

بررسی اثرات آبگیری مخزن سد یامچی بر لرزه‌خیزی منطقه

حجت‌اله صفری*^۱، مریم آق‌آتابای^۲، علیرضا طبرسا^۳، حامد رضایی^۴، سعید گل‌مغانی ابراهیمی^۵

- ۱- دانشیار تکتونیک، گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه گلستان، گرگان، ایران.
- ۲- دانشیار تکتونیک، گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه گلستان، گرگان، ایران.
- ۳- استادیار ژئوتکنیک، گروه عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه گلستان، گرگان، ایران.
- ۴- استادیار زمین‌شناسی مهندسی، گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه گلستان، گرگان، ایران.
- ۵- دانشجوی دکتری عمران-ژئوتکنیک، شرکت آب منطقه‌ای اردبیل، اردبیل، ایران.

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۰۲/۰۴



تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۰۹/۰۶

چکیده

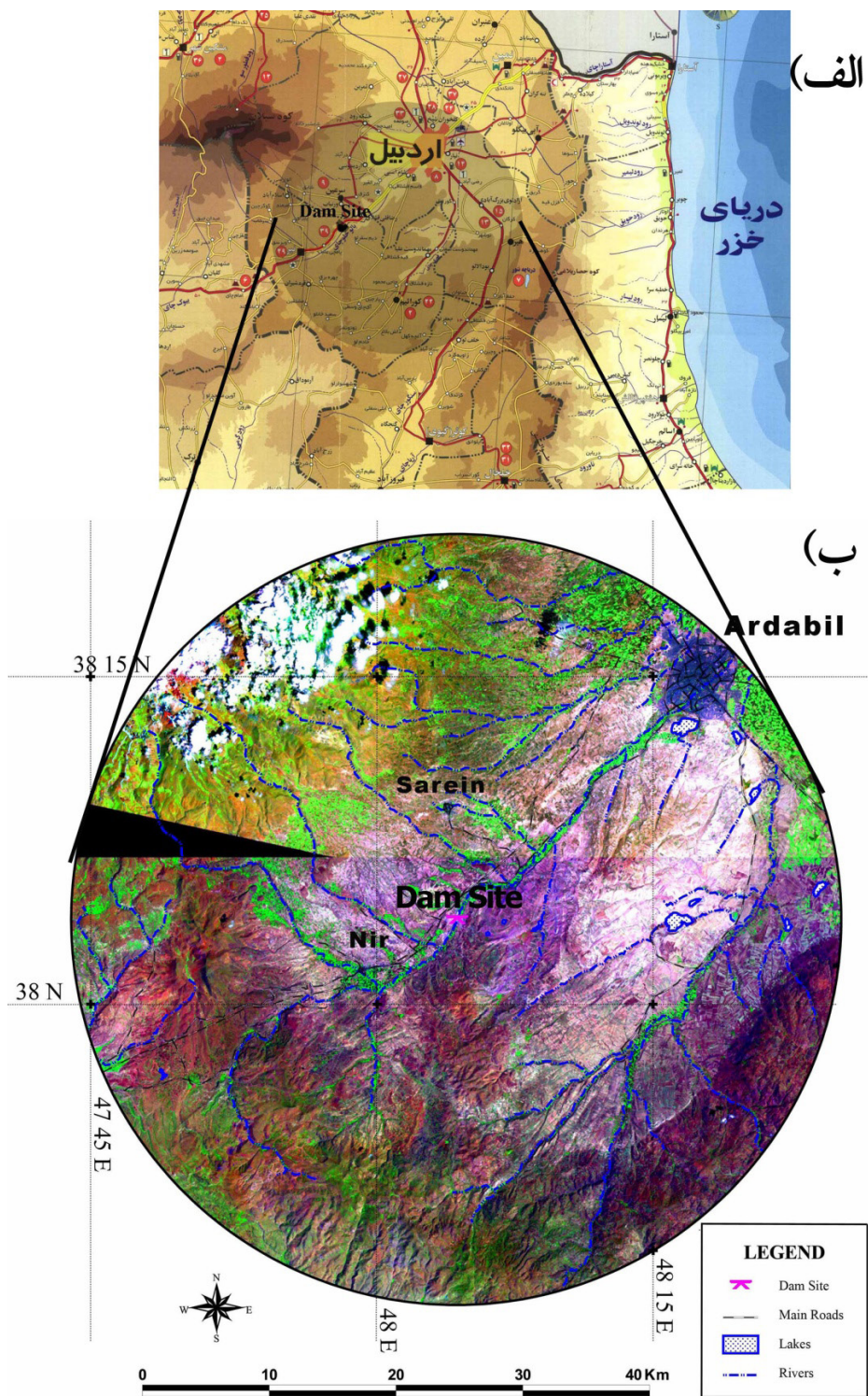
سد یامچی بر روی رودخانه بالخلی چای در سال ۱۳۸۳ (۲۰۰۵ میلادی) در جنوب اردبیل به بهره‌برداری رسید. جهت بررسی اثرات آبگیری این سد بر روی نرخ لرزه‌خیزی منطقه پیرامون و اثبات رخداد زلزله‌های القایی ناشی از آبگیری این سد، ابتدا ساختارهای منطقه استخراج و پیمایش گردیدند و در ادامه شواهد فعالیت‌های کواترنری و عهد حاضر آنها گردآوری شد. سپس با تکمیل کاتالوگ لرزه‌های منطقه، لرزه‌خیزی تاریخی و دستگاهی مورد بررسی قرار گرفت و در پایان با محاسبه بزرگی کمال، تغییرات پارامتر b ، نسبت به بررسی اثرات آبگیری بر الگوی لرزه‌خیزی منطقه اقدام گردید. نتایج نشان می‌دهد که دو گسل اصلی اردبیل و سرعین با فعالیت کواترنری و عهد حاضر در شعاع ۳۰ کیلومتری محل این سد قرار گرفته‌اند و عمده کانون‌های زلزله نیز در محل تقاطع پاره گسل جنوب اردبیل و بخش غربی گسل سرعین قرار گرفته‌اند. سوابق لرزه‌خیزی تاریخی و دستگاهی نیز مؤید رخداد زلزله‌هایی با بزرگای $M_s > 6/9$ در شعاع ۱۰۰ کیلومتری و زلزله $M_w = 6/1$ در فاصله کمی از سد می‌باشد. به این ترتیب می‌توان نتیجه گرفت که سد یامچی در منطقه‌ای احداث گردیده است که از نظر لرزه‌زمین‌ساختی دارای پتانسیل ایجاد زلزله‌های بزرگ می‌باشد. بررسی تأثیرات آبگیری بر روی لرزه‌خیزی در قالب تهیه نمودار تجمعی انرژی آزاد شده نسبت به تغییرات حجم مخزن سد، چهار بخش زمانی را آشکار ساخت. این مسئله در قالب تغییرات شیب خط نمودار تجمعی انرژی آزاد شده و تغییرات مقادیر پارامتر b قابل ردیابی است. دو بازه زمانی افزایش نرخ لرزه‌خیزی و کاهش مجدد آن مربوط به رخداد زلزله ۱۹۹۷ و پس از آن می‌باشد. با آبگیری سد یامچی در سال ۱۳۸۳، حجم فعالیت‌های لرزه‌ای افزایش یافته و این افزایش خود را به صورت افزایش مقدار b نشان می‌دهد. همچنین شیب خط نمودار تجمعی انرژی آزاد شده دوباره افزایش یافته است. بررسی این افزایش در نرخ لرزه‌خیزی حاکی از آن است که افزایش مقدار b نشان‌دهنده افزایش نسبت زمین‌لرزه‌های کوچک به بزرگ است. به این معنی که آبگیری سد باعث افزایش رویداد زمین‌لرزه‌های کوچک شده است. به این ترتیب ساخت سد یامچی سبب ایجاد زلزله‌های القایی دارای عمق کانونی کم با بزرگایی حدود $M = 4$ و در عمق کمتر از ۵ کیلومتر شده است. با توجه به نفوذناپذیر بودن سنگ کف در مخزن، احتمال نفوذ آب به اعماق و تحریک گسل‌ها و در نتیجه رخداد زلزله‌های ناشی از تحریک گسل به واسطه آبگیری منتفی می‌باشد.

کلیدواژه‌ها: سد یامچی، گسل‌های عهد حاضر، آبگیری سد، زلزله القایی، الگوی لرزه‌خیزی.

مناطقى که گسله‌های فعالی در مخزن، تکیه‌گاه و یا پیرامون سد (شعاع حداقل ۳۰ کیلومتری) قرار داشته باشند؛ آبیگری سدها علاوه بر بالا بردن فشار منفذی در توده‌های سنگی زیر مخزن و پیرامون، سبب روان کاری سطح گسل‌های فعال می‌شود. این پدیده سبب آزاد شدن انرژی پتانسیل ذخیره شده در سطح گسل‌ها شده (Shen & Chang, 1995) و به این ترتیب موجب تحریک گسل‌ها و به پیش انداختن زلزله‌های بزرگ در قالب زلزله‌های تحریک‌شده (RTS (Reservoir Triggered Seismicity خواهد شد. شاید بزرگ‌ترین زلزله ثبت شده در ارتباط با آبیگری سدها زلزله ۱۹۶۷ با بزرگای $M_s=6.3$ در سد کونیا در هند باشد (Gupta, 1992). بنا به دلایل بالا، علاوه بر دقت در مطالعات لرزه‌زمین‌ساختی قبل از احداث سد، می‌باید با نصب ابزار دقیق، نسبت به رفتارنگاری گسل‌های فعالی که در شعاع حداقل ۳۰ کیلومتری سد قرار گرفته‌اند و همچنین پایش الگوی لرزه‌خیزی پس از احداث سد (و همچنین زمان آبیگری و تخلیه سریع مخزن سد) و مقایسه آن با الگوی لرزه‌خیزی قبل از احداث، اقدام نمود.

در این پژوهش سد یامچی (از نوع سد خاکی غیرهمگن بوده با ارتفاع از پی ۶۷ متر، ۱۰ کیلومتر طول دریاچه و دارای حجم مفید ۸۰ میلیون متر مکعب) با مختصات جغرافیایی $38^{\circ} 01' 15/93''$ عرض شمالی و $48^{\circ} 04' 58/17''$ طول شرقی، واقع در جنوب شهرستان اردبیل (شکل ۱) که در ارتفاع ۱۵۸۰ متری از سطح دریا بر روی رودخانه بالخلی چای ساخته شده و در سال ۱۳۸۵ آبیگری شد (سازمان آب منطقه‌ای اردبیل، ۱۳۹۵) به عنوان مورد مطالعاتی انتخاب شد تا با بررسی مقایسه‌ای الگوی لرزه‌خیزی قبل و بعد از احداث سد، اثرات آبیگری و تخلیه مخزن سد یامچی بر لرزه‌خیزی منطقه بدست آمده و احتمال رخداد زلزله‌های القایی بررسی گردد.

علیرغم تمامی نکات مثبتی که ساخت سدهای بزرگ دارند؛ به‌واسطه این که باعث تجمع حجم زیادی آب در یک محیط کوچک (مخزن سد) می‌شوند، می‌توانند باعث بروز اثرات زیست محیطی مخربی نظیر ایجاد زلزله‌های القایی (In-duced Earthquakes) شوند (Segall, 1989). پر و خالی شدن سدها (به‌خصوص آبیگری سریع) به‌واسطه تغییر ناگهانی در الگوی تعادل ایزوستاتیکی در مخزن و جناحین سد، سبب بروز زلزله‌های القایی نوع (Reservoir Induced Seismicity) می‌شود. شایان توجه است که این تیپ زلزله‌ها معمولاً در سدهای بزرگ ذخیره‌ای با ارتفاع آب بیش از ۱۰۰ متر رخ می‌دهند (Dojinovski et al., 2014; Do Nascimento et al., 2004; Gupta, 2002; Gupta, 1976). هر چند که در بیشتر موارد این زلزله‌ها در سدهایی با حجم ذخیره بالا (بیش از ده کیلومتر مکعب) رخ داده‌اند (Chen & Tal-wani, 1998). تاتار و همکاران (۱۳۹۰) اعتقاد دارند که احتمال رخداد این زلزله‌ها در سدهایی با ارتفاع بیش از ۱۰۰ متر و حجم مخزن بیش از ۱۰۰ میلیون متر مکعب بیشتر است. آهنگ افزایش تراز آب سد دریاچه، مدت بارگذاری، بالاترین سطحی که آب به آن رسیده است و مدت زمانی که در آن سطح آب در بالاترین وضع خود قرار داشته است و همچنین لرزه‌خیزی پایه منطقه از عوامل مؤثر بر فرکانس رخداد زمین‌لرزه‌های القایی هستند (تاتار و همکاران ۱۳۹۲). پر و خالی شدن سدها، همچنین، به‌واسطه تغییر ناگهانی در الگوی ایزوستاتیکی در مخزن (و حتی نواحی پیرامون)، سبب تغییر در نرخ و الگوی آزاد شدن انرژی شده و به‌همین خاطر سبب افزایش لرزه‌خیزی در یک منطقه و یا کاهش لرزه‌خیزی در منطقه‌ای دیگر خواهند شد (حافظی مقدس و عسکری، ۱۳۸۴). در بسیاری از موارد، در

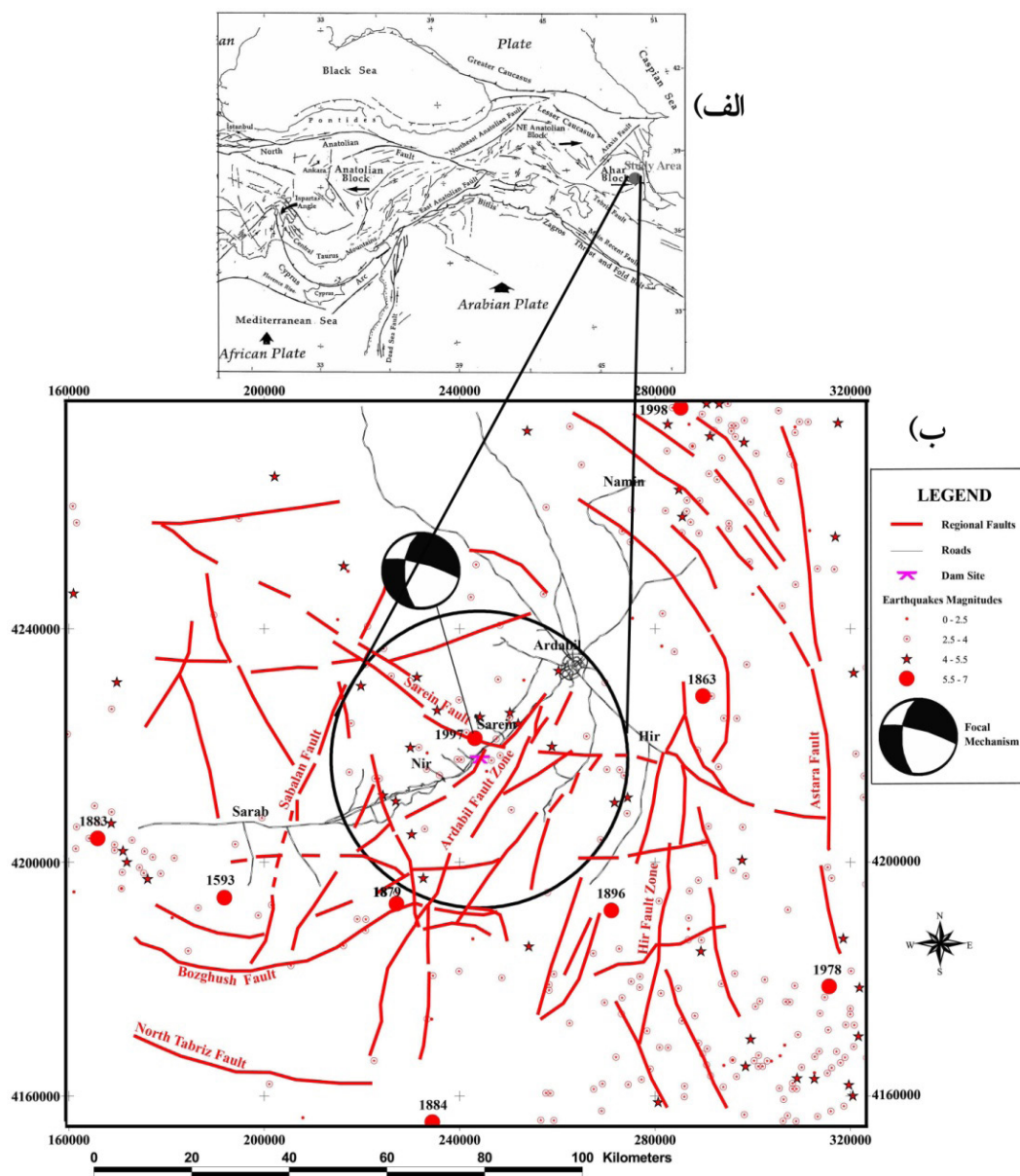


شکل ۱: الف- موقعیت جغرافیایی، ب- تصویر ماهواره‌ای منطقه مورد مطالعه (شعاع ۳۰ کیلومتر از محل سد یامچی)

۲- زمین شناسی عمومی و ساختاری منطقه

به اروسیا و همچنین حرکت بلوک آناتولی می باشد. علاوه بر این مسائل، باید حرکت رو به جنوب غرب پوسته اقیانوسی کف دریای خزر را نیز به افزایش این پیچیدگی ها اضافه نمود. به همین دلیل مکانیسم حرکتی گسل ها در این منطقه تابعی از حرکت اجباری رو به شرق بلوک اهر می باشد. به طوری که مکانیسم حرکتی گسل ها با مکانیسم گسل های هم روند در سایر مناطق ایران کاملاً متفاوت است (صفری و همکاران، ۱۳۹۸) (شکل ۲).

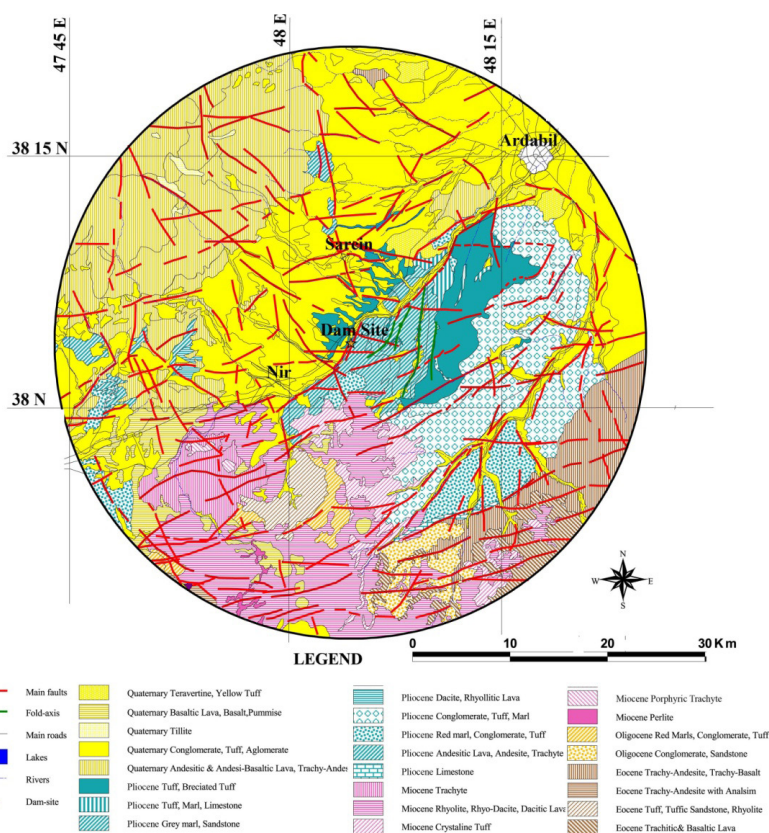
از نظر زمین ساختی، منطقه مورد بررسی در بلوک اهر (Baraka, 1992) در منتهی الیه شمال- شمال غربی ایران قرار گرفته و یکی از پیچیده ترین زون های ساختاری در ایران می باشد. به گونه ای که هر بخش از این بلوک غلبه یک روند ساختاری را به نمایش می گذارند. کنترل بردارهای حرکتی در منطقه و ناحیه پیرامون نشان می دهد که این منطقه رو به شرق حرکت می کند و این ناشی از فشرده شدن از جنوب به خاطر برخورد صفحه عربی



شکل ۲: الف- نقشه زمین ساختی ناحیه ای (Baraka, 1992 با اصلاحات)، ب- نقشه لرزه زمین ساختی ناحیه ای (منطقه مورد بررسی، شعاع ۳۰ کیلومتر از محل سد یامچی، به صورت دایره مشخص گردیده است).

(بخصوص فعالیت آتشفشان سبلان) با ترکیب گدازه و توف‌های تراکیتی، بازالتی و داسیتی به سن‌های الیگوسن تا پلیوسن قابل مشاهده است. در نهایت، واحدهای سنگی آذر-آواری مربوط به فعالیت کواترنری آتشفشان سبلان در یک محیط خشکی و نهشته‌های به نسبت سخت‌شده تا منفصل آبرفتی و کوهرفتی (مربوط به کواترنر و عهدحاضر) را مشاهده نمود (صفری و همکاران، ۱۳۹۸). در محل ساختگاه سد و مخزن، توفها، مارن‌ها و کنگلومراهای پلیوسن دیده می‌شوند (شکل ۳).

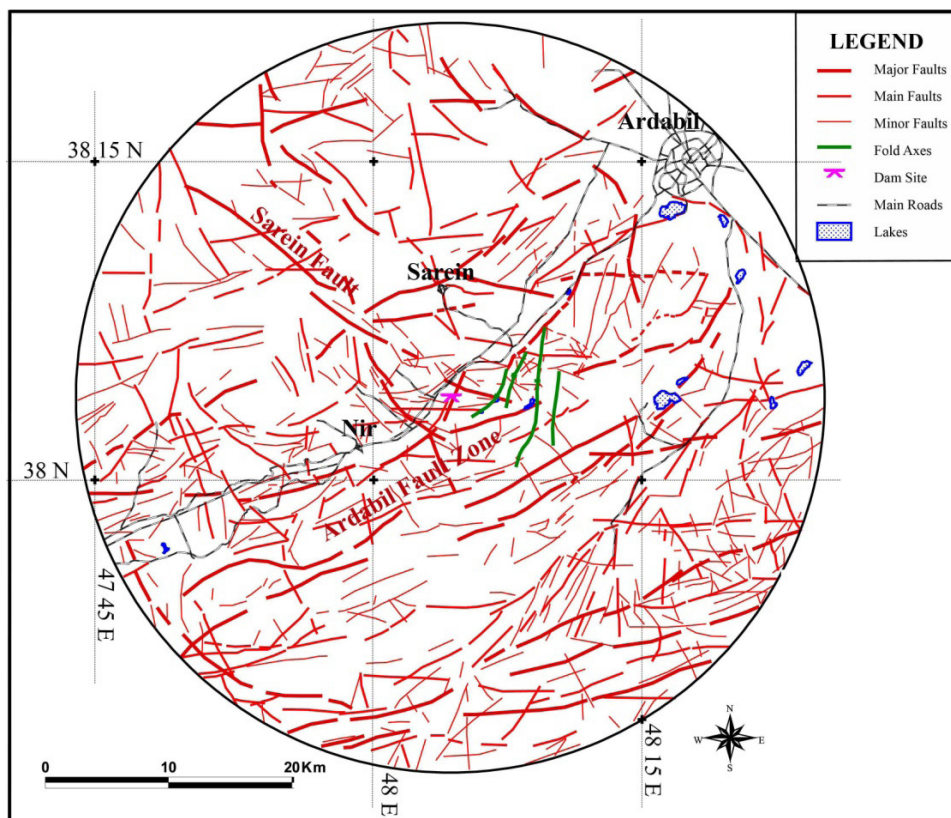
قدیمی‌ترین رخنمون‌های سنگی متعلق به ائوسن می‌باشند هر چند که رخنمون بسیار کوچکی از ماسه‌سنگهای سازند لالون به سن کامبرین در جنوب غربی منطقه قابل مشاهده است (صفری و همکاران، ۱۳۹۸). رخنمون‌های سنگی ائوسن از تنوع به نسبت بالایی از سکانس‌های سنگی می‌باشند که بخش عمده آن را سنگ‌های آتشفشانی و آذر-آواری حاصل از فعالیت‌های آتشفشانی این زمان تشکیل داده است. بر روی این توالی‌های نسبتاً محدود سنگی، سنگ‌های آذر-آواری حاصل از فعالیت آتشفشانی



شکل ۳: نقشه زمین‌شناسی منطقه مورد مطالعه (نقشه‌های زمین‌شناسی ۱/۱۰۰۰۰۰ سازمان زمین‌شناسی با اصلاحات عمده حاصل از پیمایش‌های صحرایی).

زون گسلسی با عرض ۲/۵ کیلومتر، امتداد E130-120N و مکانیسم حرکتی راستالغز راست‌بر با مقداری مؤلفه معکوس از سه کیلومتری شمال محل سد یامچی عبور می‌نماید. ج- پاره گسل شرقی گسل سرعین با طول ۳۵ کیلومتر، زون گسلسی با عرض ۱/۲۵ کیلومتر، امتداد شرقی- غربی (E-W) و مکانیسم حرکتی معکوس با مقداری مؤلفه راستالغز راست‌بر از ۳ کیلومتری شمال سد یامچی عبور می‌نماید.

در شعاع ۳۰ کیلومتری از محل سد، دو گسل اصلی جنوب اردبیل و گسل سرعین قرار گرفته‌اند (شکل ۴) که مشخصات این گسل‌ها عبارتند از (صفری و همکاران، ۱۳۹۸): الف- پاره گسل جنوب اردبیل با طول ۴۲ کیلومتر، عرض زون گسلسی ۵ کیلومتر، امتداد N30E و مکانیسم حرکتی راستالغز چپ‌بر با کمی مؤلفه نرمال، از محل سایت سد یامچی عبور می‌نماید. ب- پاره گسل غربی گسل سرعین با طول ۴۵ کیلومتر و

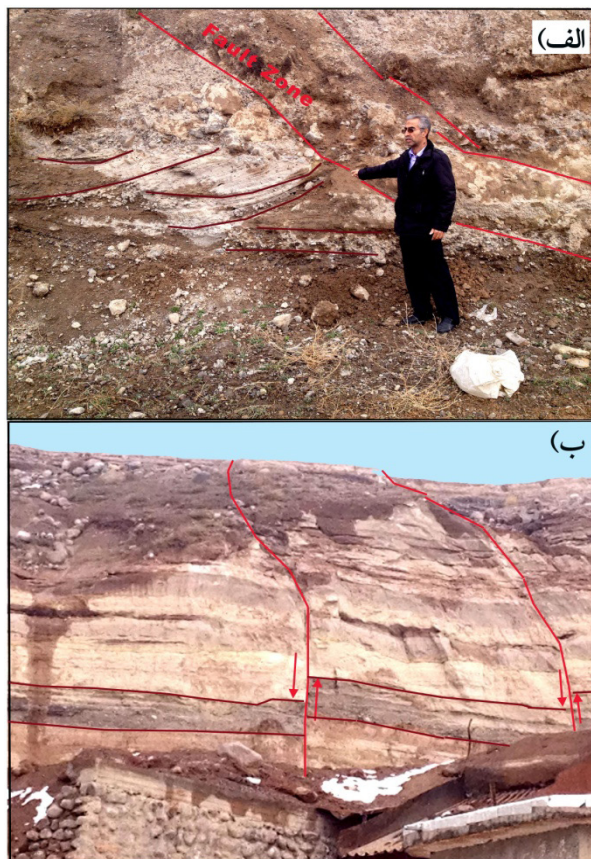


شکل ۴: نقشه ساختاری منطقه مورد مطالعه

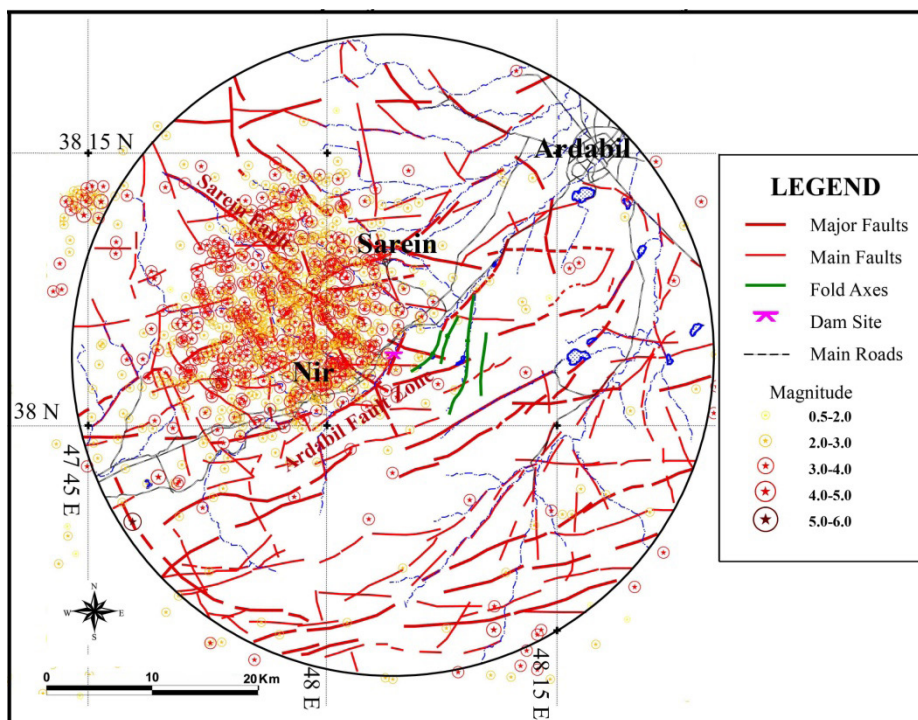
۳- لرزه زمین ساخت منطقه

(جدول پیوست) که سبب ایجاد گسلش در نهشته‌های کواترنری و یا عهد حاضر شده و تلفات جانی و خسارات بسیاری در این محدوده ایجاد نموده‌اند (شکل ۲-ب). بررسی‌های لرزه‌خیزی دستگاهی نیز مشخص نمود (شکل ۶) که ۳ زلزله با بزرگای $6/4 - 6/10$ (زلزله $1978/11/4$ با بزرگای $M_w = 6,4$ در عمق ۲۶ کیلومتری و در فاصله حدود ۸۵ کیلومتری، زلزله $1997/2/28$ با بزرگای $M_w = 6,1$ در عمق ۱۲ کیلومتری و در فاصله حدود $4/5$ کیلومتری و زلزله $1998/7/9$ با بزرگای $M_w = 6,0$ در عمق ۲۹ و در فاصله حدود ۸۴ کیلومتری) و انبوهی از زلزله‌های کوچک‌تر در محدوده ۱۰۰ کیلومتری سد یامچی رخ داده‌اند. بررسی وضعیت عمق کانونی زلزله‌ها نیز نشان می‌دهد که عمده زلزله‌ها در اعماق ۲۰-۵ کیلومتر (به‌خصوص ۲۰-۱۰ کیلومتر) رخ داده‌اند. تعداد ۹۰ زلزله نیز در عمقی کمتر از ۵ کیلومتر ($15/4\%$) رخ داده‌اند که بزرگای این زلزله‌ها عمدتاً کمتر از ۴ می‌باشند. شایان توجه است که زلزله‌هایی با بزرگای بیش از $M > 4/5$ در اعماق بیش از ۱۵ کیلومتر رخ داده‌اند.

بررسی لرزه‌زمین ساخت منطقه‌ای و کنترل وضعیت موقعیت کانونی زلزله‌ها، حداقل دو منشأ خطی لرزه‌خیز (Linear Source) با امتدادهای $N170-180$ (مربوط به فعالیت گسل‌های آستارا و هیر) و $N25-35$ (مربوط به فعالیت گسل اردبیل) را آشکار ساخت که اثر بارز فعالیت‌های پاره گسل اردبیل و پاره گسل‌های سرعین را آشکار می‌سازد (شکل ۲ب). شواهد صحرائی در طول این گسل‌ها، نشان از وجود حرکات کواترنری و عهد حاضر (به‌خصوص در محدوده سرعین- جوراب- گلستان) دارد (شکل ۵). این بخش‌ها در طی دهه اخیر بارها متحمل زلزله‌های با بزرگای نسبتاً کم شده‌اند. این احتمال وجود دارد که زلزله 1997 با بزرگای $M_w = 6,1$ بر روی این گسل (یا محل تقاطع آن با پاره گسل جنوب اردبیل) رخ داده باشد. بررسی زلزله‌های تاریخی در شعاع ۱۰۰ کیلومتری از سد یامچی (برگرفته از مؤسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران و مؤسسه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله)، نشان می‌دهد که حداقل ۶ زمین‌لرزه تاریخی با بزرگای $Ms > 6/9$ رخ داده‌اند



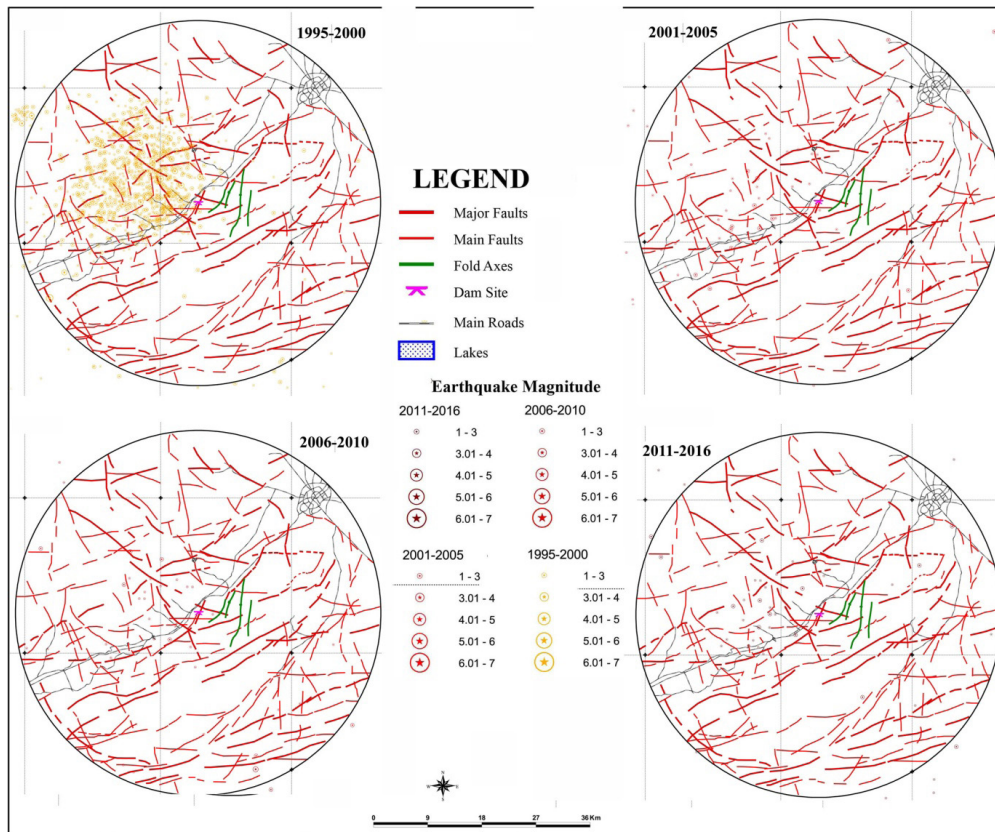
شکل ۵: نماهایی از اثرات گسلش عهد حاضر (در پهنه گسل اردبیل) پیرامون سد یامچی؛ الف- روستای جوراب، ب- روستای گلستان



شکل ۶: نقشه لرزه‌زمین‌ساختی منطقه مورد بررسی

کنترل زیربخش‌های ۵ ساله زمانی از زلزله‌های ۲۰۱۶-۱۹۹۵، حاکی از آن است که بیشترین تراکم کانون‌های زلزله مربوط به محدوده زمانی ۲۰۰۰-۱۹۹۵ در محل تقاطع پاره گسل جنوب اردبیل و پاره غربی گسل سرعین است. بررسی دقیق‌تر زمان رخدادها نشان می‌دهد که قبل از زلزله

نرخ لرزه‌خیزی بالا رفته (به صورت پیش‌لرزه) و سپس شوک اصلی رخ داده است. پس از رخداد اصلی، انبوهی از خردلرزه‌ها در بخش یاد شده به وقوع پیوسته‌اند (شکل ۷).



شکل ۷: نقشه لرزه‌زمین‌ساختی منطقه مورد مطالعه بر اساس زلزله‌ها در محدوده سال‌های (۱۹۹۵-۲۰۰۰، ۲۰۰۱-۲۰۰۵، ۲۰۰۶-۲۰۱۰ و ۲۰۱۱-۲۰۱۶) با بزرگای $M > 0.5$

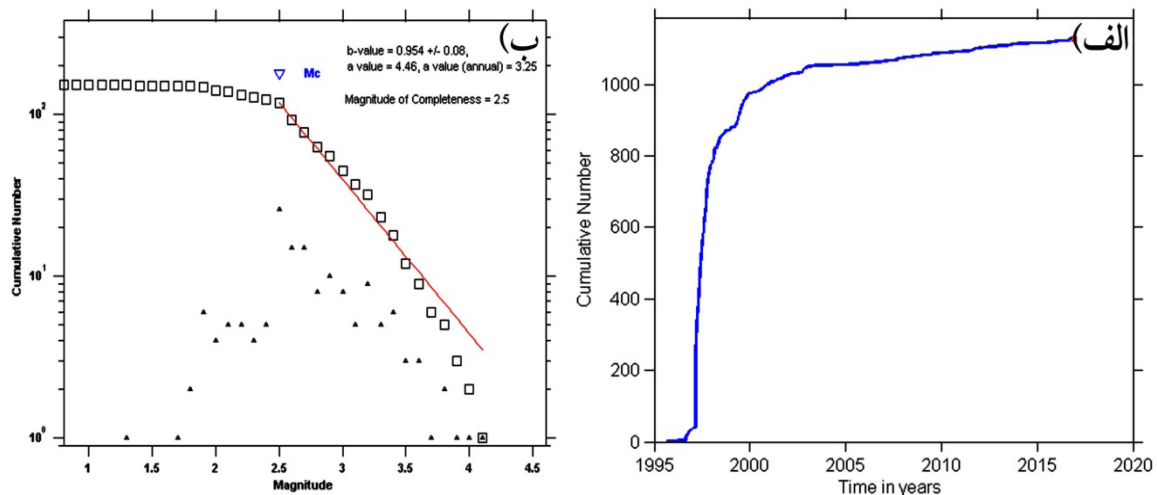
اواسط ۲۰۱۷ نشان داده شده است. با توجه به نمودار، بیش از ۱۱۰۰ زمین‌لرزه کوچک و بزرگ در منطقه روی داده است که اکثر آن مربوط به پس‌لرزه‌های زمین‌لرزه ۱۳۷۵ (۱۹۹۷) سرعین با بزرگی $M_w = 6.1$ است.

ب- محاسبه بزرگی کمال: برای بررسی اثر سد بر روی لرزه‌خیزی منطقه لازم است این زمین‌لرزه و تمام پس‌لرزه‌های آن از داده‌ها حذف گردد. از طرفی، به منظور اطمینان از کامل بودن داده‌ها، بزرگی کمال (M_c) با استفاده از نمودار فراوانی-بزرگی رابطه گوتنبرگ-ریشر (۱۹۵۴) محاسبه گردید:

$$\log_{10} N = a - bM$$

۴- بررسی اثرات آبخیزی و تخلیه مخزن سد یامچی بر لرزه‌خیزی منطقه

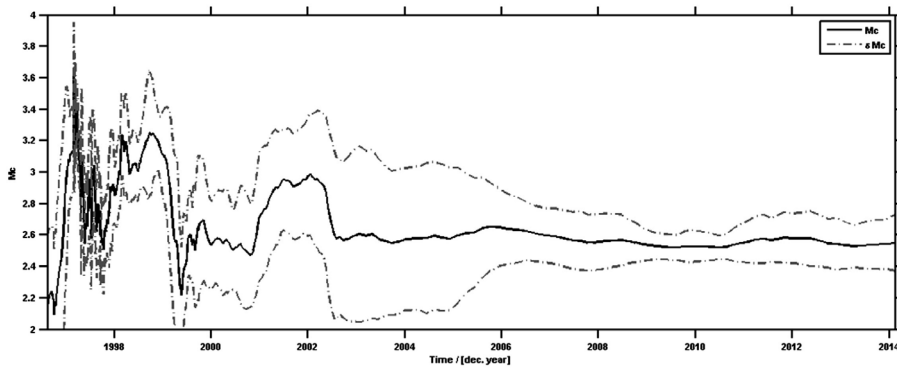
الف- آماده‌سازی داده‌ها: داده‌های زمین‌لرزه‌های منطقه مورد مطالعه از سایت مرکز لرزه‌نگاری کشور وابسته به مؤسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران اخذ شد. با توجه به این که این پایگاه در سال ۱۹۹۶ میلادی راه‌اندازی شده است، بازه زمانی داده‌های برداشت شده از این سال تا زمان انجام تجزیه و تحلیل‌ها (اواسط ۲۰۱۷) می‌باشد. محدوده مکانی داده‌ها محدوده‌ای به شعاع ۳۰ کیلومتر و به مرکزیت موقعیت سد یامچی می‌باشد. در شکل ۸-الف نمودار تعداد تجمعی زمین‌لرزه‌های منطقه مطالعه شده در بازه زمانی ۱۹۹۶ تا



شکل ۸الف- نمودار تعداد تجمعی زمین لرزه‌های محدوده سد یامچی تا شعاع ۳۰ کیلومتر،
ب- نمودار فراوانی بزرگی زمین لرزه‌ها

گزارش نشده است و باید از کاتالوگ لرزه‌ای حذف گردند تا الگوی صحیحی از لرزه‌خیزی منطقه استخراج شود. به دلیل پیشرفت کیفیت و کمیت دستگاه‌ها و ایستگاه‌های لرزه‌نگاری با گذشت زمان، M_c در طول زمان تغییر می‌کند. بنابراین برای برآورد بهتر این پارامتر، نمودار تغییرات آن در زمان ترسیم شد (شکل ۹). برای ترسیم این نمودار پنجره زمانی شامل ۳۰ زمین لرزه با گام یک داده انتخاب شد. این نمودار نشان می‌دهد که تا اواسط سال ۲۰۰۲ میلادی افت و خیز در بزرگی کمال بسیار زیاد است. مقدار زیاد بزرگی کمال در اوایل دوره به دلیل تعداد کمتر ایستگاه‌های برداشت داده است. ولی در مجموع بعد از اواسط سال ۲۰۰۲ میلادی مقدار بزرگی کمال بین بزرگی‌های ۲/۵ تا ۲/۶ دارای ثبات نسبی است. به این معنی که زمین لرزه‌های کوچک‌تر از ۲/۶ به‌طور کامل ثبت نشده و استفاده از این داده‌ها باعث بروز الگوی کاذب لرزه‌خیزی خواهد شد. برای بررسی اثر ساخت و آبگیری سد یامچی قسمت با ثبات کاتالوگ لرزه‌ای یعنی داده‌ها از ابتدای سال ۲۰۰۲ میلادی تا اواسط ۲۰۱۷ انتخاب گردید.

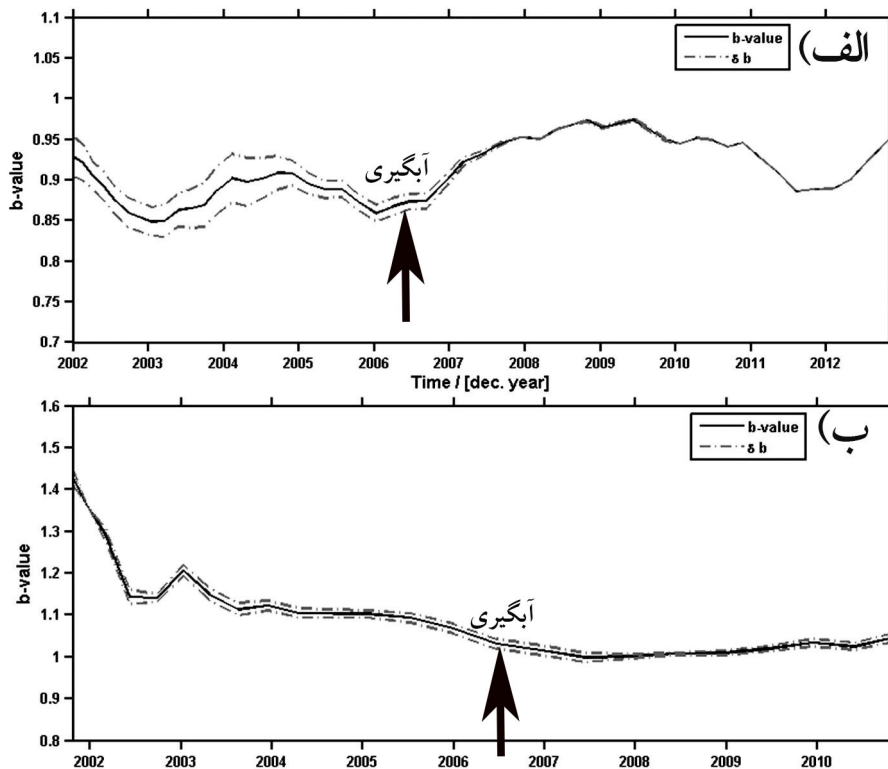
که در آن N تعداد زمین لرزه‌های با بزرگی M ، a و b ضرایب ثابت معروف به متغیرهای لرزه‌خیزی هستند. a شاخص سطح فعالیت لرزه‌خیزی محسوب می‌شود، بنابراین تابعی از تعداد زمین لرزه‌های رویداده در منطقه است و ثابت b که با عنوان b -value شناخته می‌شود، پراکندگی نسبی رویداد زمین لرزه‌های کوچک و بزرگ نسبت به یکدیگر را نشان می‌دهد (Singh, 2012). b -value یکی از مهم‌ترین پارامترهای ارزیابی خطر زمین لرزه و از اولین پارامترهای آماری مطالعات لرزه‌خیزی می‌باشد. در این تحقیق بزرگی کمال از روش انحنای حداکثر (Maximum curvature method) به‌دست آمد. در این روش نقطه انحنای حداکثر از منحنی توزیع فراوانی- بزرگی غیر تجمعی انتخاب می‌شود (Wiemer, 2001). تغییر در شیب نمودار فراوانی- بزرگی بیان‌کننده مقدار بزرگی کمال است که دلیل آن کامل نبودن مقادیر کوچک‌تر از آن در مجموعه داده‌ها است (Wiemer & Wyss, 2000). شکل ۸-ب نمودار فراوانی بزرگی زمین لرزه‌های منطقه نشان داده شده است. با توجه به این شکل، زمین لرزه‌های کوچک‌تر از ۲/۵ به‌طور کامل



شکل ۹: نمودار تغییرات بزرگی کمال با زمان

رویداد زمین‌لرزه‌های کوچک شده است. برای بررسی این موضوع، داده‌های کوچک‌تر از ۳ (ریشتر) از کاتالوگ لرزه‌ای حذف و یک بار دیگر نمودار تغییرات b با زمان برای داده‌های بزرگ‌تر و مساوی ۳ ترسیم شد (شکل ۱۰-ب). همان‌طور که در نمودار شکل ۱۰-ب مشاهده می‌شود، پارامتر b محاسبه شده برای این داده‌ها، نه تنها با شروع به فعالیت و آنگیری سد افزایش نیافته بلکه مقدار خیلی کمی کاهش نیز پیدا کرده است.

ج- محاسبه تغییرات پارامتر b : برای بررسی الگوی تغییرات لرزه‌خیزی در زمان نمودار تغییرات پارامتر b نسبت به زمان ترسیم شد (شکل ۱۰-الف). این نمودار نشان می‌دهد که تا زمان آنگیری سد یامچی در اواخر سال ۲۰۰۶ (مهر ۱۳۸۵)، مقدار پارامتر b کمتر از ۰/۹ بوده ولی با شروع آنگیری سد، به تدریج افزایش پیدا کرده است. افزایش مقدار b نشان دهنده افزایش نسبت زمین‌لرزه‌های کوچک به بزرگ است. به این معنی که آنگیری سد باعث افزایش

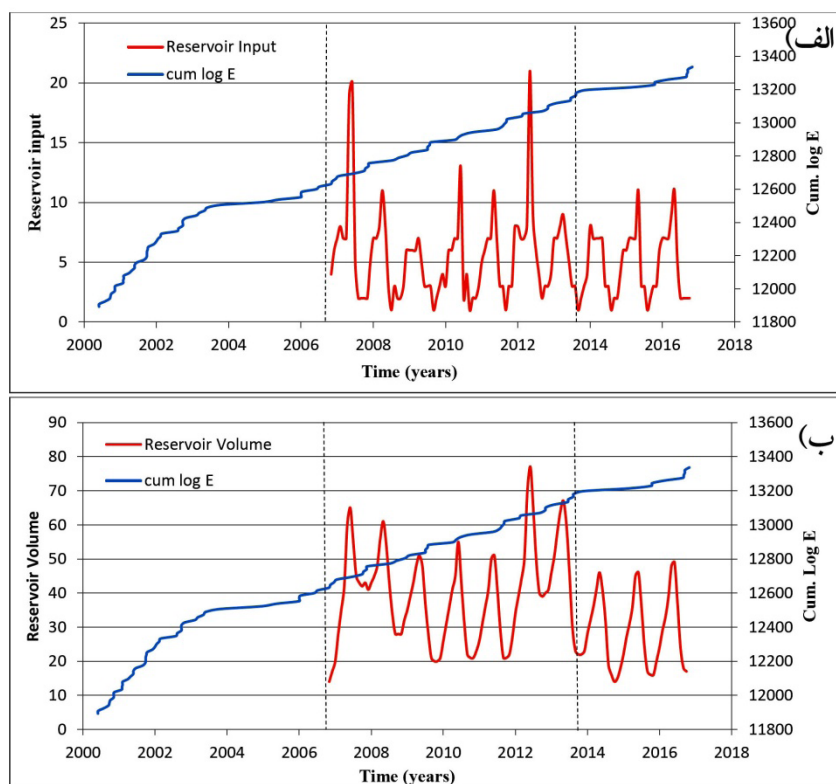


شکل ۱۰: نمودار تغییرات پارامتر b با زمان الف) برای زمین‌لرزه‌های بزرگ‌تر و مساوی ۲/۶ و ب) برای زمین‌لرزه‌های بزرگ‌تر و مساوی ۳

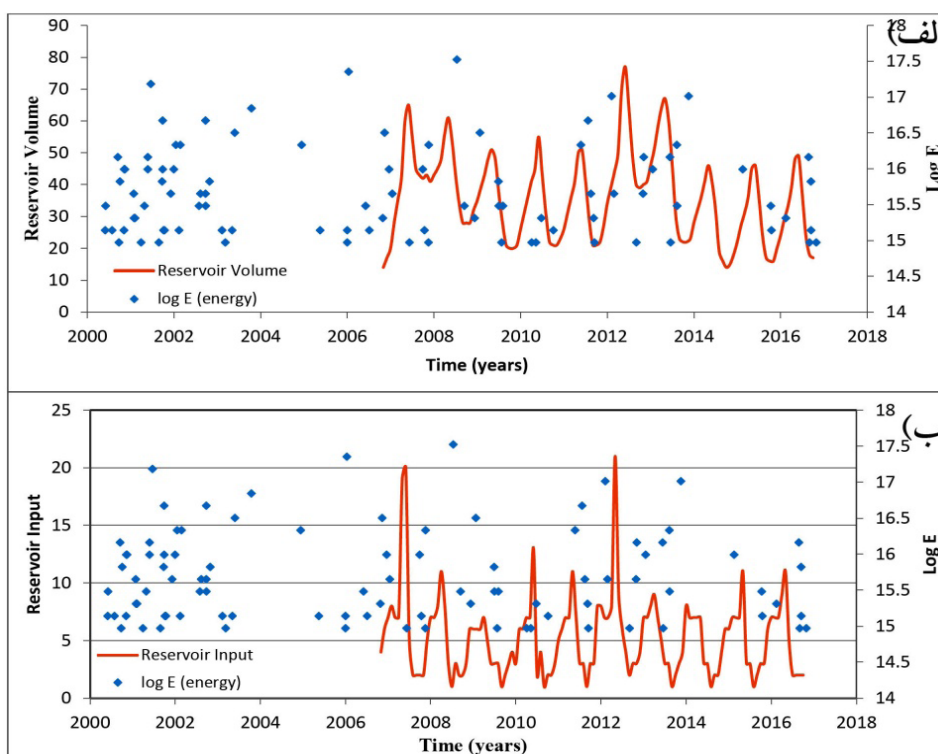
آبیگری سد تا اواخر ۲۰۱۳ که بین دو خط چین مشخص شده، همزمان با احداث و شروع به آبیگری سد یامچی است که در آن شیب نمودار تجمعی انرژی دوباره افزایش پیدا کرده که حاکی از افزایش لرزه‌خیزی در این بازه زمانی است. در این دوره، حجم و ورودی مخزن بالاترین مقادیر را از زمان شروع به کار سد تا کنون داشته است. بخش آخر (بخش چهارم) نمودار که در آن دوباره شیب نمودار تجمعی انرژی حالت نسبتاً افقی به خود گرفته، مصادف است با زمانی که حجم مخزن در پایین‌ترین حد خود قرار داشته است. با بررسی دو بخش آخر این نمودار در شکل‌های ۱۲ و ۱۳، مشخص می‌شود که در چند سال اخیر (دوره خشکسالی با کم‌ترین حجم مخزن و ورودی) نه تنها تعداد زمین‌لرزه‌های رویداده کمتر از دوره قبل‌تر است بلکه از نظر بزرگی نیز زمین‌لرزه‌های کوچک‌تر از دوره قبل روی داده است. این موضوع نشان می‌دهد در صورتی که سطح آب مخزن بالا رود می‌تواند موجب تحریک زمین‌لرزه‌های کوچک و متوسط شود.

د- بررسی تأثیرات آبیگری بر روی لرزه‌خیزی:

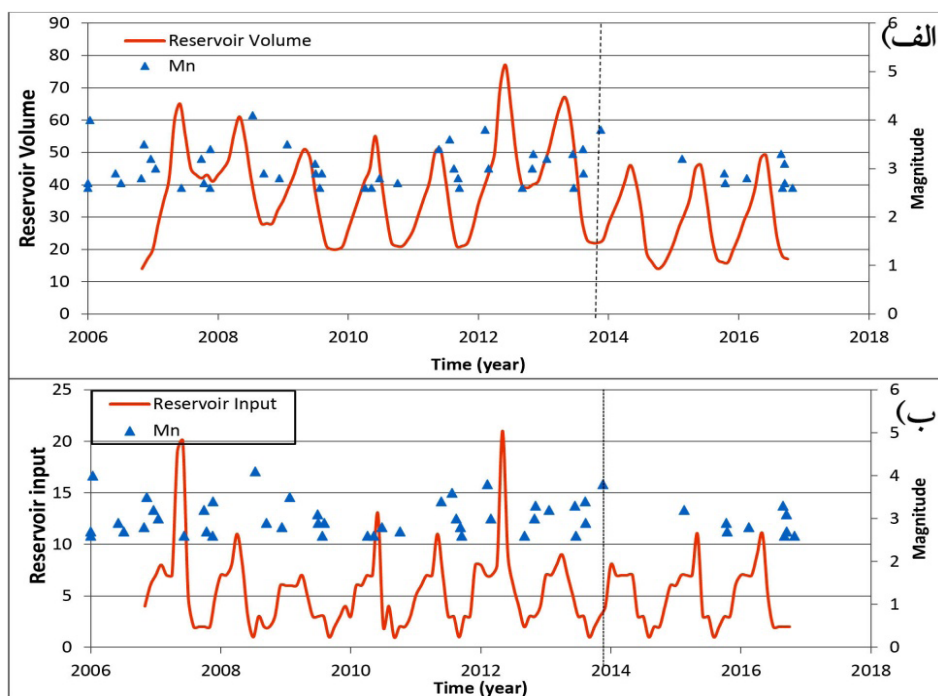
به منظور بررسی تأثیر آبیگری سد و پر خالی شدن سد بر روی لرزه‌خیزی منطقه مورد بررسی، نمودارهای حجم مخزن و ورودی به مخزن در برابر زمان و انرژی آزاد شده (به صورت لگاریتم) به صورت تجمعی و غیر تجمعی بر روی همان نمودار ترسیم شد (اشکال ۱۱ و ۱۲). همچنین نمودارهای حجم مخزن و ورودی به مخزن در کنار بزرگی زمین‌لرزه‌های رخ داده نیز ترسیم شد (شکل ۱۳). نمودار تجمعی انرژی آزاد شده (شکل ۱۱) را می‌توان به چهار بخش تقسیم نمود. بخش اول (۲۰۰۰ تا اواسط ۲۰۰۳) که بسیار پرشیب بوده و نشان‌دهنده رویداد تعداد زیادی زمین‌لرزه با بزرگی کوچک و متوسط است. با توجه به رویداد زمین‌لرزه بزرگ سرعین در سال ۱۹۹۷، این بخش از نمودار را می‌توان مرتبط به حوادث پس‌لرزه‌ای در منطقه دانست. بخش بعدی (بخش دوم) نمودار وضعیت تقریباً آرام لرزه‌ای را نشان می‌دهد که بر روی شکل ۱۳ نیز مشخص است. بخش سوم نمودار (از زمان شروع



شکل ۱۱: نمودار تجمعی لگاریتم انرژی زمین‌لرزه‌ها بزرگتر و مساوی ۲/۶ در حوالی سد یامچی به همراه (الف) ورودی مخزن سد و (ب) حجم مخزن



شکل ۱۲: نمودار غیر تجمعی لگاریتم انرژی زمین لرزه‌ها بزرگ‌تر و مساوی ۲/۶ در حوالی سد یامچی به همراه الف) ورودی مخزن سد و ب) حجم مخزن



شکل ۱۳: نمودار بزرگی زمین لرزه‌ها بزرگ‌تر و مساوی ۲/۶ در حوالی سد یامچی به همراه الف) حجم مخزن و ب) ورودی مخزن سد

۵- بحث و نتیجه‌گیری

سد یامچی با هدف تأمین آب شرب اردبیل و مصارف کشاورزی در ۲۰ کیلومتری جنوب غرب شهرستان اردبیل با مختصات جغرافیایی ۳۸°۱۵′۱۵″ عرض شمالی و ۴۸°۰۴′۵۸″ طول شرقی و در ارتفاع ۱۵۸۰ متری از سطح دریا بر روی رودخانه بالخلی چای در سال ۱۳۸۳ (۲۰۰۵ میلادی) به بهره‌برداری رسید. قبل از ساخت این سد، زلزله ۱۹۹۷/۲/۲۸ (معادل ۱۳۷۵/۱۲/۱۰) با بزرگای $M_w = 6.1$ و در فاصله حدود ۴/۵ کیلومتری شمال غرب منطقه رخ داد. این زلزله سبب کشته شدن بیش از ۹۶۵ نفر و مجروح شدن بیش از ۲۰۰۰ نفر گردید. عمده کانون‌های زلزله در منطقه مربوط به محل تقاطع پاره گسل جنوب اردبیل و بخش غربی گسل سرعین بوده که از نظر جغرافیایی در حدفاصل سرعین - روستای گلستان - سد یامچی قرار می‌گیرند. پس از زلزله مذکور تا سال ۲۰۰۳ دائماً پس لرزه‌ها ادامه داشت و سپس منطقه به سمت تعادل و کم شدن فعالیت‌های لرزه‌ای پیش رفته است. با احداث سد یامچی و آبیگری آن در سال ۱۳۸۵ (۲۰۰۶)، مجدداً نرخ فعالیت‌های لرزه‌ای بالا رفته است. نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که چندین گسل اصلی در شعاع ۱۰۰ کیلومتری محل این سد قرار گرفته‌اند که از بین آنها دو گسل اردبیل (طول ۸۸ کیلومتر، عرض زون گسلش ۱۵ کیلومتر، امتداد N25-35 و مکانیسم چپ‌بر) و سرعین (طول ۸۰ کیلومتر و امتدادی خمیده و مکانیسم راست‌بر + معکوس) در مجاورت سد واقع شده‌اند به گونه‌ای که رودخانه بالخلی چای در دره‌ای جریان دارد که از لحاظ ریخت‌زمین‌ساختی توسط پاره گسل جنوب اردبیل (بخش شمال شرقی گسل اردبیل) ایجاد شده است. اثرات کواترنری و عهد حاضر این گسل‌ها را می‌توان در نهشته‌های پادگانه‌های آبرفتی مشاهده نمود. سوابق لرزه‌خیزی تاریخی و دستگاهی نیز مؤید رخداد زلزله‌هایی با بزرگای $M_s > 6/9$ در شعاع ۱۰۰ کیلومتری و زلزله $M_w = 6/1$ در فاصله کمی از سد می‌باشد و همچنین انبوهی از زلزله‌هایی با بزرگای $M > 5$ در عمق کم در اطراف سد ثبت گردیده‌اند (شکل ۷). به این ترتیب می‌توان نتیجه گرفت که سد یامچی در منطقه‌ای احداث گردیده است که از نظر لرزه‌زمین‌ساختی دارای پتانسیل ایجاد زلزله‌های بزرگ می‌باشد. بررسی تأثیرات آبیگری بر روی لرزه‌خیزی در قالب تهیه نمودار تجمعی انرژی آزاد شده نسبت به تغییرات حجم مخزن سد، چهار بخش زمانی را آشکار ساخت. این مسئله در قالب تغییرات شیب خط نمودار تجمعی انرژی آزاد شده و تغییرات مقادیر پارامتر b قابل ردیابی است. دو بازه زمانی افزایش نرخ لرزه‌خیزی و کاهش

مجدد آن مربوط به رخداد زلزله ۱۹۹۷ و پس از آن می‌باشد. با آبیگری سد یامچی در سال ۱۳۸۳، حجم فعالیت‌های لرزه‌ای افزایش یافته و این افزایش خود را به صورت افزایش مقدار b نشان می‌دهد. همچنین شیب خط نمودار تجمعی انرژی آزاد شده دوباره افزایش یافته است. بررسی این افزایش در نرخ لرزه‌خیزی حاکی از آن است که افزایش مقدار b نشان‌دهنده افزایش نسبت زمین لرزه‌های کوچک به بزرگ است. به این معنی که آبیگری سد باعث افزایش رویداد زمین لرزه‌های کوچک شده است. به این ترتیب ساخت سد یامچی سبب ایجاد زلزله‌های القایی دارای عمق کانونی کم (۳ تا ۱۰ کیلومتر) با بزرگایی کمتر از $M < 4$ شده است. شایان توجه است که در صورتی که مکانیسم گسل‌ها نرمال باشد اثر آبیگری بیشتر خواهد شد؛ در صورتی که مکانیسم گسل‌ها عمدتاً امتداد لغز (یا معکوس) می‌باشند. از اواخر ۲۰۱۳ تاکنون، دوباره شیب نمودار تجمعی انرژی حالت نسبتاً افقی به خود گرفته که مصادف است با زمانی که حجم مخزن در پایین‌ترین حد خود قرار داشته است. در این بازه زمانی، نرخ لرزه‌خیزی کاهش یافته و بالطبع با کاهش مقدار b مواجه هستیم و می‌توان استنباط نمود که منطقه به سمت آرامش لرزه‌ای پیش رفته است.

به این ترتیب می‌توان اذعان نمود که ساخت سد یامچی علیرغم بهم زدن تعادل ایزوستاتیکی توان ایجاد زلزله‌های القایی بزرگ (RIS) را ندارد. آمار لرزه‌خیزی در شعاع ۳۰ کیلومتری نیز موید این مطلب است که زلزله بزرگی پس از ایجاد سد در منطقه رخ نداده است. همچنین، پر شدن اولیه سد یامچی با تغییر ناگهانی در الگوی ایزوستاتیکی منطقه، سبب افزایش نرخ لرزه‌خیزی (و آزاد شدن انرژی) شده که این مسئله به صورت رخداد زلزله‌های کوچک ($M < 4$) با عمقی کمتر از ۵ بوده است. با گذر از شوک اولیه ایجاد شده، از سال ۱۳۹۲ اثر این پدیده کم شده است. هر چند که با آبیگری سریع و یا تخلیه سریع مخزن سد امکان ظهور این پدیده (ایجاد زلزله القایی) دور از انتظار نخواهد بود. جهت مشخص نمودن اینکه آیا ساخت سد یامچی می‌تواند سبب فعالیت مجدد گسل‌های فعال منطقه شود؛ باید گفت که وجود سنگ‌های مارنی و شیلی در کف مخزن شرایطی را فراهم نموده‌اند که در اثر اشباع ناشی از پر شدن سد و بالا رفتن فشار اسمزی، اکثر شکستگی‌ها به خاطر رفتار پلاستیکی این توالی سنگی بسته شده‌اند و کف سد تقریباً ایزوله شده و امکان نفوذ آب فراوان به افق‌های پائین تر کم خواهد شد. به این ترتیب می‌توان نتیجه گرفت که پر شدن سد تأثیر کمی بر فعالیت مجدد گسل‌های فعال و رخداد زلزله‌های تحریک گسل (RTS) منطقه خواهد داشت.



تشکر و قدردانی:

اردبیل، به خصوص جناب آقای مهندس بابک خیاط رستمی (رئیس گروه تحقیقات کاربردی) و آقای مهندس انوار (مسئول امور قراردادهای این گروه) که با کمک‌های شایان خود زمینه را برای انجام این پروژه تحقیقاتی فراهم نمودند، کمال تشکر را داریم.

این پروژه تحقیقاتی با حمایت مالی کمیته تحقیقات شرکت آب منطقه‌ای اردبیل تحت قرارداد شماره ۹۵/۲/۷۹۳۹/۹۰۰ مورخ ۱۳۹۵/۰۸/۰۱ با کد ۹۳۰۲۵-ARD به انجام رسیده است. بدینوسیله از زحمات مسئولین سازمان آب منطقه‌ای



منابع

- Ambraseys, N.N., Meville, C. P., 1982- A history of Persian earthquakes, Cambridge university press, Cambridge.
- Baraka, A.A., 1992- North Anatolian Fault zone, Ann. Tectonicae, 6, 164-195.
- Chen, L., Talwani, P., 1998- Reservoir-induced Seismicity in China, Pure appl. geophys., 153, 133-149
- Dojinovski, D., Olumseva, T., Pekevski, L., Wang, G., 2014- Reservoir Induced Seismicity (RIS) potential of artificial water reservoir, Second European conference on Earthquake Engineering, Istanbul, Turkey
- Do Nascimento, A.F., Cowie, P.A., Lunn, R.J., Pearce, R.G., 2004- Spatio-temporal evolution of Induced Seismicity at Acu reservoir NE Brazil, Geophys. J. Int., 158, 1041-1052.
- Gupta, H.K., 2002- A review of recent studies of triggered earthquakes by artificial water reservoirs with special emphasis on earthquakes in Koyna, India, Earth-Science Reviews, 58, 279-310
- Gupta, H.K., 1992- Reservoir-Induced Earthquakes Elsevier, Amsterdam, 364 pp.
- Gupta, H.K., Rastogi, B.K., 1976- Dams and Earthquakes, Elsevier, Amsterdam, 229 pp
- Segall, P., 1989- Earthquakes triggered by fluid extraction. Geology, 17, 942-946.
- Shen, L. Y., Chang, B. Q., 1995- Application of stress-pore pressure coupling theory for porous media to the Xinfengjiang reservoir earthquakes. PAGEOPH 145 (1), 123- 137.
- Singh, C., 2012- Spatial variation of seismic b-value across NW Himalaya, Bull. Seismol. Soc. Am., 58, 399-415
- Wiemer, S., Wyss, M., 2000- Minimum magnitude of completeness in earthquake catalogs: examples from Alaska, the western United States, and Japan. Bull. Seismol. Soc. Am. 90 (4), 859-869.
- Wiemer, S., 2001- A software package to analyze seismicity: ZMAP. Seis. Res. Lett., 72, 373-382.

- ◀ تاتار، م.، ابراهیمی، م.ر.، یمینی فرد، ف.، ۱۳۹۰- لرزه‌خیزی القایی در مخزن سد مسجدسلیمان (جنوب باختر ایران)، مجله علوم زمین، سال بیستم، شماره ۸۰، صفحات ۹۵-۱۰۲.
- ◀ حافظی مقدس، ن.، عسکری، ق.، ۱۳۸۴- زمین لرزه‌های القایی مرتبط با برخی از سدهای مهم ایران، مجموعه مقالات نهمین همایش انجمن زمین‌شناسی ایران، دانشگاه تربیت معلم، ایران.
- ◀ سازمان آب منطقه‌ای اردبیل، ۱۳۹۵- اطلاعات فنی سد یامچی.
- ◀ سازمان زمین‌شناسی کشور، ۱۳۷۵- نقشه زمین‌شناسی اردبیل، مقیاس ۱/۱۰۰۰۰۰.
- ◀ سازمان نقشه‌برداری کشور، ۱۳۸۱- نقشه عمومی استان اردبیل.
- ◀ صفری، ح.، آق‌آتابای، م.، رضایی، ح.، طبرسا، ع.، یازرلو، ر.، عباس‌زاده، ز.، ۱۳۹۸- طرح پژوهشی: بررسی سدهای مهم استان اردبیل از لحاظ احتمال ایجاد زلزله‌های القایی با پیش‌بینی بزرگ‌ترین زلزله محتمل (سدهای یامچی و عمارت به عنوان مورد مطالعاتی)، ۴۲۰ صفحه
- ◀ مؤسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران، ۱۳۹۵- کاتالوگ اطلاعات خردلرزه‌های منطقه مورد مطالعه (منطقه اردبیل)
- ◀ مؤسسه زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله ایران، ۱۳۹۵- کاتالوگ اطلاعات زلزله‌های منطقه مورد مطالعه (منطقه اردبیل).
- ◀ مهندسین مشاور بندآب، ۱۳۷۴- طرح سد یامچی: مطالعات مرحله یکم (جلد دوم: زمین‌شناسی و ژئوتکنیک)، نشریه شماره ۱۵۳، ۳۳۰ صفحه.

جدول پیوست: لیست زلزله‌های بزرگتر از ۴ در منطقه مورد مطالعه و پیرامون

No.	Date	Lat.	Long.	Depth	Mag.	Mag.-Type	Ref.
1	1593/00/00	37.800	47.500		6.1	Ms	Am-MI
2	1844/05/13	37.400	48.000		6.9	Ms	Am-MI
3	1863/12/30	38.200	48.600		6.1	Ms	Am-MI
4	1879/03/22	37.800	47.900		6.7	Ms	Am-MI
5	1883/05/03	37.900	47.200		6.2	Ms	Am-MI
6	1896/01/04	37.800	48.400		6.7	Ms	Am-MI
7	1903-06-24	37.480	48.960	15.0	5.9	Ms	
8	1905-01-09	37.000	48.680	15.0	6.2	Ms	
9	1906-05-20	38.900	49.000	15.0	4.3	Ms	
10	1910-12-04	38.800	48.800	33.0	7.0	Ms	7 KRK
11	1913-04-16	38.700	48.500	33.0	5.2	Ms	7 KRK
12	1913-09-24	38.500	48.900	15.0	4.2	Ms	
13	1917-05-02	38.000	48.500	30.0	4.9	Ms	
14	1924-02-19	38.590	48.500	75.0	6.6	Ms	
15	1924-02-19	39.000	47.800	50.0	5.8	Ms	8*3 KRK
16	1928-03-24	37.800	47.300	33.0	4.9	Mb	**2 KRK
17	1929-08-28	38.700	49.000	10.0	4.2	Ms	
18	1932-05-24	37.800	48.200	33.0	4.5	Mb	**2 KRK
19	1932-05-24	37.800	48.200	33.0	4.5	Mb	**1 KRK
20	1933-04-16	39.000	48.500	33.0	4.8	Mb	**1 KRK
21	1933-04-16	38.820	48.340	15.0	4.6	Ms	
22	1934-06-08	38.580	48.270	25.0	4.4	Ms	
23	1944-11-09	38.000	48.400	33.0	4.2	Mb	KRK
24	1954-08-16	39.000	48.700	33.0	4.5	Mb	KRK
25	1959-05-31	37.670	48.940	15.0	5.0	Ms	
26	1965-02-10	37.600	47.100	52.0	5.1	MB	USE
27	1965-10-29	37.900	48.700	15.0	4.6	Ms	
28	1965-10-29	37.900	48.700	33.0	4.6	MB	CGS
29	1968-06-04	37.500	49.000	50.0	4.5		
30	1970-04-16	38.727	48.625	78.0	4.9	MB	CGS
31	1970-07-11	37.551	48.983	65.0	5.1	MB	CGS
32	1972-01-18	37.545	48.679	033N	4.9	MB	ERL
33	1972-01-18	37.500	48.700	33.0	4.9		
34	2001-10-29	38.820	48.630	40.0	4.5	mb	EHB
35	2002-01-05	37.580	48.980	22.0	4.4	mb	EHB
36	2002-01-06	38.250	48.950	63.0	4.3	mb	IDC
37	2005-05-26	38.670	48.680	37.0	4.4	ML	IIEES
38	2005-09-26	37.350	47.800	16.0	4.8	ML	IIEES
39	2006-11-05	37.500	48.880	14.0	5	ML	IIEES
40	2007-07-11	38.870	48.710	27.0	4.9	ML	IIEES
41	2007-09-29	37.380	48.570	14.0	4.2	ML	IIEES
42	2007-12-14	37.230	47.680	33.0	4.4	ML	IIEES
43	2008-03-23	37.460	48.520	38.0	4.7	ML	IIEES
44	2008-06-10	38.830	48.900	14.0	4.3	ML	IIEES
45	2008-07-13	37.730	48.230	14.0	4.1	ML	IIEES
46	2010-01-16	37.587	48.504	3.7	4.3	MN	IrSC
47	2011-03-04	37.732	48.553	6.9	4.4	MN	IrSC
48	2012-02-04	38.543	48.758	5.8	4.3	MN	IrSC
49	2013-07-06	37.630	48.966	10.7	4.3	MN	IrSC
50	2013-11-05	37.833	47.181	5.1	4.1	MN	IrSC
51	2013-11-08	37.806	47.173	5.0	4.5	MN	IrSC
52	2014-02-27	38.709	48.611	36.0	4.2	MN	IrSC
53	2014-03-15	38.870	48.699	28.0	4.2	MN	IrSC
54	2014-09-18	38.691	48.707	20.2	4.4	MN	IrSC
55	2015-01-24	38.059	47.036	6.7	4.4	MN	IrSC
56	2016-03-06	37.076	48.104	6.0	4.1	MN	IrSC
57	2016-03-24	37.293	47.151	18.9	4.2	MN	IrSC
58	2016-09-03	37.860	47.112	6.2	4.1	MN	IrSC

Investigation of the effect of Yamchi dam reservoir impounding on regional seismicity rate

Hojjat ollah Safari^{1*}, Maryam Agh Atabay², Alireza Tabarsa³, Hamed Rezaei⁴, Saeed Golmagnhi Ebrahimi⁵

1. Associated Professor in Tectonics, Geology Department, College of Sciences, Golestan University, Gorgan, Iran.
2. Associated Professor in Tectonics, Geology Department, College of Sciences, Golestan University, Gorgan, Iran.
3. Assistant Professor in Geotechnic, Geotechnic Department, College of Engineering, Golestan University, Gorgan, Iran.
4. Assistant Professor in Engineering Geology, Geology Department, College of Sciences, Golestan University, Gorgan, Iran.
- 5- PhD student of Geotechniques, Regional Water Company of Ardabil, Ardabil, Iran.



Abstract:

Yamchi dam was constructed (and operated) on Balekhli-Chay river in 2005 in south of Ardabil. In order to investigate of effect of reservoir impounding on seismicity rate changes of dam area (30 km radius) and proving of Reservoir Induced Seismicity, firstly, geological structures were determined and surveyed and then, the their Quaternary and Recent activities documented. Then, the earthquake catalogue was completed and historical and instrumental seismicity were investigated. Finally, the completed magnitude and b-values were calculated and then, impounding of reservoir effect of seismicity rate changes studied.

The results shown that two main Ardabil and Sarein faults, with Quaternary and recent activities located in 30 km radius of dam site and many of earthquakes taken placed in cross cut of these faults. The historical and instrumental seismicity studied demonstrated this area has potential of occurrences of earthquakes with $6.1 < M < 6.9$ and also, the earthquake 1997 with $M_w = 6.1$ took placed in dam vicinity and therefore, it concluded that Yamchi dam site constructed in an area with high seismicity rate. Investigation of effect of impounding of reservoir on seismicity rate, as cumulative diagram of released energy relative to reservoir volume changes, determined four stage of b-value and energy released changes. The first stage is related to earthquake 1997 and its after-shocks and in follow; the second stage is a silence era after stress drop due to earthquake. With impounding of dam reservoir, the third stage started due to rising of seismic activities as increasing b-value and diagram slope of releasing cumulative energy. This phenomenon proved that low magnitude/ high magnitude earthquake ration was increased as occurrences earthquakes with $M < 4$ in depth < 5 km. Also, due to impermeability of basement rocks in reservoir, the reservoir water cannot leak to lower depth and therefore, the potential of triggering of concealed faults and consequently occurrence of Reservoir Triggered Seismicity will not exist.

Key Words: Yamchi dam, Recent Faults, Dam Impounding, Reservoir Induced Seismicity, Seismic Rate.

* safari.ho@gmail.com & h.safari@gu.ac.ir