

پهنه بندی احتمالاتی شدت مرکالی با استفاده از نرم افزار Ez-Frisk مطالعه موردی گستره ماکو، شمال غرب ایران

محمدصادق مام سیده اوچ تپه؛ دانشکده ژئوفیزیک، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران شمال، تهران، ایران

بهرام عکاشه؛ دانشکده علوم زمین، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران شمال، تهران، ایران

محسن پورکرمانی*؛ دانشکده علوم زمین، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران شمال، تهران، ایران

محمد رضا قیطانچی؛ موسسه ژئوفیزیک، دانشگاه تهران، تهران، ایران

آرزو درستیان؛ دانشکده ژئوفیزیک، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران شمال، تهران، ایران

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۹/۱۴

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۱/۱۷

چکیده

هدف از این مطالعه ارائه نقشه شدت اصلاح شده مرکالی به روش احتمالی بر اساس مطالعات لرزه زمین ساخت در چهار گوش ماکو است. منطقه مورد مطالعه در گوشه شمال غربی ایران واقع شده است. وقوع چندین زلزله مخرب و وجود گسل‌های فعال نشان دهنده سطح بالای لرزه خیزی در این منطقه است. براساس بررسی های لرزه زمین ساختی و مقادیر پارامتر b ، همه چشمه های لرزه زای فعال، شناسایی و پارامترهای لرزه ای برای آن ها محاسبه شد. سپس نقشه شدت اصلاح شده مرکالی با استفاده از چهار رابطه کاهندگی محاسبه گردید. نتایج نشان داد که حداکثر شدت به شکل نواری با روند شمال غرب-جنوب شرق است که سازگاری خوبی با گسل های ایگدیر و بلیکگلو نشان می دهد. نتایج حاضر با نقشه شدت زمین لرزه هایی که در منطقه رخ داده، مطابقت خوبی دارد.

کلیدواژه ها: شدت اصلاح شده مرکالی، گسل فعال، ماکو، چشمه لرزه زا، رابطه کاهندگی.

مقدمه

مقیاس اصلاح شده مرکالی (MMI¹) راهی برای نشان دادن تاثیر زمین لرزه بر سطح زمین است. یکی از اولین تلاشها برای توسعه مقیاس شدت اصلاح شده مرکالی در سال ۱۹۰۲ توسط وود و نویمان (۱۹۳۰) ارائه شد. سپس، با استناد به معیارهای قابل اطمینان تر، که به عنوان شاخص های شدت لرزش زمین عمل می کردند، استور و کافمن (۱۹۹۳) مقیاس بندی MMI را مورد بازبینی قرار دادند. تهیه نقشه پراکندگی MMI بر اساس اتصال نقاط با شدت یکسان به یکدیگر و ترسیم خطوط شدت صورت می گیرد. با این حال، چنین

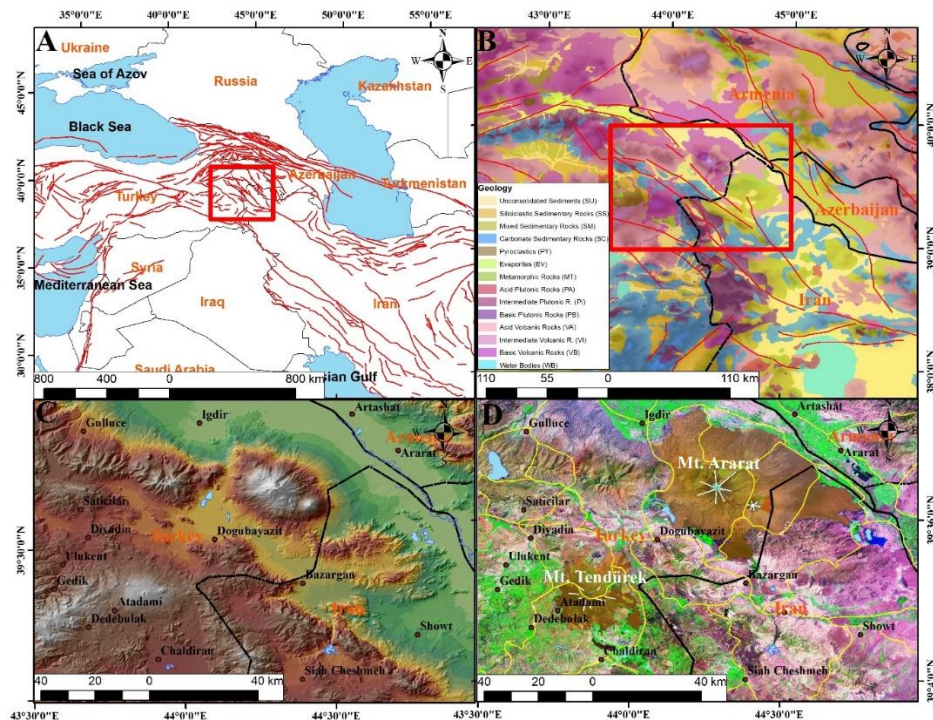
mohsen.pourkermani@gmail.com

*رایانامه نویسنده مسئول:

نقشه هایی فقط در هنگام مقابله با زلزله هایی که قبلاً رخ داده اند مفید هستند و هیچ بینشی از تأثیرات و شدت احتمالی زلزله های آینده ندارند.

بنابراین، آگاهی از شدت و خطر احتمالی زلزله های آتی می تواند چشم انداز ارزشمندی به مهندسی ایمنی سازه ها بدهد. برای این منظور، مطالعه حاضر، برای اولین بار، سعی در توسعه نقشه های MMI از طریق روش احتمالی دارد. در دهه های اخیر، ساخت ساختمان های بلندمرتبه پیشرفت چشمگیری داشته است (Berberian, 2014). آگاهی از وضعیت لرزه ای و خطرات آن، بخش مهمی از مطالعات در این زمینه است. شدت لرزه ای تأثیر قابل توجهی بر طراحی سازه ها دارد و همچنین در مطالعات ارزیابی روانگرایی و پایداری شیب به خوبی مورد توجه قرار گرفته است.

مطالعه حاضر به بررسی چهار گوش ماکو می پردازد که در گوشه شمال غربی ایران واقع شده است (شکل ۱) و همچنین تا مناطقی از ترکیه، ارمنستان و آذربایجان امتداد دارد. وجود کوه آرارات و کوه تندورک که هر دو آتشفشانی هستند، و وقوع لرزه های بزرگ (Jarahi, 2017) ناشی از گسل های فعال (Baftipour et al., 2022; Berberian, 2014; Faridi et al., 2017; Faridi et al., 2019; Jarahi, 2021; Jarahi et al., 2022a, b; Jarahi et al., 2022c; Javadi Dokahe et al., 2021; Najafian et al., 2022) نشان دهنده سطح بالای لرزه خیزی در این منطقه است. علاوه بر این، وضعیت به هم ریخته چینه شناسی (Alizadeh et al., 2019; Moayyed et al., 2020) و همراهی واحدهای رسوبی با واحدهای آتشفشانی، نشان دهنده تأثیر فعالیت زمین ساختی بر منطقه است (شکل ۱). در نهایت، نرخ لغزش بالای پوسته (Karakhanian et al., 2002; Karakhanian et al., 2004; Karakhanian et al., 2013) در این منطقه دلیل دیگری بر لرزه خیزی و اهمیت آن است.



شکل ۱: گستره مورد مطالعه A: در نقشه گسل های خاور میانه (Danciu et al., 2018)، B: در نقشه زمین شناسی (Hartmann and Moosdorf, 2012)، C: در نقشه مورفولوژی (Jarvis et al., 2008)، و D: تصویر ماهواره ای لندست ۷.

منطقه مورد مطالعه شامل بلوک ساختاری ارس (شمال شرقی ایران) است (Berberian and Yeats, 1999) که در ناحیه بین صفحات ایران، عربستان و قفقاز واقع شده و تحت تأثیر حرکات ناشی از فعل و انفعالات بین این سه منطقه قرار گرفته است. قسمت شمال غربی ایران، به عنوان یکی از اجزای منطقه ساختاری قفقاز، در جنوب شرقی صفحه ترکی-ایرانی واقع شده است. صفحه ترکی-ایرانی بخشی از همگرایی صفحات عربی-اوراسیایی است. این صفحه در آغاز همگرایی قاره ای-قاره ای (۱۰.۷-۱۳ میلیون سال پیش) و بسته شدن اقیانوس پاراتیسیس (بین دریای سیاه و دریای خزر) شکل گرفت (Van Couvering and Miller, 1971). ارتفاع این صفحه از نظر مورفولوژیکی به طور متوسط ۲ کیلومتر است. ساختار سرزمینی قفقاز شامل دو منطقه همگرایی شمال به جنوب است، یکی بین صفحات عربستان و اوراسیا در شرق (میزان همگرایی ۳۰ میلی متر در سال) و دیگری بین صفحات آفریقا و اروپا در غرب (با نرخ همگرایی ۱۰ میلی متر در سال) (Cisternas and Philip, 1997). تفاوت سرعت بین این دو صفحه با حرکت لغزشی امتداد لغز چپگرد (روند NE-SW در شکل a1) در مرز بین صفحات عربی (شرق) و آفریقا (غرب) نشان داده شده است. با باز شدن دریای سرخ در تورونین (میوسن بالایی، حدود ۱۰ میلیون سال پیش) و حرکت صفحه عربستان به سمت شمال، بلوک آناتولی (ترکیه مرکزی) به سمت غرب حرکت کرد و بلوک ایران به سمت شرق حرکت کرد. در همان زمان، بخش مرکزی قفقاز با کوتاه شدن و تغییر شکل (چین خوردگی و گسلس معکوس) روبرو شد (Cisternas and Philip, 1997). مکانیسم کانونی زلزله های این منطقه از گسل های امتداد لغز با روند NW پیروی می کنند (Jackson, 1992). علاوه بر این، سه روند ساختاری غالب (NW-SE، NE-SW و W-E) را می توان مشاهده کرد که توسط گسل های ترنسفرم شمال به جنوب محدود شده است. گسل هایی NE-SW عمده‌تاً امتداد لغز چپگرد هستند (مانند گسل شرق آناتولی). گسل های NW-SE عمده‌تاً معکوس هستند (مانند گسل شمال تبریز) و روندهای ساختاری شرقی غربی عمده‌تاً شامل گسل معکوس، رانده و چین خوردگی است (Solaymani Azad, 2009). بخشی از همگرایی بین صفحات عربستان و اوراسیا در شمال غرب ایران در امتداد سیستم گسل معکوس با روند NW-SE جریان دارد. بخش دیگری از این همگرایی توسط گسل های معکوس در قسمت های شمالی جذب می شود (Jackson, 1992; Westaway, 1990). با توجه به این که این ناحیه توسط گسل های برشی احاطه شده است، به نظر می رسد که منطقه مورد مطالعه علاوه بر حرکت های امتداد لغز، درگیر حرکات چرخشی خلاف جهت عقربه های ساعت نیز باشد (Copley and Jackson, 2006).

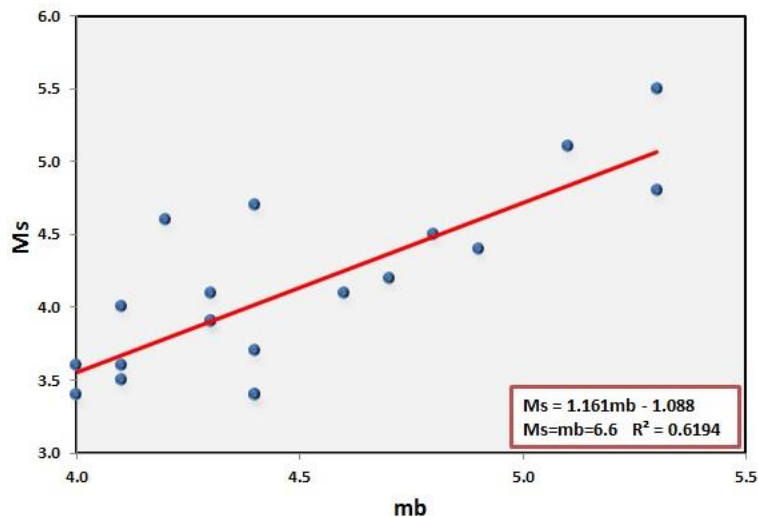
روش مطالعات

به طور کلی، برای انجام PMMI، کاتالوگ زمین لرزه ها، پارامترهای لرزه خیزی، چشمه های لرزه زا و مدل های کاهندگی مورد نیاز است. فهرست زمین لرزه های منطقه از وب سایت مرکز بین المللی زلزله شناسی^۲ گرفته شده است. همه زمین لرزه های تاریخی (Ambraseys and Jackson, 2009; Ambraseys, 2009; Ambraseys and Melville, 1982; Ambraseys, 1998) و زلزله های دستگاهی ($M < 7.4 > 2$) در منطقه مورد مطالعه با یک بافر ۲۰ کیلومتری از سال ۸۰۰ تا ۲۰۲۰ مورد استفاده قرار گرفته اند. در میان این رویدادهای تاریخی، زمین لرزه های ۱۶۹۶ و ۱۸۴۰ به ترتیب با بزرگی ۷ و ۷.۴ بزرگترین زلزله های منطقه بودند. این

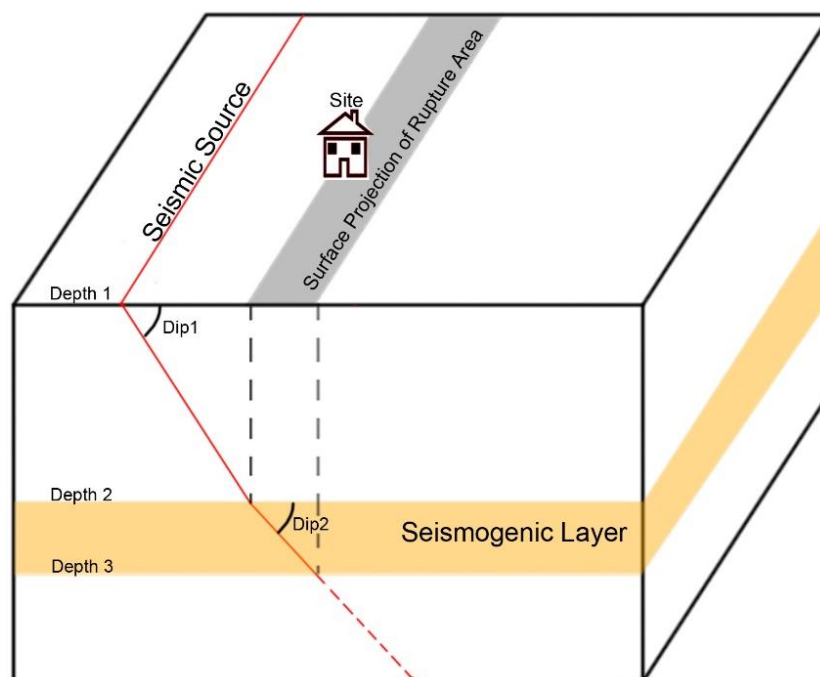
رویدادها با فعالیت گسل های چالدران و ماکو همراه بوده اند. برای زلزله ۱۸۴۰، سه رویداد نسبتاً کوچک توسط بربریان گزارش شده (Berberian, 1976a, 1995)، که پس لرزه های زلزله اصلی بودند. بزرگترین زمین لرزه دستگاهی در سال ۱۹۷۶ با بزرگای ۷.۲ رخ داد و مربوط به فعال شدن مجدد گسل چالدران بود (جدول ۱). براساس جانمایی فهرست زلزله ها، به نظر می رسد گسل های گارنی، گیلاتو-سیاه چشمه خوی (GSK)، ایگدیر و چالدران را می توان به عنوان عناصر اصلی لرزه ای این منطقه در نظر گرفت. ابتدا، ستون بزرگا در فهرست زمین لرزه ها، با تجزیه و تحلیل آماری زلزله ها تکمیل شد. با انجام این کار، معادله ای با استفاده از رویدادهایی که هر دو بزرگای Ms و mb برای آنها ثبت شده بود، شکل گرفت. شکل ۲ معادله تبدیل Ms به mb و بالعکس در فهرست زلزله را نشان می دهد (شکل ۲). سپس، فهرست رویدادها برای محاسبات رابطه گوتنبرگ-ریشتر (Gutenberg and Richter, 1956) برای دسترسی به مقدار b پالایش گردید. در سراسر منطقه مورد مطالعه، توزیع زمین لرزه ها یکنواخت نبود. بنابراین، رویدادهای کافی برای محاسبه مقدار b برای هر منبع لرزه ای وجود نداشت. نرم افزار Zmap (Wiemer, 2001) با استفاده از روش گوتنبرگ ریشتر نقشه پراکندگی مقدار b را برآورد کرد. در این مطالعه از نرم افزار Ez-FRISK^۳ برای محاسبه مقادیر PMMI استفاده شد. برای این منظور، پایگاه داده چشمه های لرزه زا، با در نظر گرفتن همه پارامترهای لرزه خیزی، نیاز به تعریف دارد. بنابراین، از مدل هندسه سه بعدی چشمه لرزه زا استفاده شد (شکل ۳). در این مدل، ویژگی هندسی هر چشمه با مسیر یابی سطحی و سطح مقطع عمودی آن تعریف می شود. اثر سطحی گسل از به هم پیوستن خط متصل بین نقاط قطعات گسل نشان داده شد. مقاطع عمودی با دو زاویه شیب و سه عمق جداگانه، مشخص شد. این اعماق حداقل عمق انرژی آزاد شده (بالای لایه لرزه زا)، عمق تغییر زاویه شیب و عمق انتهای لایه لرزه زا را مشخص می کند. به دلیل عدم توزیع یکنواخت زلزله، تعیین لایه لرزه زا برای این منطقه امکان پذیر نبود، بنابراین روش (Şeşetyan et al., 2018) برای این منظور انتخاب شد. شکل ۳ هندسه چشمه لرزه زا را نشان می دهد. کانون های زلزله در برآمدگی سطحی ناحیه گسیختگی قرار دارند. این منطقه پر خطر در اطراف چشمه لرزه زا است. برای تعیین شیب هر یک از چشمه های لرزه زا، از مطالعات موجود استفاده گردید (Basili et al., 2013; Giardini et al., 2013). در نهایت، PMMI با استفاده از چهار معادله کاهندگی محاسبه شد. برای این منظور، EZ-FRISK از روش تقویتی کلاسیک آوردن و توماس (۱۹۸۵) استفاده می کند.

جدول ۱: فهرست زمین لرزه های مهیب رخ داده در گستره مورد مطالعه

Ref.	Associated Fault	Magnitude		MMI	Epicenter		Date		
		Mw	Ms		Ber.	Longitude	Latitude	Day	Month
Amb.	Nakhchivan		5.2		44.573	39.883	13	2	863
Amb.	Nakhchivan		6	VIII	44.72	39.773	24	12	893
Ber	Garni		6.1	VIII	45.121	39.679		4	906
Ber	GSK	5.3	5.3	VII	44.4	39.08	-	-	1319
Amb.	Caldıran		7	IIX	43.9	39.1	14	4	1696
Amb.	Maku (Iğdir)		6	VIII	43.7	39.7			1834
Ber	Maku (Iğdir)	7.3	7.4	IX	43.9	39.5	2	7	1840
Ber	Maku (Iğdir)		4.7	VI	43.9	39.5	6	7	1840
Ber	Maku (Iğdir)		5	VI+	43.9	39.5	26	7	1840
Ber	Maku (Iğdir)		4.8	VI	43.9	39.5	27	7	1840
Ber	GSK		5.5		44.23	39.24	29	4	1968
Ber	Caldıran	7	7.2	IX	44.03	39.083	24	11	1976
Ber	Caldıran		5.4		44.03	39.083	26	5	1977
Ber	Caldıran		4.7		44.122	39.107	20	4	1988



شکل ۲: رابطه آماری بین بزرگای Ms و mb در گستره مورد مطالعه. این دو بزرگا در مقدار ۶.۶ با هم برابرند.

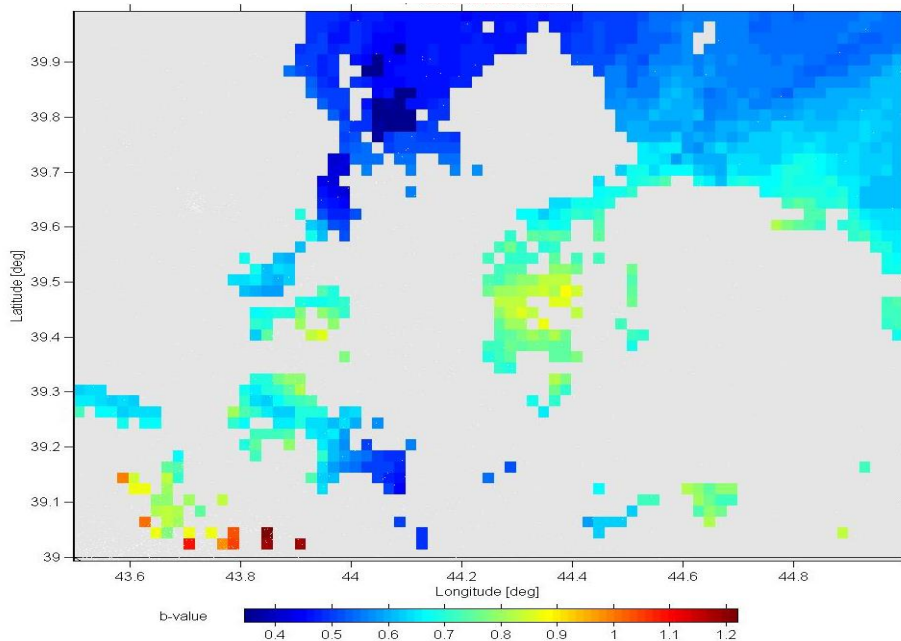


شکل ۳: بلوک دیاگرام شماتیک از مدل سه بعدی چشمه های لرزه زای مطالعه حاضر. به روشنی می توان دریافت که در مواردی، جهت شیب حتی از فاصله سطحی تا چشمه لرزه زا نیز بر اهمیت تر است.

بحث و نتایج

مدل بازخداد زمین لرزه

برای توزیع بزرگا، از روش استاندارد گوتنبرگ-ریشتر در محاسبه مقدار b استفاده شد و نتیجه به عنوان ورودی Ez-Frisk برای انجام تحلیل احتمالی شدت مرکالی در نظر گرفته شد. برای مدل بزرگی بیشینه، بیشترین نرخ وقوع زلزله های بزرگ در نظر گرفته شد. از آنجا که به دلیل توزیع کم زلزله ها، محاسبه نرخ فعالیت (λ) برای این منطقه امکان پذیر نبود، از نرخ لغزش سالانه برای محاسبات استفاده گردید. قبل از شروع تحلیل ها، پیش لرزه ها و پس لرزه ها با استفاده از روش گاردنر و نوپوف (Gardener and Knopoff, 1974) در نرم افزار Zmap از فهرست زلزله های اصلی حذف شدند. با استفاده از نقشه ضریب لرزه خیزی b (شکل ۴) و ارتباط آن با موقعیت چشمه های لرزه زا، مقدار b برای هر چشمه در نظر گرفته شد (جدول ۲). مقادیر پایین b نشان دهنده مناطق دارای تنش زیاد است (Kanamori, 1981; Kanamori, 2013). به عبارت دیگر، چنین مناطقی می توانند محل وقوع زلزله های مخرب آینده باشند (Jarahi, 2017). با توجه به شکل ۴، در قسمت شمال شرقی نقشه یک ناحیه با مقدار b کم وجود دارد. بنابراین، به احتمال زیاد در حین حرکت گسل ایگدیر، زلزله ای در آینده رخ می دهد. با این حال، باید توجه داشت که این نتیجه گیری فقط براساس فهرست زلزله ها است. این فرضیه را می توان با در نظر گرفتن ماهیت زلزله های تاریخی و ماقبل تاریخ تقویت کرد.

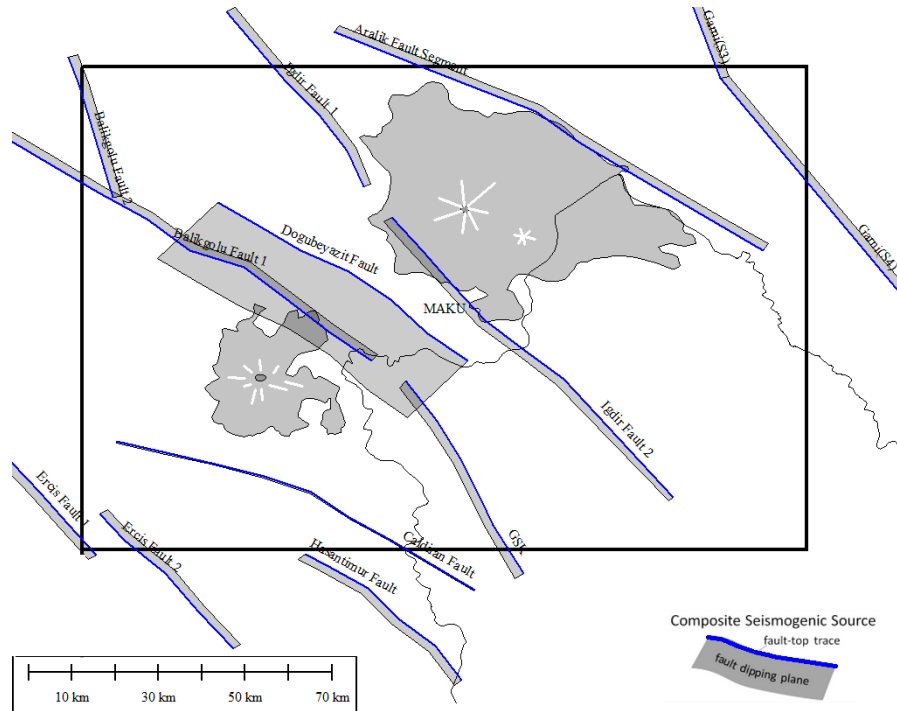


شکل ۴: پراکندگی مقدار b در گستره مورد مطالعه. نقشه ارتفاعی به عنوان پس زمینه انتخاب شده است. منطقه اطراف شهر ایگدیر می تواند به عنوان موقعیت جغرافیایی زمین لرزه محتمل آتی لحاظ شود.

چشمه های لرزه زا

چشمه های لرزه زای منطقه با کمک پژوهش ها و اسناد موجود و همچنین تصاویر ماهواره ای شناسایی شد. در ترسیم گسل ها و به نقشه در آوردن آن ها، سعی شد همه مطالعات قبلی مقایسه و مرور شوند (Ambraseys, 2009; Ambraseys and Jackson, 1998; Basili et al., 2013; Berberian, 1976b; Berberian and King, 1981; Danciu et al., 2018; Giardini et al., 2013; Gülkan et al., 1978; Jarahi, 2017; Nazari et al., 2013; Tchalenko et al., 1974). این مطالعات به شناسایی ۱۳ گسل فعال (چشمه لرزه ای) منجر شد (شکل ۵). برخی از چشمه های لرزه زا به خارج از منطقه مورد مطالعه توسعه یافته اند بنابراین در طول اجرای نرم افزار Ez-Frisk کل طول برای تحلیل انتخاب شد.

در بخش های قبلی، متغیرهای لرزه ای هر چشمه لرزه زا محاسبه شد (جدول ۲). مقدار بزرگای بیشینه (M_{max}) هر چشمه بر اساس میانگین چهار رابطه تجربی با وزن مساوی محاسبه شد (Ambraseys and Jackson, 1998; Nowroozi, 1985; Wells and Coppersmith, 1994; Zare, 1995). هر جا که مقدار حداکثر بزرگی محاسبه شده (M_{max}) کوچکتر از بزرگی زلزله رخ داده توسط گسل باشد، رویداد واقعی به عنوان عدد انتخابی، در نظر گرفته شده است. میزان لغزش هر چشمه براساس مطالعات GPS انتخاب شده است (Copley and Jackson, 2006; Emre et al., 2018; Karakhanian et al., 2013).



شکل ۵: زمین ساخت گستره مورد مطالعه. موقعیت صفحه گسل در عم تا رسیدن به لایه لوزه زا با نوار خاکستری نشان داده شده اند. گسل های فعال با خطوط آبی رنگ و با امتداد شمال غرب-جنوب شرق دیده می شوند.

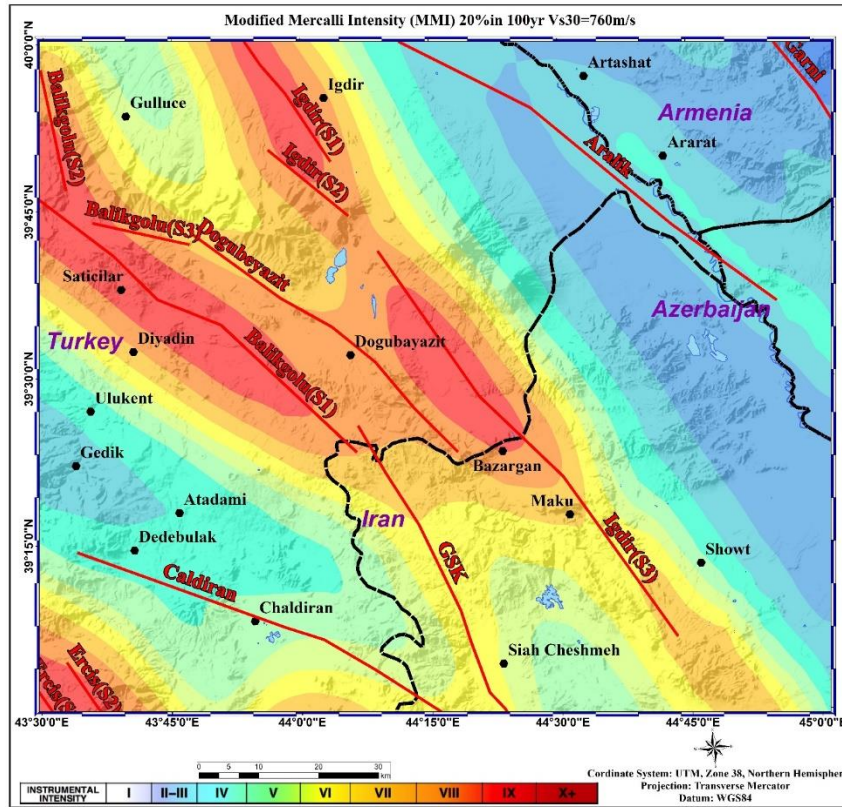
جدول ۲: پارامترهای لوزه خیزی چشمه های لوزه زای گستره مورد مطالعه

No.	Source Name	Guttenberg-Richter (Zmap)		Length (km)	Slip Rate (mm/y)	M_{max} (Mw)	Dip & Dip Direction
		b	β				
1	Caldıran	0.9	2.1	73	1.3	7.2	85-90 SW
2	Garni	0.6	1.4	96	1.5	7.1	40-60 NE
3	Aralik	0.6	1.4	91	1.2	7.1	85-85 S
4	Iğdır(1)	0.5	1.2	47	0.7	6.6	85-85 NE
5	Iğdır(2)	0.9	2.1	80	0.7	7	85-85 SW
6	Iğdır(3)	0.5	1.2	110	0.5	6.5	85-85 NE
7	Doğubeyazıt	0.9	2.1	130	1.1	7.2	50-50 SW
8	GSK	0.6	1.4	50	0.5	6.7	85-90 SW
9	Balıkgözü(S1)	0.7	1.6	110	1	7.2	85-85 NE
10	Balıkgözü(S2)	0.5	1	35	0.5	6.4	85-85 NE
11	Erciş (S1)	1	2.3	35	0.6	6.4	85-85 SW
12	Erciş (S2)	0.9	2.1	39	0.7	6.5	85-85 NE

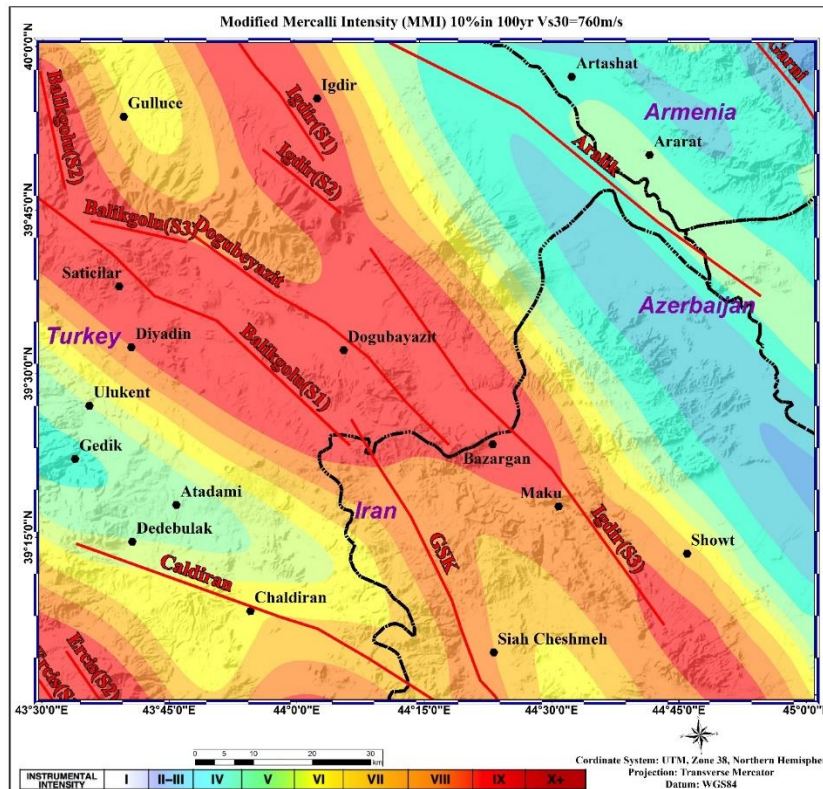
$$\beta = \ln 10 * b$$

روابط کاهندگی

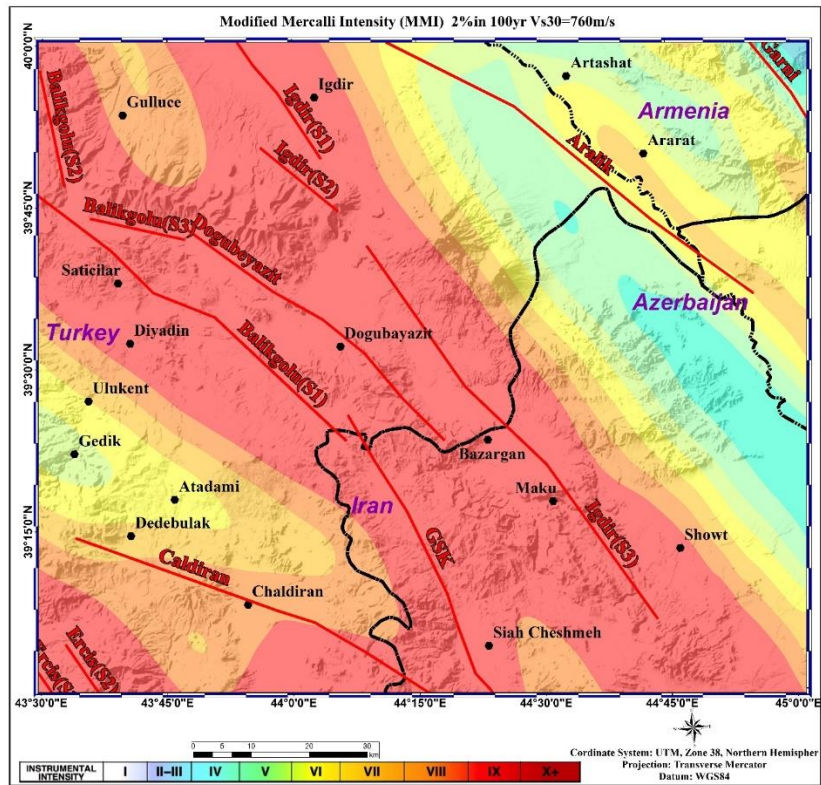
معادلات پیش بینی حرکت زمین (GMPEs^۴) یا مدل های کاهندگی، یکی از مهمترین بخش های مطالعات زلزله شناسی هستند. روابطی که برای محاسبه شدت استفاده می شوند معمولاً بسیار محدود می باشند. بنابراین، انتخاب GMPE ها، محدود به کتابخانه معادلات کاهندگی Ez-Frisk و رژیم زمین ساختی منطقه مورد مطالعه است. منطقه ماکو یک منطقه زمین ساختی فعال با لرزه خیزی کم عمق پوسته است. بر این اساس، چهار مدل جهانی (اتکینسون و کاکا، ۲۰۰۷؛ اتکینسون و سونلی، ۲۰۰۰؛ باکون و همکاران، ۲۰۰۳؛ والد و همکاران، ۱۹۹۹) برای تحلیل PMMI انتخاب شدند (Atkinson and Kaka, 2007; Wald et al., 1999; Atkinson and Sonley, 2000; Bakun et al., 2003). والد و همکاران (۱۹۹۹) روابط بین MMI، بیشینه شتاب زمین (PGA) و سرعت (PGV) را توسعه دادند. اتکینسون و سونلی (۲۰۰۰) روابط تجربی بین طیف های پاسخ و MMI را با استفاده از پارامترهایی مانند دامنه حرکت زمین، بزرگا و نزدیکترین فاصله به گسل توسعه دادند. باکن و همکاران (۲۰۰۳) با استفاده از پارامترهای بزرگا و فاصله، مدل جدیدی برای MMI پیدا کردند. اتکینسون و کالا (۲۰۰۷) رابطه ای بین PGV و MMI تشخیص دادند. این مدل ها با استفاده از زمین لرزه های کم عمق پوسته ایالات متحده با دامنه بزرگای ۳.۷ تا ۷.۴ که همخوان با رژیم لرزه زمین ساخت منطقه مورد مطالعه است، به فرمول در آمده اند. با توجه به درخت منطبق این مطالعه، وزن همه مدلها یکسان بود. برای محاسبات GMPEs، به دلیل فقدان داده در مورد شرایط خاک، مقدار ۷۶۰ متر بر ثانیه (سنگ) به عنوان سرعت موج برشی برای ۳۰ متر ابتدایی (Vs30) رسوبات یا سنگها انتخاب شد (BSSC, 1997). با استفاده از موارد ذکر شده، PMMI برای چهار گوش ماکو برای دوره های بازگشت ۴۷۵، ۹۷۵ و ۲۴۷۵ سال محاسبه شد (شکل های ۶-۸). در این قسمت، با استفاده از روش احتمالی، نقشه های PMMI برای زلزله های آینده ترسیم شد. با این حال، برای مقایسه، نقشه های شدت زلزله های گذشته نیز باید ترسیم شود. در نتیجه، با استفاده از داده های USGS ShakeMap برای رویدادهای اخیر و یافته های مطالعات انجام شده (Ambraseys and Melville, 1982; Berberian, 1995) (جدول ۱)، نقشه شدت زمین لرزه های به وقوع پیوسته در منطقه مطالعاتی به دست آمد (شکل ۹).



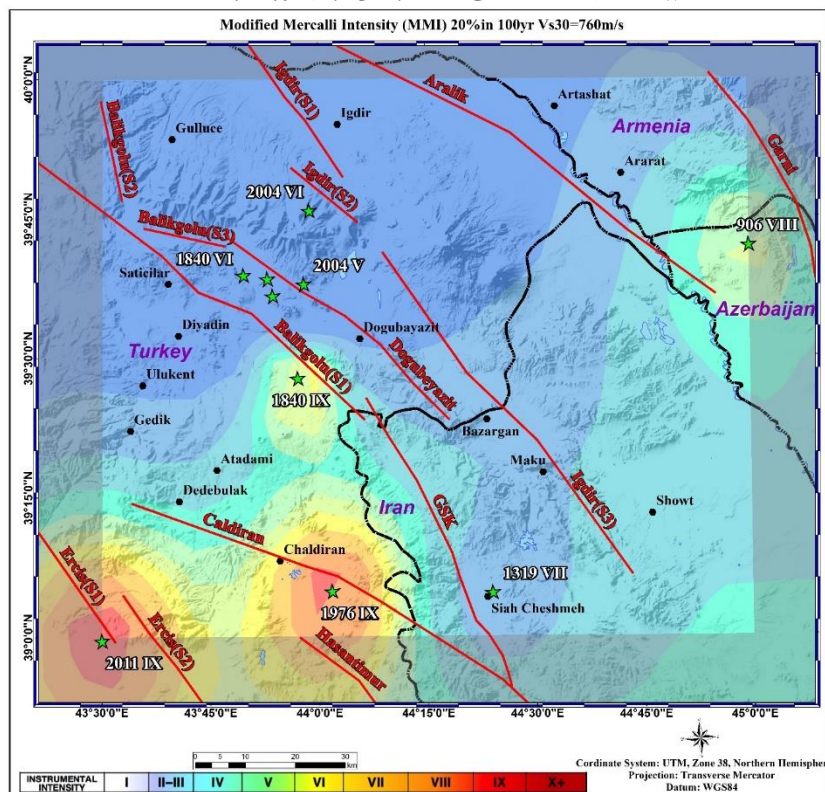
شکل ۶: پهنه بندی شدت اصلاح شده مرکالی برای دوره بازگشت ۴۷۵ سال



شکل ۷: پهنه بندی شدت اصلاح شده مرکالی برای دوره بازگشت ۹۷۵ سال



شکل ۸: پهنه بندی شدت اصلاح شده مرکالی برای دوره بازگشت ۲۴۷۵ سال



شکل ۹: پهنه بندی شدت زمین لرزه های رخ داده در گستره مورد مطالعه

بحث و نتیجه گیری

در این مطالعه، PMMI برای چهار گوش ماکو محاسبه شد. نقشه های PMMI تغییرات شدت مرکالی از II تا IX را برای ۴۷۵ سال، III تا X را برای ۹۷۵ سال و IV تا X+ را برای ۲۴۷۵ سال نشان داد. در هر سه نقشه، به وضوح می توان دریافت که بیشترین شدت زمین لرزه ها مربوط به فعالیت گسل های ایگدیر و بلیکگلو است. توزیع شدت از روند شمال غربی به جنوب شرقی این گسل ها پیروی می کند. بر این اساس، گسل های ذکر شده را می توان مخرب ترین چشمه های لرزه زا در منطقه ماکو دانست. همانطور که قبلاً ذکر شد، مطالعات در مورد نقشه های PMMI که نتایج آنها را می توان با نتایج مطالعه فعلی مقایسه کرد نادر است و فقط تعداد انگشت شماری از نقشه های لرزه ای از زلزله های رخ داده در دسترس می باشد. در این میان، حداکثر شدت IX برای زمین لرزه بینگول گزارش شده، که در سال ۲۰۰۳ با بزرگی ۶.۷ رخ داد. مرکز زمین لرزه در جنوب غربی ماکو بود. زمین لرزه اسپیتاک در سال ۱۹۸۸ با بزرگی ۶.۷ در فاصله ۳۰ کیلومتری از مرکز زلزله، شدت به V رسید. این زمین لرزه در ارتباط با حرکت گسل گارنی واقع در جنوب ارمنستان بود. نقشه شدت این زمین لرزه مقدار IX را در رومرکز زمین لرزه نشان داد که در فاصله ۳۰ کیلومتری به V کاهش می یابد. زمین لرزه ۲۰۱۱ وان با بزرگای ۷.۲ در جنوب شرقی منطقه مورد مطالعه مقادیر شدت X+ را برای رومرکز زلزله نشان داد. در فاصله کمتر از ۳۰ کیلومتری مرکز زلزله، شدت آن به VI کاهش یافته است. در مطالعه نقشه شدت لرزه ای برای دوره بازگشت ۴۷۵ ساله، در محل گسل های ایگدیر و بلیکگلو، حداکثر مقادیر شدت X بود و در فاصله ۳۰ کیلومتری به IV کاهش یافته است. بنابراین، نتایج همبستگی خوبی با نقشه های شدت زلزله های اسپیتاک، بینگول و وان نشان می دهد. از سوی دیگر، با نگاهی به منطقه شمالی در شکل ۹ مشخص می شود که با نتایج مطالعه برای دوره بازگشت ۴۷۵ ساله مطابقت ندارد، که عمدتاً به دلیل عدم وقوع زلزله در منطقه است. اهمیت نقشه های شدت در مطالعات لرزه خیزی باید بیش از پیش مورد توجه قرار گیرد. نتایج این مطالعه را می توان مبنای طرح های لرزه ای منطقه ماکو دانست.

References

- Alizadeh, A., Behyari, M., and Golandam, H., 2019, Structural Evolution and Halokinesis of Khaje Salt Diapir, North-West of Iran: *Geotectonics*, v. 53, p. 533-540.
- Ambraseys, N. N., 2009, *Earthquakes in the Mediterranean and the Middle East*, Cambridge University Press, Cambridge.
- Ambraseys, N. N., and Jackson, J., 1998, Faulting associated with historical and recent earthquakes in the eastern Mediterranean region: *Geophys. J. Int.*, v. 133, p. 390-406.
- Ambraseys, N. N., and Melville, C. P., 1982, *A History of Persian Earthquakes*, Cambridge University Press, Cambridge, 219 p.:
- Atkinson, G. M., and Kaka, S. L., 2007, Relationships between Felt Intensity and Instrumental Ground Motion in the Central United States and California: *Bulletin of The Seismological Society of America - BULL SEISMOL SOC AMER*, v. 97, p. 497-510.
- Atkinson, G. M., and Sonley, E., 2000, Empirical Relationships between Modified Mercalli Intensity and Response Spectra: *Bulletin of the Seismological Society of America*, v. 90, p. 537-544.
- Baftipour, M., Jarahi, H., Polat, G., and Seifilaleh, S., 2022, Damavand Earthquake of 2020 the Mainshock or an Alarm for Disaster for the Capital of Iran: *American Journal of Engineering and Applied Sciences*, v. 15, no. 1.
- Bakun, W. H., Johnston, A. C., and Hopper, M. G., 2003, Estimating Locations and Magnitudes of Earthquakes in Eastern North America from Modified Mercalli Intensities: *Bulletin of the Seismological Society of America*, v. 93, p. 190-202.
- Basili, R., Kastelic, V., Demircioglu, M. B., Garcia Moreno, D., Nemser, E. S., Petricca, P., Sboras, S. P., Besana-Ostman, G. M., Cabral, J., Camelbeeck, T., Caputo, R., Danciu, L., Domac, H., Fonseca, J., García-Mayordomo, J., Giardini, D., Glavatovic, B., Gulen, L., Ince, Y., Pavlides, S., Sesetyan, K., Tarabusi, G., Tiberti, M. M., Utkucu, M., Valensise, G., Vanneste, K., Vilanova, S., and Wössner, J., 2013, The European Database of Seismogenic Faults (EDSF) compiled in the framework of the Project SHARE: <http://diss.rm.ingv.it/share-edsf/>.
- Berberian, M., 1976a, An explanatory note on the first seismotectonic map of Iran; A seismotectonic review of the country. In: *Contribution to the seismotectonics of Iran (Part II): Geological Survey of Iran*, v. 39, p. 7-142.
- Berberian, M., 1976b, *Generalized Fault Map of Iran, Scale 1:5000000*, Geological Survey of Iran.
- Berberian, M., 1995, *Natural Hazards and the First Earthquake Catalogue of Iran; Volume 1- Historical Hazards in Iran Prior to 1900*, 649p.
- Berberian, M., 2014, *Earthquake and Coseismic Surface Faulting on the Iranian Plateau; a Historical, Social, and Physical Approach*, Elsevier, 770 p.:
- Berberian, M., and King, G. C. P., 1981, Towards a paleogeography and tectonic evolution of Iran: *J. Earth Sci*, v. 18, p. 1764-1766
- Berberian, M., and Yeats, R. S., 1999, Patterns of historical earthquake rupture in the Iranian plateau: *Bulletin of the Seismological Society of America*, v. 89, p. 120-139.
- BSSC, 1997, *NEHRP Recommended Provisions for Seismic Regulations for New Buildings and Other Structures, Part I Provisions: FEMA302*.
- Cisternas, A., and Philip, H., 1997, Seismotectonics of the Mediterranean region and the Caucasus. *Historical and Prehistorical Earthquakes in the Caucasus*, In: D. Giardini and S. Balassanian (eds.) , *NATO Asi Series: Environment Kluwer Academic Publishers*, v. 28, no. 2, p. 39-77.
- Copley, A., and Jackson, J., 2006, Active tectonics of the Turkish-Iranian Plateau: *Tectonics*, v. 25.
- Danciu, L., Sesetyan, K., Demircioglu, M., Gulen, L., Zare, M., Basili, R., Elias, A., Adamia, S., Tsereteli, N., Yalçin, H., Utkucu, M., Khan, A., Sayab, M., Hessami, K., Rovida, A., Stucchi, M., Burg, J.-P., Karakhanian, A., Babayan, H., and Giardini, D., 2018, The 2014 Earthquake Model of the Middle East: seismogenic sources: *Bulletin of Earthquake Engineering*, v. 16.

- Emre, Ö., Duman, T. Y., Özalp, S., Şaroğlu, F., Olgun, Ş., Elmacı, H., and Çan, T., 2018, Active fault database of Turkey: Bulletin of Earthquake Engineering, v. 16, no. 8, p. 3229-3275.
- Evernden, J. F., and Thomson, J. M., 1985, Predicting seismic intensities. In: Ziony J.I. (ed), Evaluating earthquake hazards in the Los Angeles region - An earth-science perspective, Professional Paper 1360, Denver, U.S. Geological Survey, 151-202 p.:
- Faridi, M., Burg, J.-P., Nazari, H., Talebian, M., and Ghorashi, M., 2017, Active faults pattern and interplay in the Azerbaijan region (NW Iran): Geotectonics, v. 51, no. 4, p. 428-437.
- Faridi, M., Nazari, H., Burg, J. P., Haghypour, N., Talebian, M., Ghorashi, M., Shokri, M., Ahmadzadeh, E., and Sahebari, S., 2019, Structural Characteristics, Paleoseismology and Slip Rate of the Qoshadagh Fault, Northwest of Iran: Geotectonics, v. 53, p. 280-297.
- Gardener, J. K., and Knopoff, L., 1974, Is the Sequence of Earthquakes in Southern California with Aftershocks Removed, Poissonian: Bull. Seism. Soc. Am., v. 64, p. 1363-1367.
- Giardini, D., Woessner, J., Danciu, L., Crowley, H., Cotton, F., Grünthal, G., Pinho, R., Valensise, G., Akkar, S., Arvidsson, R., Basili, R., Cameelbeeck, T., Campos-Costa, A., Douglas, J., Demircioglu, M. B., Erdik, M., Fonseca, J., Glavatovic, B., Lindholm, C., Makropoulos, K., Meletti, C., Musson, R., Pitilakis, K., Sesetyan, K., Stromeyer, D., Stucchi, M., and Rovida, A., 2013, Seismic Hazard Harmonization in Europe (SHARE): Online Data Resource: SHARE.
- Gülkan, P., Gurpinar, A., Celebi, M., Arpat, E., and Gençoğlu, S., 1978, Engineering report on the Muradiye- Caldiran, Turkey, earthquake of 24 November 1976.
- Gutenberg, B., and Richter, C. F., 1956, Earthquake Magnitude, Intensity, Energy and Acceleration: Bull. Seism. Soc. Am., v. 46, p. 105-145.
- Hartmann, J., and Moosdorf, N., 2012, Global Lithological Map Database v1.0 (gridded to 0.5° spatial resolution): PANGAEA, Maps for understanding the Earth (CGMW).
- Jackson, J., 1992, Partitioning of strike-slip and convergent motion between Eurasia and Arabia in Eastern Turkey and the Caucasus: J. Geophys. Res., v. 97, p. 12471-12479.
- Jarahi, H., 2017, Delineate Location of the Last Earthquake Case Study NW of Iran: American Journal of Geosciences, v. 17, no. 1, p. 6.
- Jarahi, H., 2021, Paleo Mega Lake of Rey Identification and Reconstruction of Quaternary Lake in Central Iran: Open Quaternary, v. 7, no. 1, p. 1-15.
- Jarahi, H., Moghimi, S., Tan, O., Saygılı, O., and Karagöz, O., 2022a, Paleo Mega Lake of Rey Sediments and Its Effect on Earthquake Acceleration Case Study Tehran City., SSA Annual Meeting 2022: Washington D.C., USA.
- Jarahi, H., 2022b, Revision of Iranian Seismic Design Code for Tehran Region Based on "Paleo Mega Lake of Rey" Theory, SSA Annual Meeting 2022: Washington D.C., USA.
- Jarahi, H., Pourkermani, M., Akbarzadeh, R., and Farajpour, Z., 2022c, The re-interpretation of Quaternary faults near Tehran, Based on Paleo Mega Lake of Rey Theory, SSA Annual Meeting 2022: Washington D.C., USA, p. 7.
- Jarvis, A., Reuter, H. I., Nelson, A., and Guevara, E., 2008, Hole-filled SRTM for the globe Version 4, available from the CGIAR-CSI SRTM 90m Database in NASA, ed.: USA.
- Javadi Dokahe, M., Akasheh, B., Pourkermani, M., Gheitanchi, M., Dorostian, A., and Jarahi, H., 2021, Arias intensity Macrozonation and effect of Quaternary Deposits on its propagation Case Study Khoy region: Quaternary Journal of Iran, v. 6, no. 4, p. 583-594.
- Kanamori, H., 1981, The nature of seismic patterns before large earthquakes. In Earthquake Prediction: An International Review (eds. Simpson, D.W., and Richards, P.G.) Maurice Ewing Series, v. 4, p. 1-19.
- Kanamori, H., 2013, The Nature of Seismicity Patterns Before Large Earthquakes, Volume 4, p. 1-19.
- Karakhanian, A. S., Djrashian, R., Trifonov, V. G., Philip, H., Arakelian, S., and Avagyan, A., 2002, Holocene-historical volcanism and active faults as natural risk factors for Armenia and adjacent countries: Journal of Volcanology and Geothermal Research, v. 113, p. 319-344.

- Karakhanian, A. S., Trifonov, V. G., Philip, H., Avagyan, A., Hessami, K., Jamali, F., Bayraktutan, M. S., Bagdassarian, H., Arakelian, S., Davtian, V., and Adilkhanyan, A., 2004, Active faulting and natural hazards in Armenia, Eastern Turkey and North-Western Iran: *Tectonophysics*, v. 380, p. 189-219.
- Karakhanian, A. S., Vernant, P., Doerflinger, E., Avagyan, A., Philip, H., Aslanyan, R., Champollion, C., Arakelyan, S., Collard, P., Baghdasaryan, H., Peyret, M., Davtyan, V., Calais, E., and Masson, F., 2013, GPS constraints on continental deformation in the Armenian region and Lesser Caucasus.: *Tectonophysics* v. 592, p. 39–45.
- Moayyed, M., Valinasab, F., Jahangiri, A., and Azizi, H., 2020, Petrography and Petrology of early Paleozoic bimodal metavolcanic rocks in North of Maku, North West of Iran: *ULUM-I ZAMIN*.
- Najafian A., Jarahi, H., and Bayraktutan M.S., 2022, Challenges Facing Discovery of Largest Lake in World History Geotechnical Investigation, *SSA Annual Meeting 2022: Washington D.C., USA*.
- Nazari, H., Talebian, M., Ghorashi, M., and Fathian, M. A., 2013, *Seismotectonic Map of NW Iran: GSI*.
- Nowroozi, A. A., 1985, Empirical Relations between Magnitudes and Fault Parameters for Earthquakes in Iran: *Bull. Seism. Soc. Am.*, v. 75, no. 5, p. 1327-1338.
- Şeşetyan, K., Danciu, L., Demircioğlu Tümsa, M. B., Giardini, D., Erdik, M., Akkar, S., Gülen, L., Zare, M., Adamia, S., Ansari, A., Arakelyan, A., Askan, A., Avanesyan, M., Babayan, H., Chelidze, T., Durgaryan, R., Elias, A., Hamzehloo, H., Hessami, K., Kalafat, D., Kale, Ö., Karakhanyan, A., Khan, M. A., Mammadli, T., Al-Qaryouti, M., Sayab, M., Tsereteli, N., Utkucu, M., Varazanashvili, O., Waseem, M., Yalçın, H., and Yılmaz, M. T., 2018, The 2014 seismic hazard model of the Middle East: overview and results: *Bulletin of Earthquake Engineering*, v. 16, no. 8, p. 3535-3566.
- Solaymani Azad, S., 2009, Evaluation de l'alea sismique pour les villes de Tehran, Tabriz et Zandjan dans le NW de l'Iran approche morphotectonique et paleosismologique [Ph.D.: Université Montpellier II, 151 p.
- Tchalenko, J. S., Berberian, M., Iranmanesh, H., Baily, M., and Arsovsky, M., 1974, Tectonic framework of the Tehran region: *Geol. Surv. Iran* v. 29, p. 7-46.
- Van Couvering, J. A., and Miller, J. A., 1971, Late Miocene marine and non-marine time scale in Europe: *Nature*, no. 230, p. 559 – 563.
- Wald, D., Quitoriano, V., Heaton, T., and Kanamori, H., 1999, Relationships between Peak Ground Acceleration, Peak Ground Velocity, and Modified Mercalli Intensity in California: *Earthquake Spectra*, v. 15, p. 557-564.
- Wells, D. L., and Coppersmith, K. J., 1994, New Empirical Relationships among Magnitude, Rupture Length, Rupture Width, Rupture Area and Surface Displacement: *Bulletin of the Seismological Society of America*, v. 84, no. 4, p. 974-1002.
- Westaway, R., 1990, Seismicity and tectonic deformation rate in Soviet Armenia: Implications for local earthquake hazard and evolution of adjacent regions: *Tectonics*, v. 9, p. 477-503.
- Wiemer, S., 2001, A Software Package to Analyze Seismicity: ZMAP: *Seismological Research Letters*, v. 72, no. 3, p. 373-382.
- Zare, M., 1995, Relationships for Magnitude, intensity and pike horizontal acceleration base on Iranian Earthquakes: *journal of seismology and engineering earthquake and research*, v. 6, p. 12-14.