

پهنه بندی شدت آریاس و اثر رسوبات کواترنری بر تغییرات آن

مطالعه موردی گستره خوی

محمد رضا جوادی دوگانه؛ 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: ۱۳۹۹/۰۹/۳۰

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۰۵/۱۰

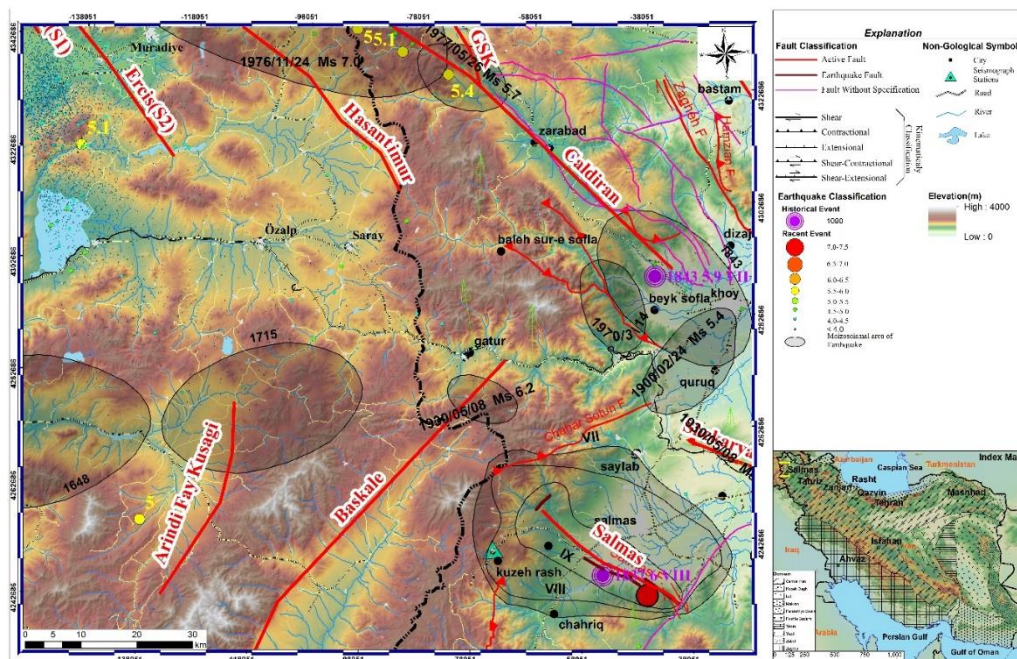
چکیده

زلزله یکی از خطرات طبیعی است که طی سالها باعث تلفات و خسارات مالی زیادی در سراسر جهان شده است. به همین دلیل است که مطالعات تجزیه و تحلیل خطر زلزله باید با جدیت بیشتری مطالعه شود. ایران در یکی از مناطق لرزه خیز جهان، کمربند هیمالیا-آپ قرار دارد که هر ساله زلزله های زیادی را تجربه می کند. تابع شدت آریاس، به عنوان یکی از پارامترهای مهم زمین لرزه، به تجزیه و تحلیل خطر لرزه ای کمک می کند، و می تواند برای برآورد عملکرد سازه، پایداری دامنه ها و روانگرایی در طول زلزله مورد استفاده قرار گیرد. در این مطالعه ضمن تحلیل زمین ساختی و لرزه زمین ساختی گستره خوی در شمال غرب ایران، پهنه بندی شدت زمین لرزه بر اساس روش آریاس صورت گرفته است. مقادیر عددی شدت آریاس برای دوره بازگشت های ۴۷۵، ۹۷۵ و ۲۴۷۵ ساله به صورت نقشه های هم پتانسیل تهیه گردید. در تحلیل ها، اثر تغییرات رسوبات کواترنری، نیز لحاظ گردید. به طور کاملاً مشهودی، شدت زمین لرزه جدای از فاصله از گسل، از تغییرات سرعت موج برشی تاثیر می پذیرد. به نحوی که با فاصله از چشمه لرزه زا، در مناطقی با ضخامت بالای رسوبات کواترنری، حتی افزایش نیز می یابد. این مسئله بازگو کننده اثر شرایط زمین شناسی در برآورد پارامترهای وابسته به زمین لرزه است.

کلیدواژه ها: شدت آریاس، زمین لرزه، دوره بازگشت، سرعت موج برشی، چشمه لرزه زا.

مقدمه

طراحی مبتنی بر عملکرد سازه های مهندسی، مستلزم شناسایی شاخص های بحرانی آسیب است. این پارامترها با پارامترهای کلیدی حرکت زمین^۱ که کارایی آن ها با توجه به میزان تغییرپذیری همبستگی بین شاخص آسیب (EDP^۲) و پارامتر حرکت زمین انتخاب شده (اندازه شدت) تعیین می شود، در ارتباط است. برای به دست آوردن پیش بینی تا حد ممکن دقیق از میزان آسیب، لازم است که این تنوع را با انتخاب اندازه گیری بهینه شدت، به حداقل برسانیم. پارامترهای مربوط به دامنه حرکت زمین، مانند شتاب بیشینه زمین (PGA^۳)، اغلب شاخص های ضعیفی برای برآورد آسیب هستند. برعکس، پارامترهایی که دامنه، محتوای فرکانس و مدت زمان حرکت زمین را شامل می شوند، احتمالاً پیش بینی کننده های قابل اطمینان تری برای پتانسیل آسیب هستند. گستره مورد مطالعه، در محدوده چهارگوش خوی در منطقه مرزی شمال غرب ایران ترکیه قرار گرفته است. محدوده جغرافیایی حد فاصل طول های ۳۸ تا ۳۹ و عرض های ۴۳،۵ تا ۴۵ را پوشش می دهد. قرار گیری دریاچه های مهمی نظیر وان (Van) و ارچیک (Ercek) در بخش غربی گستره مطالعاتی، همچنین وجود مرز شمالی جنوبی ایران-ترکیه در میانه نقشه، از جمله ویژگی های جغرافیایی این گستره است (شکل ۱).



شکل ۱: موقعیت جغرافیایی، راه های دسترسی و عوارض مورفولوژیکی گستره مورد مطالعه در گوشه شمال غربی کشور به همراه موقعیت کانونی زمین لرزه های تاریخی و دستگاهی و چشمه های لرزه زای منطقه. پهنه مهلرزه ای زمین لرزه های مهم (Berberian, 2014) با بیضی های خاکستری نشان داده شده است.

¹ Ground Motion

² EDP: Engineering Demand Parameters

³ PGA: Peak Ground Acceleration

پیشینه مطالعات

مقیاس های مختلفی برای سنجش شدت زمین لرزه وجود دارد که قدیمی ترین آنها مرکالی^۱ و آریاس هستند. قدرت زلزله را می توان از روی شدت ارتعاشات حاصل از آن برآورد نمود. برای اندازه گیری شدت زلزله از مقیاس مرکالی استفاده می شود (Mercalli, 1902). این مقیاس دارای ۱۰ درجه بندی است و اصلاح شده مقیاس قبلی مرکالی (Mercalli, 1883) با ۶ درجه بندی می باشد. مقیاس اصلاح شده مرکالی (Howell, 2003) (MMI^۲)، را به ۱۲ درجه تقسیم کرده اند که با اعداد رومی نمایش داده می شوند. شدت مرکالی، زلزله را بر اساس احساس افراد، جابجایی و واژگونی اجسام، اتفاقات قابل مشاهده، آثار خرابی های به وجود آمده از زلزله و سایر شاخص های کیفی توصیف می کند. با توجه به اینکه مقیاس شدت، اثرات واقعی زلزله را در هر محل نشان می دهد، عملاً تمامی اثرات کاهنده و تشدید کننده جنبش زمین نیز در آن اعمال شده است و لذا کاربرد زیادی در علوم مهندسی و همچنین مدیریت بحران دارد. آریاس (Arias, 1970) ابزاری برای اندازه گیری شدت زمین لرزه بر اساس انتگرال مدت زمان مربع شتاب حرکت زمین تعیین کرد، که بعداً توسط چندین محقق برای ارزیابی پتانسیل آسیب استفاده شد. هارپ و ویلسون (Harp and Wilson, 1995) دریافتند که شدت آریاس به خوبی با توزیع زمین لغزش های ناشی از زلزله ارتباط دارد. کاین و میچل (Kayen and Mitchell, 1997) روشی را برای ارزیابی پتانسیل روانگرایی رسوبات خاک در هنگام زلزله بر اساس شدت آریاس پیشنهاد کردند. کاباناس و همکاران (Cabañas et al., 1997) بین شدت محلی (MSK) و شدت آریاس همبستگی خوبی یافتند. آنها همچنین دریافتند که برای سازه های خاصی مانند سازه های روستایی و خانه های خشتی و آجری میزان آسیب می تواند با شدت آریاس مرتبط باشد. بورجا و همکاران (Borja et al., 2002) از شدت آریاس به عنوان معیاری برای مقایسه نتایج حاصل از دو تحلیل واکنش لرزه ای استفاده کردند. همچنین برای تعیین شاخص های مخرب مانند عامل پتانسیل تخریب $P_D = I_a/V_0^2$ ، جایی که I_a شدت آریاس است، و V_0 مقدار صفر عبور از تاریخ شتاب - زمان است نیز از این پارامتر استفاده می شود (Araya and Saragoni, 1984).

علیرغم این واقعیت که شدت آریاس به عنوان یک شاخص قابل اعتماد برای آسیب شناخته شده است، تعداد بسیار اندکی رابطه تجربی برای پیش بینی آن بر اساس مجموعه گسترده ای از داده های زلزله وجود دارد. ویلسون و کیفر (Wilson and Keefer, 1985) بر اساس مجموعه ای از داده های زلزله کالیفرنیا یک رابطه کاهندگی برای شدت آریاس ایجاد کردند. کاین و میچل (Kayen and Mitchell, 1997) همچنین چنین رابطه ای را بر اساس ۶۶ زمین لرزه که عمدتاً در کالیفرنیا ثبت شده بود، پیشنهاد کردند. پاچیلو و همکاران (Paciello et al., 2000) با استفاده از ۲۳۰ زمین لرزه از پایگاه داده مشترک ایتالیایی - یونانی، یک رابطه پیش بینی تجربی ایجاد کردند. رابطه تراورسارو و همکاران (Travasarou et al., 2003) با توجه به تعداد و پراکندگی بالای زمین لرزه های مورد استفاده، می تواند به عنوان تنها رابطه جهانی برای سنجش شدت آریاس قلمداد گردد. البته رابطه های بسیاری بعدها برای سنجش شدت آریاس پیشنهاد شد. مهم ترین آن ها مدل لی و همکاران برای منطقه تایوان (Lee et al., 2015)، مدل آبراهامسون و همکاران (Abrahamson et al., 2016) برای محاسبه شدت آریاس در روابط کاهندگی نسل جدید (NGA^۳)، همچنین مدل های ارائه شده توسط کمپیل و بزرگنیا (Campbell and Bozorgnia, 2012; Bozorgnia, 2019) برای گستره غرب آمریکا و بسیاری دیگر است. با این حال رابطه تراورسارو و همکاران (Travasarou et al., 2003) همخوانی بسیار بهتری با رژیم تکنونیک گستره مورد مطالعه دارد. در این پژوهش سعی بر آن است تا با استفاده از کاربردی ترین روابط تجربی سنجش شدت زمین لرزه به روش آریاس، نقشه های هم شدت زمین لرزه برای احتمال فزونی ۲۰٪، ۱۰٪ و ۵٪ در

¹ Mercalli intensity scale

² MMI: Modified Mercalli intensity

³ NGA: Next Generation Attenuation

۱۰۰ سال برای گستره مورد مطالعه، تحلیل گردد. همچنین اثر اعمال نقشه سرعت موج برشی (به جای یکنواخت فرض کردن منطقه) در ارتباط مستقیم با تغییرات در ضخامت رسوبات کواترنری، در تحلیل ها وارد خواهد شد. همانطور که ذکر شد، روابط کاهندگی که به بررسی شدت آریاس پرداخته اند بسیار اندک هستند. در این میان رابطه تراورسارو و همکاران (Travasari et al., 2003) از معدود روابط جهانی است که می توان بدان استناد نمود. لذا در بررسی های این پژوهش، از آن استفاده می شود. بعلاوه چه در این منطقه و چه در سایر مناطق، نقشه هم پتانسیل برای شدت آریاس تهیه نشده است و از این رو، نتایج این تحقیق در نوع خود بی بدیل است. در ادامه به شرح روش مورد استفاده پرداخته شده است. سپس ضمن بررسی زمین ساخت و لرزه زمین ساخت گستره مورد مطالعه، چشمه های لرزه زا شناسایی و پارامتر های لرزه خیزی آن ها تعیین گردیده است. در نهایت با استفاده از نرم افزار Ez-Frisk، تحلیل های مربوط به برآورد شدت آریاس انجام شده است.

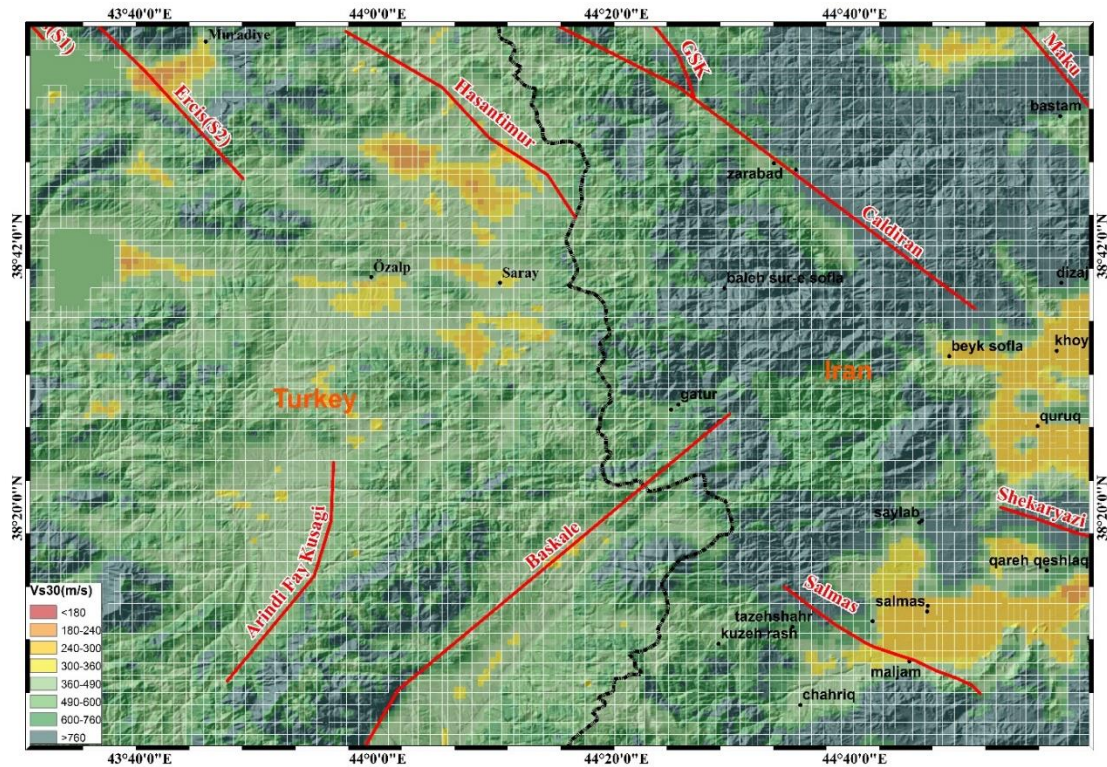
روش تحلیل ها

تابع شدت آریاس یکی از پارامترهای لرزه ای است که معمولاً در تجزیه و تحلیل خطر لرزه ای برای تشخیص پتانسیل آسیب رسانی زلزله استفاده می شود و به عنوان مقیاسی از لرزش های مرتبط با زلزله از نظر مقدار انرژی ذخیره شده توسط یک سری بی نهایت از نوسانگرهای دارای وزن واحد، با یک درجه آزادی و فرکانس از صفر تا بی نهایت تعریف شده است (Elnashai and Sarno, 2004). این پارامتر با انتگرال مربع مدول شتاب زمین در تمام تاریخچه زمانی یک زلزله نسبت مستقیم دارد. به طور معمول، این پارامتر بر اساس یک نوسان ساز بدون میرایی، با توجه به رابطه زیر مورد سنجش قرار می گیرد (Arias, 1970)

$$I_A = \frac{\pi}{2g} \int_0^{T_d} a(t)^2 dt \quad (\text{m/s})$$

که در این رابطه I_A تابع شدت آریاس در واحد سرعت، متر بر ثانیه است و $a(t)$ تاریخچه زمانی شتاب زمین در واحد میانگین گرانس معادل 0.71 m/s^2 می باشد، همچنین t زمان بر اساس ثانیه و dT کل مدت زمان حرکت زمین خواهد بود. تابع شدت آریاس پارامتری است که شامل ویژگی هایی نظیر دامنه و مدت زمان حرکت زمین برای طیف گسترده ای از فرکانس های ثبت شده است؛ بنابراین در مقایسه با پارامترهای مبتنی بر حداکثر مقادیر حرکت زمین، به منظور ارزیابی اثرات زلزله برای اهداف مهندسی بسیار مؤثرتر می باشد. در واقع، تابع شدت آریاس به منظور ایجاد رابطه متناسب با آسیب زلزله بیان شده است و برای توصیف لرزش های با قابلیت ایجاد ناپایداری در سازه، زمین لغزش (Chousianitis et al., 2014; Travasarou and Bray, 2003) و روانگرایی (Kayen and Mitchell, 1997) مورد استفاده قرار می گیرد (Khademi, 2002; Mamseyedeh et al., 2021).

شرایط ساختگاه یا همان سرعت موج برشی در ۳۰ متر ابتدایی خاک (V_{s30}) اثر تشدید کننده در برآورد شدت زمین لرزه دارد. در این پژوهش از نقشه سرعت موج برشی جهانی (Allen and Wald, 2007) استفاده شده است. اساس این نقشه بر وضعیت توپوگرافی و شرایط واحدهای کواترنری استوار است. بدین منظور شبکه ۷۰۰ در ۷۰۰ متر و به تعداد ۲۴۰۰۰ نقطه برای اعمال نقشه سرعت موج برشی وارد نرم افزار ez-frisk گردید (شکل ۲). در این تحقیق از رابطه تجربی که تراورسارو و همکاران (Travasari et al., 2003) برای محاسبه شدت آریاس ارائه نموده اند، استفاده شده است. شکل عملکردی این معادله تجربی بر اساس یک مدل نظری انتخاب شده و ضرایب متغیرهای مستقل از طریق تحلیل رگرسیون غیر خطی با استفاده از یک مدل اثرات تصادفی تعیین می شود. رابطه مذکور بر اساس اطلاعات دریافتی از یک پایگاه داده بزرگ جهانی از زمین لرزه های کم عمق پوسته در حاشیه صفحات فعال از جمله زمین لرزه های بزرگ است. این رابطه ۳ دسته بندی برای سرعت موج برشی در نظر می گیرد. اساس این دسته بندی بر مبنای تحقیقات باری و رودریگز-مارک (Bray and Rodriguez-Marek, 1997) استوار است. بدین صورت که زمین های با سرعت موج برشی بیشتر از ۷۶۰ متر بر ثانیه در رده B، بین ۷۶۰ تا ۳۶۰ متر بر ثانیه در رده C و کمتر از ۳۶۰ را در رده D قرار می دهند.



شکل ۴: نقشه هم پتانسیل سرعت موج برشی (بر اساس متر بر ثانیه) گستره مورد مطالعه بر اساس مطالعات (Allen and Wald, 2007)، شبکه بندی مورد استفاده در تحلیل ها با مربع های سفید کوچک نشان داده شده است.

نتایج

گستره مورد مطالعه در استان لرزه زمین ساختی وان قرار گرفته است (Nayeri et al., 1995). از جمله ویژگی های استان های لرزه زمین ساختی مذکور، تعداد زیاد زمین لرزه ها و بزرگای متوسط تا زیاد آن ها می باشد. ژرفای کانونی زمین لرزه ها نیز در این منطقه کم و محدود به بخش بالایی پوسته است. بزرگ ترین زمین لرزه های روی داده در گستره مورد مطالعه، رویداد زمین لرزه تاریخی ۱۶۴۸ با بزرگای ۶٫۷ به وقوع پیوسته اند. به علاوه زمین لرزه دستگای ۱۹۳۰ سلماس با بزرگای ۷٫۲ نیز در ارتباط با جنبش گسل سلماس بوده است (Jarahi, 2017). برای برآورد بیشینه بزرگای پذیرفتنی زمین لرزه محتمل در امتداد یک گسل اصلی و لرزه زا در گستره مورد مطالعه، با در نظر گرفتن زمین لرزه های فوق و احتمال وجود خطا در بر آورد زمین لرزه های تاریخی، عدد $M_s 7.2$ را پیشنهاد کرد. در جدول ۱ بیشینه بزرگای متناسب به گسل های موجود در گستره مورد بررسی تعیین گردیده است. موقعیت چشمه های لرزه زا به همراه سایر گسل های غیر فعال گستره مورد مطالعه در شکل ۱ نشان داده شده است. در شکل مذکور همچنین موقعیت رومرکز زمین لرزه ای تاریخی و دستگای این منطقه ارائه شده است.

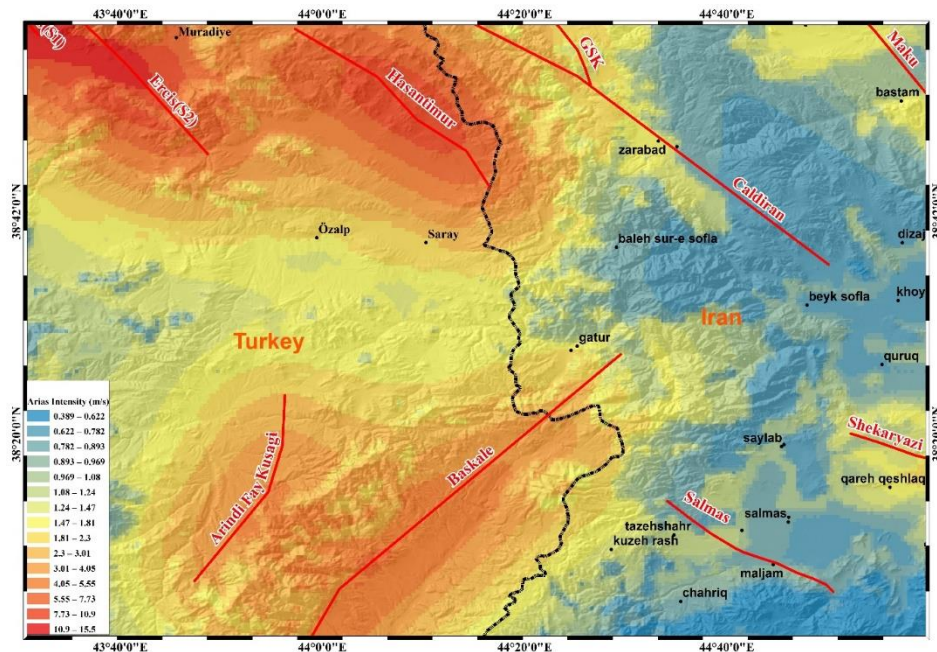
در ترسیم گسل ها و به نقشه در آوردن آن ها، سعی شده تا کلیه مطالعات پیشین (Ambraseys, 2009; Ambraseys and Jackson, 1998; Barka and Reilinger, 1997; Basili et al., 2013; Jarahi, 2021; Jarahi et al., 2022a, b; Jarahi et al., 2022c; Jarahi et al., 2022d; Mamseyedeh et al., 2021; Najafian A. et al., 2022) گردآوری مقایسه و بررسی گردد. مطالعات نظری و همکاران (Nazari et al., 2013)، کاراخیان و همکاران (Karakhanian et al., 2013)، گاردینی و همکاران (Giardini et al., 2013)، باسیلی و همکاران و گولن و همکاران (Gulen et al., 2011) بیشترین رهنمود را در شناسایی و قطعه بندی عناصر ساختاری گستره چهار گوش خوی داشته اند. در ادامه در جدول ۱

مشخصات گسل‌های فعال گستره مورد مطالعه ارائه شده است. از آنجا که برخی از گسل‌ها در هر دو کشور ایران و ترکیه امتداد یافته اند، نام‌های مختلف آن‌ها نیز ارائه شده است. شکل‌های ۳ تا ۵ به ترتیب نقشه‌های هم‌پتانسیل شدت آریاس را برای احتمال فزونی ۲۰٪، ۱۰٪ و ۵٪ در ۱۰۰ سال نشان می‌دهد.

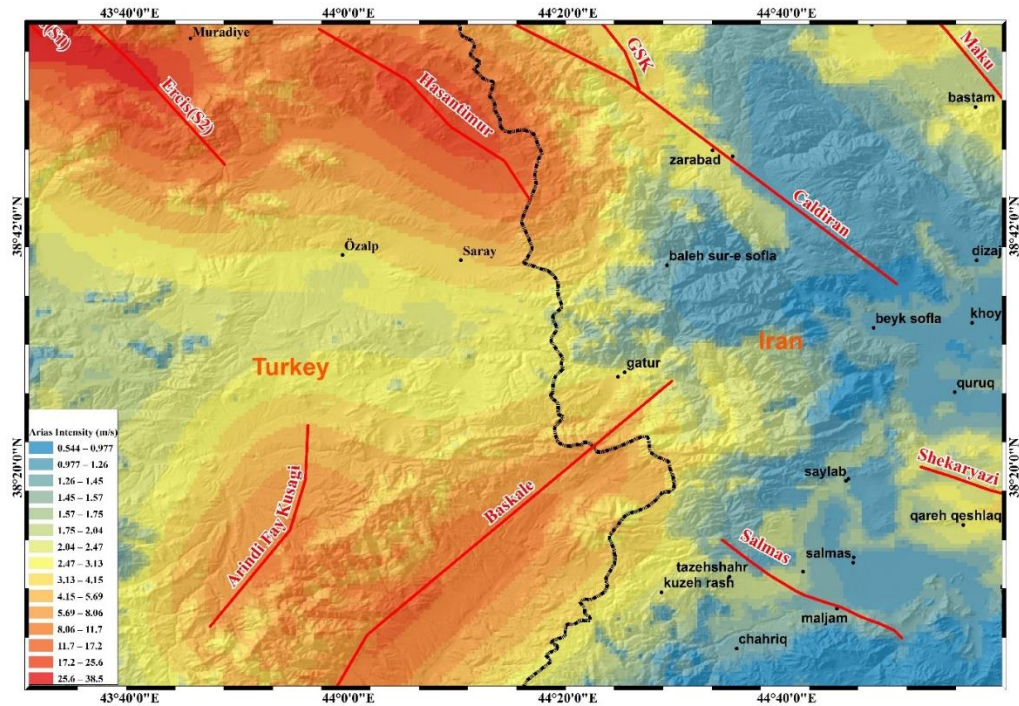
جدول ۱: متغیرهای لرزه‌خیزی گسل‌های گستره مورد مطالعه

No.	Fault Name		G-R (Zmap)		Length (km)	Slip Rate (mm/y)	Magnitude(Mw)				
	Persian	Turkey	b	β			1	2	3	4	Mmax
1	Chaldiran	Caldiran	0.9	2.1	73	1.3	7.3	7.1	7.2	7.1	7.2
2	Nakhichevan(S1)	Aralik	0.8	1.8	91	1.2	7.1	7.0	7.1	7.0	7.1
3	Maku	Igdir(1)	0.6	1.4	127	0.7	7.4	7.2	7.2	7.2	7.2
4	-	Baskaleh	1.1	2.5	100	0.7	7.2	7.1	7.1	7.1	7.1
5	Tasuj	Tasuj	0.6	1.4	130	1.1	7.5	7.2	7.2	7.2	7.2
6	Gailatu-Siah Chesmeh-Khoy	GSK	0.6	1.4	50	0.5	6.6	6.7	6.7	6.6	6.7
7	-	Shekaryazi	0.5	1.2	30	1.0	6.1	6.4	6.5	6.3	7.2
8	Salmas	Salmas	0.7	1.6	35	0.5	6.3	6.5	6.5	6.4	7.2
9	-	Ercis (S1)	0.6	1.4	35	0.6	6.3	6.5	6.5	6.4	6.4
10	-	Ercis (S2)	0.9	2.1	39	0.7	6.4	6.6	6.6	6.5	6.5
11	-	Gurpinar	0.9	2.1	29	1.7	6.1	6.4	6.4	6.3	6.3
12	-	Arindi Fay Kusagi	1.1	2.5	37	2.7	6.3	6.5	6.6	6.4	6.5
13	-	Hasantimur	0.6	1.4	40	0.5	6.4	6.6	6.6	6.5	6.5

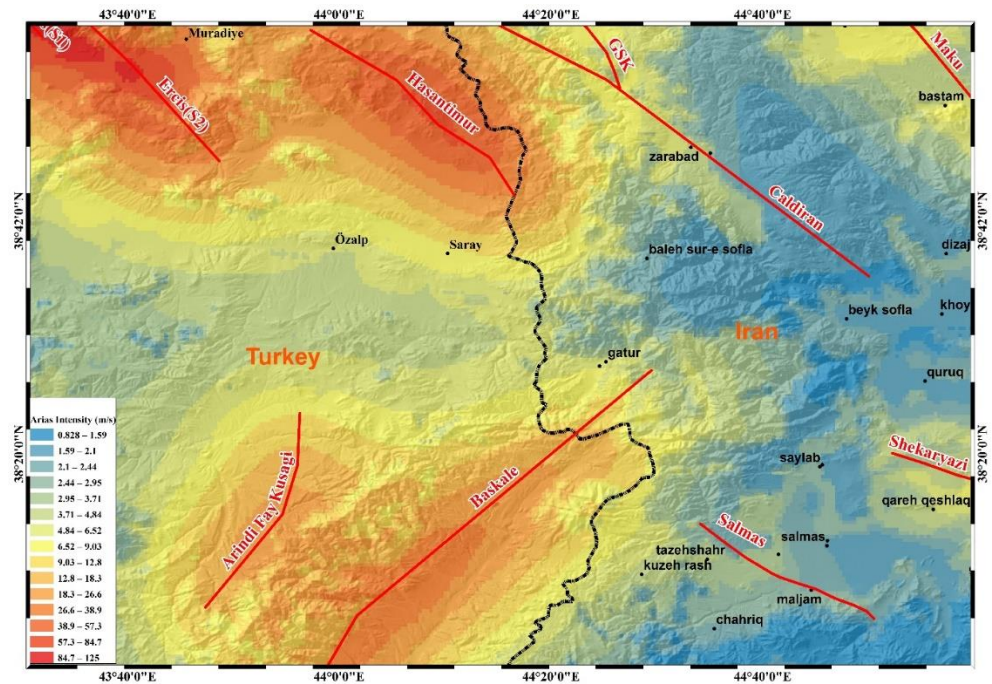
1-Zare, 1995; 2-Wells & Coppersmith, 1994; 3-Nowroozi, 1985; 4-Ambraseys & Jackson, 1998



شکل ۳: نقشه هم‌پتانسیل پراکنندگی شدت آریاس برای دوره بازگشت ۴۷۵ ساله (احتمال ۲۰٪ در ۱۰۰ سال)



شکل ۴: نقشه هم پتانسیل پراکندگی شدت آریاس برای دوره بازگشت ۹۷۵ ساله (احتمال ۱۰٪ در ۱۰۰ سال)



شکل ۵: نقشه هم پتانسیل پراکندگی شدت آریاس برای دوره بازگشت ۲۴۷۵ ساله (احتمال ۵٪ در ۱۰۰ سال)

بحث و بررسی

در این بررسی نقشه های هم پتانسیل شدت آریاس زمین لرزه برای دوره بازگشت های مختلف در گستره خوی آنالیز و ترسیم گردید. تا کنون چنین نقشه ای در این منطقه یا مناطق همجوار تهیه نشده است تا بتوان نتایج را با آن ها مطابقت داد. در واقع این اولین مطالعه در خصوص پارامتر شدت آریاس است. فارق از این مباحث فوق، بررسی اثر سرعت موج برشی خاک بر تعیین مقادیر عددی شدت آریاس نیز موضوع مهم دیگری است که در این تحقیق مورد

توجه قرار گرفت. در نقشه های هم پتانسیلی که برای برآورد پارامترهای شدت، شتاب، سرعت و ... صورت می گیرند، نتایج به صورت کانتورهای موازی هم دیده می شوند. بدین صورت که با دور شدن از چشمه های لرزه زا، مقادیر محاسباتی با یک نرخ مشخص، کاهش می یابند. با این حال، یافته های تحقیق حاضر چنین نیستند. به روشنی می توان دید که کاهش یا افزایش مقادیر سرعت موج برشی، سبب وجود به هم ریختگی در پراکندگی مقادیر شدت آریاس شده است. در واقع، نتایج تا حد بسیار مطلوبی با واقعیت زمین شناسی منطقه مطالعاتی (شرایط خاک)، مطابقت نشان می دهند. در واقع مناطقی با مقادیر بالای سرعت موج برشی (واحدهای سنگی) با نرخ بالاتری شدت زمین لرزه را کاهش می دهند. همچنین در مناطق دشت ها با سرعت موج برشی کم (که ضخامت آبرفت در آن زیاد است)، امواج زمین لرزه به دام افتاده و شدت آریاس افزایش می یابد. به عبارت دیگر مقادیر این متغیر تشدید می شوند. به عنوان نمونه می توان به مناطق شمالی و جنوب گسل شکریزی اشاره نمود. در مناطق نزدیک گسل، شدت آریاس در حدود ۱ متر بر ثانیه است (سرعت موج برشی ۷۰۰ متر بر ثانیه) و با دور شدن از گسل انتظار می رود این مقدار کاهش یابد. اما تا میزان ۲.۵ متر بر ثانیه در نزدیکی قره قشلاق (سرعت موج برشی ۲۴۰ متر بر ثانیه) افزایش می یابد و پس از آن روند دوباره کاهش می یابد. این مورد همخوانی بسیار خوبی با نقشه سرعت موج برشی از خود نشان می دهد و گویای تاثیر بسزای استفاده از آن در مطالعاتی از این دست است.

نتیجه گیری

نقشه هم شدت آریاس به عنوان یکی از مهمترین شاخص ها برای سنجش میزان تخریب زمین لرزه می تواند مورد استفاده قرار گیرد. در این مطالعه، برای سه دوره بازگشت اصلی و پرکاربرد، این نقشه ها مورد بررسی و تحلیل قرار گرفتند. به طور کلی مقادیر شدت زمین لرزه با دور شدن از چشمه های لرزه زا کاهش می یابد. اما این یک اصل ثابت نیست. پارامتر مهم دیگری به نام سرعت موج برشی می تواند تا حد بسیار زیادی، این الگو را به هم بریزد و یا حتی حالت عکس آن را به وجود آورد. در مناطق مختلفی نظیر اطراف گسل شکریزی این مورد مشاهده شد و تا حد مطلوبی اثر گذاری سرعت موج برشی بر پراکندگی شدت آریاس را نشان داد. نتایج این تحقیق می تواند اطلاعات مینا برای مطالعات روانگرایی و زمین لغزش این منطقه را تامین کند.

References

- Abrahamson, C., Shi, H.-J. M., and Yang, B., 2016, Ground-Motion Prediction Equations for Arias Intensity Consistent with the NGA-West2 Ground-Motion Models: PEER 2016/05.
- Allen, T. I., and Wald, D. J., 2007, Topographic Slope as a Proxy for Seismic Site-Conditions (VS30) and Amplification Around the Globe, 2007-1357.
- 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.
- Araya, R., and Saragoni, G. R., 1984, Earthquake accelerogram destructiveness potential factor: Proc. 8th WCEE, San Francisco, p. 835-842.
- Arias, A., 1970, A Measure of Earthquake Intensity, Proa, of the Conf. on Seismic Design of Nuclear Power Plants: Massachusetts Institute of Technology, p. 438-483.
- Barka, A., and Reilinger, R., 1997, Active Tectonics of Eastern Mediterranean region: deduced from GPS, neotectonic and seismicity data: *Annali Di Geofisica*, no. X2(3), p. 587-610.
- 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., 2014, Earthquake and Coseismic Surface Faulting on the Iranian Plateau; a Historical, Social, and Physical Approach, Elsevier, 770 p.:
- Borja, R., Duvernay, B., Duvernay, G., and Lin, C.-H., 2002, Ground Response in Lotung: Total Stress Analyses and Parametric Studies: *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering - J GEOTECH GEOENVIRON ENG*, v. 128.
- Bray, J., and Rodriguez-Marek, A., 1997, Geotechnical Site Categories, First PEER-PG&E Workshop on Seismic Reliability of Utility Lifelines: San Francisco, CA.
- Cabañas, L., Benito, B., and Herraiz, M., 1997, An approach to the measurement of the potential structural damage of earthquake ground motions: *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, v. 26, p. 79-92.
- Campbell, K., and Bozorgnia, Y., 2019, Ground Motion Models for the Horizontal Components of Arias Intensity (AI) and Cumulative Absolute Velocity (CAV) Using the NGA-West2 Database: *Earthquake Spectra*, v. 35.
- Campbell, K. W., and Bozorgnia, Y., 2012, A Comparison of Ground Motion Prediction Equations for Arias Intensity and Cumulative Absolute

- Velocity Developed Using a Consistent Database and Functional Form: *Earthquake Spectra*, v. 28, no. 3, p. 931-941.
- Chousianitis, K., Del Gaudio, V., Kalogeras, I., and Ganas, A., 2014, Predictive model of Arias intensity and Newmark displacement for regional scale evaluation of earthquake-induced landslide hazard in Greece: *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, v. 65, p. 11-29.
- Elnashai, A. M. R., and Sarno, L. D., 2004, *Earthquake Engineering: From Engineering Seismology to Performance-Based Engineering*, Edited by Y. Bozorgnia and V. V. Bertero, 2004, ICC-CRC Press, Boca Raton, Florida, USA, Hardcover, 1152 pages, Cost \$190 US: *Journal of Earthquake Engineering*, v. 8, no. 6, p. 963-964.
- Giardini, D., Woessner, J., Danciu, L., Crowley, H., Cotton, F., Grünthal, G., Pinho, R., Valensise, G., Akkar, S., Arvidsson, R., Basili, R., Cameelbeek, 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*.
- Gulen, L., Schweig, E., Williams, R., and K., G., 2011, Active fault database for the Middle East region; *Earthquake Model of the Middle East EMME Project*, v. 82.
- Harp, E. L., and Wilson, R. C., 1995, Shaking intensity thresholds for rock falls and slides: Evidence from 1987 Whittier Narrows and superstition hills earthquake strong-motion records: *Bulletin of the Seismological Society of America*, v. 85, no. 6, p. 1739–1757.
- Howell, B., 2003, Biographies of interest to earthquake and engineering seismologists, Academic Press., *International Handbook of Earthquake & Engineering Seismology*, 1761 p.:
- 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*.
- , 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., Polat, G., and Seifilaleh, S., 2022c, 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.
- Jarahi, H., Pourkermani, M., Akbarzadeh, R., and Farajpour, Z., 2022d, 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.
- Karakhianian, 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.
- Kayen, R., and Mitchell, J., 1997, Assessment of Liquefaction Potential during Earthquakes by Arias Intensity: Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, v. 123, p. 1162-1174.
- Khademi, M., 2002, Attenuation of peak and spectral accelerations in the Persian plateau, In: Proceedings of twelfth European conference on earthquake engineering, p. Paper reference 330.
- Lee, C.-T., Hsieh, P.-S., Sung, C.-H., and Lin, P.-S., 2015, Regional Arias intensity attenuation relationship for Taiwan: Bulletin of the Seismological Society of America, v. 102, no. 1, p. 129–142.
- Mamseyedeh, M., Akasheh, B., Pourkermani, M., Gheytauchi, M. R., Dorostian, A., and Jarahi, H., 2021, The first modified mercalli intensity map of Maku, NW Iran: Arabian Journal of Geosciences, p. 24.
- Mercalli, G., 1883, Vulcani e Fenomeni Vulcanici in Italia: Geologia d'Italia, Milan: Francesco Vallardi., v. 3, p. 217–218.
- Mercalli, G., 1902, Sulle modificazioni proposte alla scala sismica De Rossi-Forel: Boll Soc Sismol Ital, v. 8, p. 184–191.
- 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.
- Nayeri, A., Khademi, M., Haddadi, A., and Behnam, M., 1995, Seismotectonic Province of Iran: International Commite of Larg Dam, v. 1, no. 12, p. 25.
- Nazari, H., Talebian, M., Ghorashi, M., and Fathian, M. A., 2013, Seismotectonic Map of NW Iran: GSI.
- Paciello, A., Rinaldis, D., and Romeo, R., 2000, Incorporating ground motion parameters related to earthquake damage into seismic hazard analysis, Proceedings of the Sixth International Conference on Seismic Zonation: Managing Earthquake Risk in the 21st Century, Earthquake Engineering Research Institute, Oakland, CA.,
- Travasarou, T., and Bray, J., 2003, Optimal ground motion intensity measures for assessment of seismic slope displacements, Pacific Conference on Earthquake Engineering: Christchurch, New Zealand.
- Travasarou, T., Bray, J., and Abrahamson, N. A., 2003, Empirical attenuation relationship for Arias Intensity: Earthquake Engineering & Structural Dynamics, v. 32, p. 1133-1155.
- Wilson, R. C., and Keefer, D. K., 1985, Predicting areal limits of earthquake-induced landsliding: Geological Survey Professional Paper (United States), p. 317-345.