع زلزله می‌توان مقدار متوسطی را در نظر گرفت، به‌این معنا که لغزش به‌صورت یکنواخت در تمام صفحه گسل پخش می‌شود. اما همان‌طور که می‌دانیم، در شرایط واقعی هنگام وقوع زلزله میزان لغزش در تمام صفحه گسل یکنواخت نیست. این مقدار بسته به فاصله از کانون گسیختگی، شرایط زمین‌شناسی و غیره متغیر است. ما نیز در این تحقیق برای نزدیک‌تر شدن هر چه بیشتر به شرایط واقعی دو حالت برای توزیع لغزش در نظر گرفته‌ایم.

برای پوشش شرایط هندسی مختلف، میزان شیب گسل (Dip) زوایای متفاوت لحاظ می‌شوند.

با مطالعه منطقه‌ی مورد نظر و سازوکارهای گسل‌های منطقه نوع گسل را در نظر می‌گیریم همچنین برای پوشش کامل‌تر می‌توان نتایج شبیه‌سازی را برای انواع سازوکارهای گسلش محاسبه نمود. با توجه به در نظر گرفتن شرایط متنوع ذکر شده در بالا می‌توان با استفاده از روابط معتبر Wells, D. L., and K. J. Coppersmith (1994) مساحت صفحه گسل را در شرایط مذکور محاسبه نمود.

جدول (۴): نمونه نتایج به‌دست‌آمده از روابط ولز کوپراشمیت (۱۹۹۴) در تعیین مساحت صفحه گسل

عرض گسل (Km)	طول گسل (Km)	سازوکار گسل	بزرگای زلزله
۱۰	۳۰	امتداد لغز	۶،۵
۱۲	۲۴	معکوس	۶،۵
۱۴	۶۰	امتداد لغز	۷
۱۸	۴۵	معکوس	۷
۱۸	۱۲۰	امتداد لغز	۷،۵
۳۰	۸۶	معکوس	۷،۵

۲-۲-۴- میزان سرعت گسیختگی

به‌منظور پوشش کامل شرایط مختلف گسیختگی میزان سرعت گسیختگی روی گسل مقادیر 0.7β ، 0.8β و 0.9β لحاظ شده‌است که بتا (β) میزان متوسط سرعت موج برشی در محیط و عدد مربوط به آن حدود ۳۶۰۰ متر بر ثانیه است.

۲-۲-۵- چیدمان ایستگاهی فرضی در اطراف گسل

در این مدل هم توزیع ایستگاهی اطراف گسل مسبب از پارامترهای ورودی محسوب می‌شود. به‌عنوان نمونه گسل را در عمق یک کیلومتری از سطح زمین در نظر گرفته‌ایم. دو کانون برای شروع گسیختگی در صفحه گسل لحاظ شده‌است. یک کانون در ابتدای صفحه گسل و عمیق‌ترین نقطه (X_{min} , Y , Z_{max}) و کانون دیگر در نقطه میانی طول

۲-۷-۱- توزیع لغزش ثابت

براساس داده‌های مربوط به یک ناحیه با ویژگی‌های لرزه زمین‌ساختی متفاوت ارائه شده‌اند. لذا استفاده از این روابط برای منطقه خاص که داده‌های شتاب‌نگاری آن کم یا بدون داده می‌باشد، باعث خطا در برآورد پارامتر جنبش نیرومند زمین خواهد شد. در مطالعه حاضر با ایجاد پایگاه داده‌ای از حدود ۲۰ هزار نگاشت مصنوعی این دغدغه تا حدود زیادی رفع شده است.

با در نظر گرفتن بزرگای رخداد مورد نظر و مساحت صفحه‌ی گسل و با استفاده از رابطه‌ی مشهور نرخ ممان لرزه‌ای، می‌توان میزان متوسط لغزش را در صفحه گسل مشخص نمود.

۲-۷-۲- توزیع لغزش متغیر

از آن‌جا که از ابتدا هدف این تحقیق، توسعه روابط کاهندگی بود که با تعداد قابل قبولی از داده‌های مورد بررسی کالیبره شده باشند لذا نیاز است علاوه بر تأثیر بزرگ، اثر فاصله ایستگاه‌ها از گسل مسبب (فاصله جویزر-بور) لحاظ شود، بنابراین مقادیر پارامترهای به‌دست آمده در فرکانس‌های مختلف از پالس‌های شبیه‌سازی شده را با استفاده از فرم اصلی رابطه کاهندگی اکار و بومر (Akkar and Bommer 2010) (رابطه ۱) برازش داده و ضرایب مربوطه را برای هر ساز و کار استخراج کرده‌ایم.

برای محاسبه‌ی توزیع لغزش در صفحه گسل از مدل K^2 (عدد موج مجذور)، که توسط (Herrero, A., and Bernard, P., (1994) ارائه و به وسیله (Gallovič, F., and Brokešová, J., (2004) بازبینی و اصلاح شده است، استفاده می‌شود.

۳- ارائه نتایج و روابط آماری کالیبراسیون برای پیش‌بینی جنبش نیرومند زمین (روابط کاهندگی)

۳-۱- رکوردهای شبیه‌سازی جنبش نیرومند زمین برای ایالت لرزه زمین‌ساختی زاگرس
حال با در نظر گرفتن پارامترهای ورودی مختلف، جامعه‌ی آماری قابل اطمینانی از رکوردهای شبیه‌سازی شده در اختیار داریم. لازم به ذکر است که با توجه به گستردگی داده‌ها و پوشش تقریباً جامع بر تمام شرایط، می‌توان روابطی با درصد اطمینان بالا استخراج کرد. در نگاره ۴ نمونه‌ای از رکوردهای شبیه‌سازی شده در پژوهش حاضر نمایش داده می‌شود.

در سال‌های گذشته مطالعه‌ی شبیه‌سازی رکوردهای جنبش نیرومند زمین به‌خصوص در حوزه نزدیک گسل گسترش زیادی یافته و تلاش‌های زیادی برای توسعه روابط کاهندگی نسل جدید یا روابط پیش‌بینی جنبش نیرومند زمین^۱ و دستیابی به بینش دقیقی از جنبش نیرومند زمین در نواحی مختلف زمین در ادبیات فنی انجام شده است. ارائه روابط آماری برای پیش‌بینی این پارامترها در تولید سازه‌های مقاوم در مقابل اثرات تخریبی جنبش نیرومند زمین از اهمیت بالایی میان مهندسين سازه برخوردار است. روابط کاهندگی، که به‌صورت تجربی است، رابطه بین پارامتر جنبش نیرومند زمین (شتاب، سرعت، تغییر مکان، طیف پاسخ و غیره) را با بزرگای فاصله و یا سایر پارامترهای مورد نظر دیگر بیان می‌کند. شکل کلی روابط کاهندگی به‌صورت رابطه (۱) بیان می‌شود:

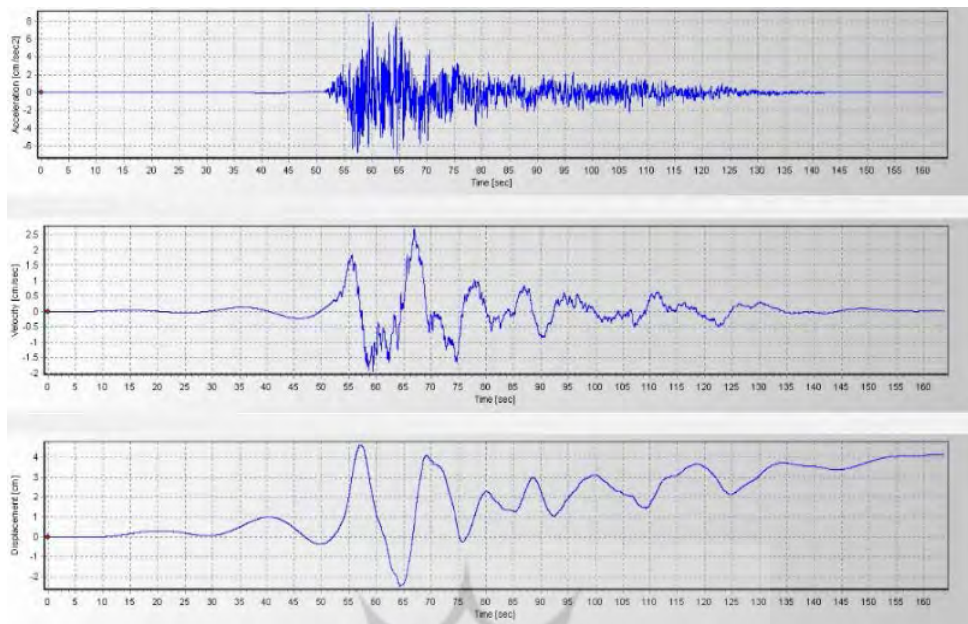
۳-۲- استخراج رابطه براساس PGA و مقایسه نتایج حاصل از شبیه‌سازی به روش گسل محدود با روابط کاهندگی معتبر در ایالت لرزه زمین‌ساختی زاگرس

$$Y = b_1 \cdot F_1(M) \cdot F_2(M) \cdot F_3(M,R) \cdot F_4(Pi) \cdot \epsilon \quad \text{رابطه (۱)}$$

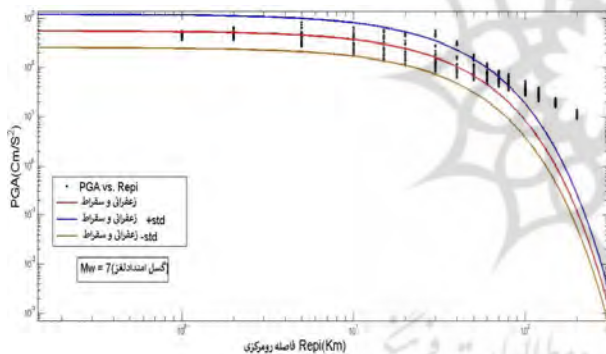
برای صحت‌سنجی نتایج حاصل از لرزه‌نگاشت‌های شبیه‌سازی شده، نتایج حاصل از شبیه‌سازی‌ها را، با دو رابطه کاهندگی اکار و بومر (Akkar & Bommer (AkB10)) (پیشنهادی

(کتاب لرزه‌شناسی مهندسی، زعفرانی و نورزاد، ۱۳۹۲).

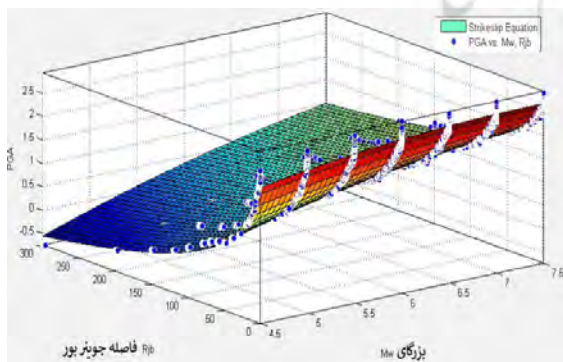
نکته بسیار مهم در استفاده از این روابط این است که روابط



نگاره ۴: نمونه رکورد شبیه‌سازی شده



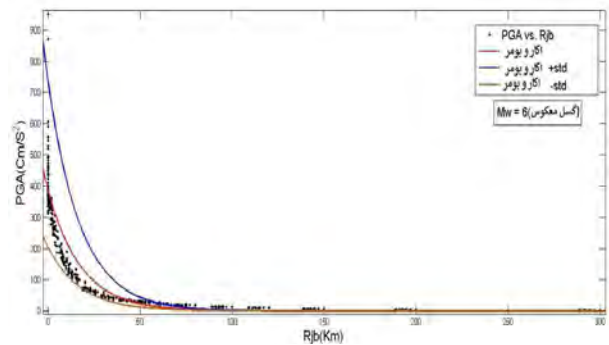
نگاره ۶: مقایسه مقادیر PGA به دست آمده از رکوردهای شبیه‌سازی شده با میانگین مقادیر رابطه کاهندگی زعفرانی و سقراط



نگاره ۷: برازش تغییرات PGA نسبت به بزرگای گشتاوری زلزله و فاصله جویز-بور (سازوکار گسلش امتدادلغز)

برای منطقه خاورمیانه و زعفرانی و سقراط (Zafarani & Saghraei 2012) پیشنهادی برای ایالت زاگرس) که هردو در ادبیات فنی پیش‌بینی جنبش نیرومند زمین در ایران از اعتبار زیادی برخوردارند، مقایسه کرده‌ایم.

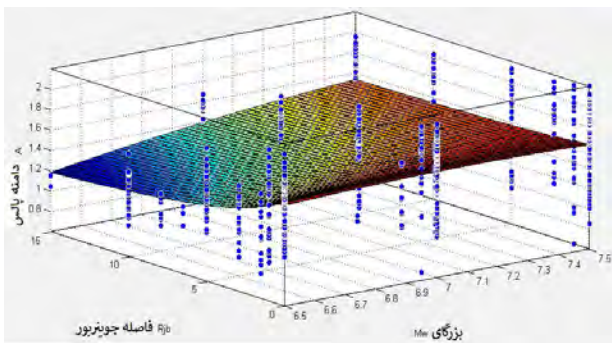
همان‌طور که در نگاره‌های ۵ و ۶ مشاهده می‌شود، همخوانی بسیار خوبی وجود دارد و این امر مبین این مطلب است که رکوردهای شبیه‌سازی شده قابل اطمینان هستند و خطای سیستماتیکی در روند شبیه‌سازی وارد نشده است. همچنین در نگاره ۷ و رابطه ۲ رابطه کاهندگی استخراج شده از رکوردهای شبیه‌سازی شده با فرضیات مدنظر ارائه شده است.



نگاره ۵: مقایسه مقادیر PGA به دست آمده از رکوردهای شبیه‌سازی شده با میانگین مقادیر رابطه کاهندگی اکار و بومر

فصلنامه علمی - پژوهشی اطلاعات جغرافیایی ()

ارائه روابط کاهندگی برای رخداد‌های حوزه نزدیک و دور گسل با استفاده از ... / ۵۱



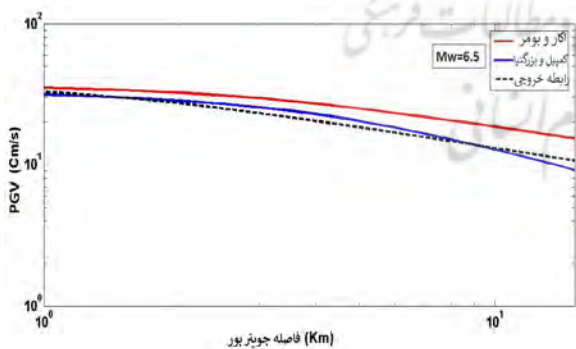
نگاره ۹: تغییرات دامنه نسبت به بزرگای گشتاوری زلزله و فاصله جوینبور (A)

$$\text{Log}(A) = -5.15 + 1.88 M_w - 0.13 (M_w^2) + (-2.1 + 0.29 M_w) \log_{10}((R_{jb}^2 + 1.4^2) / 2)$$

رابطه (۴)

۴- صحت‌سنجی روابط ارائه شده با مقایسه با روابط کاهندگی معتبر در ایالت لرزه زمین‌ساختی زاگرس

برای صحت‌سنجی روابط مربوط به سرعت پالس، نتایج حاصل از دو رابطه‌ی مشابه مربوط به توزیع لغزش ثابت و متغیر را با روابط کاهندگی بور و اتکینسون و کمپیل و بزرگنیا برای زلزله‌ی فرضی با بزرگای گشتاوری ۶/۵ مقایسه خواهیم کرد.



نگاره ۱۰: مقایسه میانگین مقادیر روابط کاهندگی معتبر با نتایج به‌دست آمده از روابط PGV^۱ برای توزیع لغزش ثابت

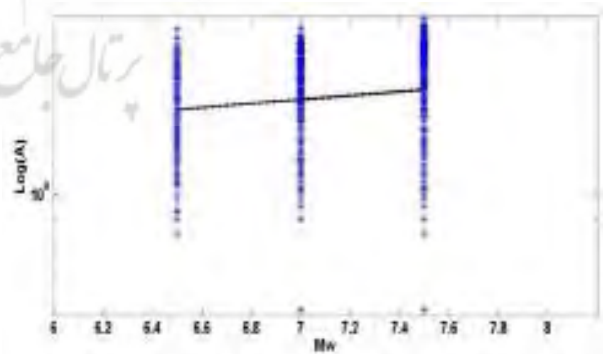
$$\text{Log}(PGA) = 1.437 + 0.7357 M_w - 0.06147 (M_w^2) + (-2.565 + 0.207 M_w) \log_{10}((R_{jb}^2 + 6.652) / 1.2)$$

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

رابطه (۲)

۳-۳ استخراج روابط براساس دامنه پالس برای حوزه نزدیک گسل مسبب فرضی به روش اجزای محدود-عدد موج گسسته

توزیع رکوردهای شبیه‌سازی شده با بهره‌گیری از روابط کاهندگی معتبر جهانی (کمپیل و بزرگنیا، بور و اتکینسون) اعتبارسنجی شده‌اند. برای دستیابی به مدل‌های ریاضی کاربردی با محاسبه مقادیر انحراف معیار برازش‌های آماری صورت گرفته و نتایج ارائه شده است. دامنه پالس (در یک محیط خاص، بیشترین جابه‌جایی ذره از نقطه‌ای که معمولاً حول آن ارتعاش می‌کند، دامنه موج نامیده می‌شود. از روی شکل موج نیز می‌توان گفت که فاصله یک قله یا دره از خط مرکزی - خط سکون ذره - دامنه موج نام دارد.) یکی از اساسی‌ترین پارامترها در تجزیه و تحلیل جنبش نیرومند زمین به‌خصوص در طراحی سازه‌ها است. از این‌رو در تحقیق حاضر مدل‌های پیشنهادی برای این پارامتر محاسبه شده‌اند. در نگاره ۸ برازش رکوردهای شبیه‌سازی شده و رابطه حاصل ارائه شده است.



نگاره ۸: تغییرات دامنه پالس (A) با بزرگای گشتاوری زلزله

$$\text{log}(A) = 0.1357 M_w + 0.578$$

رابطه (۳)

accelerations in Europe, the Mediterranean region, and the Middle East, *Seismol. Res. Lett.* 81, 195–206.

5- Arora, S., Joshi, A., Kumari, P. et al. Strong ground motion simulation techniques—a review in world context. *Arab J Geosci* 13, 673 (2020). <https://doi.org/10.1007/s12517-020-05583-5>

6- Beresnev, I., and G. Atkinson (1998a). Stochastic finite-fault modeling of ground motions from the 1994 Northridge, California earthquake, part I: Validation on rock sites, *Bull. Seism. Soc. Am.* 88, 1392–1401.

7- Boore, D. M., and W. B. Joyner (1997). 'Site amplification for generic rock sites'. *Bull. Seismol. Soc. Am.* 87, 327–341.

8- Cheloni, Daniele, Aybige Akinci. "Source modelling and strong ground motion simulations for the 24 January 2020, Mw6.8 Elazığ earthquake, Turkey" *Geophysical Journal International*, Volume 223, Issue 2, November 2020, Pages 1054–1068, <https://doi.org/10.1093/gji/ggaa350>.

9- Frankel, Arthur (2009). 'A Constant Stress – Drop Model for Producing Broad Band Synthetic Seismograms: Comparison with the Next Generation Attenuation Relations'. *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 99:2A, 664–680.

10- Gail M. Atkinson and David M. Boore. 'Earthquake Ground-Motion Prediction Equations for Eastern North America'. *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 96, No. 6, pp. 2181–2205, December 2006, doi: 10.1785/0120050245.

11- Gallovič, F., and Brokešová, J., (2004). 'On strong ground motion synthesis with k-2 slip distributions'. *J. Seismol.* 8, 211–224.

12- Ghaemian, M, H. Zafarani. " seismic analysis of dam-foundation-reservoir-fault system by hybrid discrete wavenumber-finite element method". Volume 38.2, Issue 1.2 - Serial Number 1 June 2022 Pages 39-50.

13- Hanks, T., and R. McGuire (1981). The character of high-frequency strong ground motion, *Bull. Seism. Soc. Am.* 71, 2071–2095.

14- Hartzell, S. (1978). Earthquake aftershocks as Green's functions, *Geophys. Res. Lett.* 5, 1–14.

15- Herrero, A., and Bernard, P., (1994). 'A kinematic self-similar rupture process for earthquakes'. *Bull.*

۵- بحث و نتیجه گیری

همان‌طور که پیش‌تر هم اشاره کردیم تاکنون محدودیت تعداد رکوردهای واقعی مانع از ارائه روابط آماری کالیبراسیون و دقیق برای تخمین پارامترهای مؤثر جنبش نیرومند زمین در تعداد زیادی از مناطق شده است. اما در این پژوهش با در اختیار داشتن طیف وسیعی از رکوردهای شبیه‌سازی شده (حدود ۲۰ هزار رکورد) می‌توان امیدوار بود که روابط به‌دست آمده از دقت و کارایی کافی برخوردار باشند و در طراحی سازه‌ها و توسعه شهری از آن‌ها بهره جست. ذکر این نکته ضروری است که در تمامی برازش‌های صورت گرفته ضریب همبستگی رگرسیون^۱ بالای ۰/۹۵ بوده است. باید توجه داشت به دلیل آنکه عدم قطعیت در همه پارامترهای چشمه و ساختگاه و مسیر لحاظ نشده است، عدم قطعیت کلی رابطه کاهندگی، پایین‌تر از روابط مشابه است. برای این منظور توصیه می‌شود که در کاربردهای عملی از انحراف معیار روابط مشابه، استفاده شود.

منابع و مآخذ

۱- حسنجانی، زعفرانی؛ علی، حمید (۱۳۹۳). "پیش‌بینی خصوصیات پالس‌های جهت‌پذیری حوزه نزدیک با شبیه‌سازی پدیده زلزله". هشتمین کنگره ملی مهندسی عمران، بابل ۱۳۹۳.

۲- زعفرانی، نورزاد، برگی؛ حمید، اسدا... خسرو (۱۳۸۶). "شبیه‌سازی حرکات ثبت شده در زلزله دی‌ماه ۱۳۸۲ بم، به روش تصادفی گسل با ابعاد محدود و بررسی کمی نقش چشمه لرزه‌زا در شکل‌گیری توزیع خرابی مشاهده شده". نشریه دانشکده فنی، جلد ۱، شماره ۶، دی‌ماه ۱۳۸۶، از صفحه ۷۵۳ تا صفحه ۷۶۴.

۳- زعفرانی، نورزاد؛ حمید، اسدا... (۱۳۹۲). لرزه‌شناسی مهندسی. تهران: انتشارات دانشگاه تهران.

4- Akkar, S, and Bommer, J. J. (2010). 'Empirical equations for the prediction of PGA, PGV and spectral

- 25- Sepehr, M., and Cosgrove, J. W., 2005. Role of the Kazerun Fault Zone in the formation and deformation of the Zagros Fold-Thrust Belt, Iran.
- 26- Shakiba. Somayeh, Habib Rahimi, Mehrdad Pakzad (2018) "Simulation of Strong Ground Motion of Bam Earthquake Using Stochastic Finite Fault Method" Proceedings of the 18th Iranian Geophysical Conference, May 2018, pages 642-645.
- 27- Somerville, P., Irikura, K., Graves, R., Sawada, S., Wald, D., Abrahamson, N., Iwasaki, Y., Kagawa, T., Smith, N., and Kowada, A., (1999). 'Characterizing earthquake slip models for the prediction of strong ground motion'. Seism. Res. Lett. 70, 59-80.
- 28- Spudich. Paul and Brian S. J. Chiou (2008). 'Directivity in NGA Earthquake Ground Motions: Analysis Using Isochrone Theory'. Earthquake Spectra: February 2008, Vol. 24, No. 1, pp. 279-298.
- 29- Stephen H. Hartzell and Thomas H. Heaton (1983). 'inversion of strong ground motion and teleseismic waveform data for the fault rupture history of the 1979 imperial valley, california, earthquake'. Bulletin of the Seismological Society of America, Vol 73, No 6, pp 1553-1583, December 1983.
- 30- Wells, D. L., and K. J. Coppersmith (1994). 'New empirical relationships among magnitude, rupture length, rupture width, rupture area, and surface displacement'. Bull. Seism. Soc. Am. 84, 974-1002.
- 31- Zafarani .H, A. Noorzad and A. Ansari,(2005). 'Generation of near-fault response spectrum for a large dam in Iran'. Hydropower and Dams, 12, Issue 4. 51-55.
- 32- Zafarani.H & B. Hassani (2010), 'Site response and source spectra of S waves in the Zagros region, Iran'. Journal of Seismology ISSN 1383-4649 Volume 17 Number 2 J Seismol (2013) 17:645-666 DOI 10.1007/s10950-012-9344-1.
- 33- Zafarani .H and M. Soghlat, (2012). '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, Vol. 102, No. 5, pp. 2031-2045, October 2012, doi: 10.1785/0120110315
- 34- Zafarani .H, n, H. Vahidifard, A. Ansari (2012). Seismol. Soc. Am. 84, 1216-1228.
- 16- Hutchings, L., Ioannidou, E., Foxall, W., Voulgaris, N., Savy, J., Kalogeras, I., Scognamiglio, L., and Stavrakakis, G., (2007). 'A physically based strong ground-motion prediction methodology; application to PSHA and the 1999 Mw~6.0 Athens earthquake', Geophys. J. Int. 168,659-680.
- 17- Irikura, K., 1992, The construction of large earthquake by a superposition of small events, Earthquake Engineering. Tenth world Conference. Balkema. Rotterdam.
- 18- Jackson, J. A., Fitch, T. J. and McKenzie, D. P., 1981, Active thrusting and the evolution of the Zagros fold belt, in: McClay, K. R. and Price, N. J. (eds.), Thrust and Nappe Tectonics, Geol. Soc. Spec. Pub., 9, 371-379.
- 19- Karimiparidari, S., Zare, M., Memarian, H., Kijko, A., 2013. Iranian earthquakes, a uniform catalog with moment magnitudes. Journal of seismology, 17: 897-911. DOI: 10.1007/s10950-0139360-9
- 20- Mirzaei, N., Gao, M., Chen, Y. T., 1998, Seismic source regionalization for seismic zoning of Iran: major seismotectonic provinces. J. Earthquake prediction Research, 7, 465-495.
- 21- Molnar, P. and Chen, W. P., 1982, Seismicity and mountain building, in: mountain building Processes, Hsued, K. J. (ed.), Academic Press, 41-57.
- 22- Motazedian, D., and G. Atkinson (2005). Stochastic finite-fault model based on dynamic corner frequency, Bull. Seism. Soc. Am. 95, 995-1010.
- 23- Nicholas J. Gregor, Walter J. Silva, Ivan G. Wong, and Robert R. Youngs (2002). 'Ground-Motion Attenuation Relationships for Cascadia Subduction Zone Megathrust Earthquakes Based on a Stochastic Finite-Fault Model'. Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 92, No. 5, pp. 1923-1932, June 2002.
- 24- N S H Harith, P J Ramadhansyah, M I Adiyanto and N I Ramli(2020), "Ground Motion Observation of Sabah Earthquakes on the Use of Next Generation Attenuation (NGA) Ground-Motion Models" IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, Volume 682, 4th National Conference on Wind & Earthquake Engineering 16 - 17 October 2020, Putrajaya, Malaysia.

'Sensitivity of ground-motion scenarios to earthquake source parameters in the Tehran metropolitan area, Iran'. Soil Dynamics and Earthquake Engineering 43, 342-354. 35- Zafarani. Hamid, Hesam Vahidifard, and Anooshirvan Ansari (2013). ' Prediction of Broadband Ground-Motion Time Histories: The Case of Tehran, Iran'. Earthquake Spectra 29 (2), 633-660.



COPYRIGHTS

©2023 by the authors. Published by National Geographical Organization. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons [Attribution-NoDerivs 3.0 Unported \(CC BY-ND 3.0\)](https://creativecommons.org/licenses/by-nd/3.0/)

