

ارزیابی لرزه‌خیزی القایی در سد سلمان فارسی (قیر)، ایران

حمیده صحرائی^{۱*}، سیداحمد علوی^۲ و محسن احتشامی معین‌آبادی^۳

۱. دانشجوی دکتری، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران

۲. استاد، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران

۳. استادیار، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران

(دریافت: ۹۸/۴/۱۹، پذیرش نهایی: ۹۹/۷/۸)

چکیده

امروزه لرزه‌خیزی القایی مخزن با توجه به گسترش سدسازی در کشور مورد توجه بسیاری از محققین است. سد سلمان فارسی (قیر) سد بتنی قوسی وزنی در ۳۰ کیلومتری شمال شرقی شهرستان قیر استان فارس در ایالت ساختاری زاگرس واقع شده است. در این مطالعه با استفاده از داده‌های زمین‌لرزه‌ای مؤسسه ژئوفیزیک و داده‌های سد، رفتار زمین‌لرزه‌های منطقه در بازه زمانی ۹ ساله قبل و ۹ ساله بعد از آبیگری مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج آماری بیانگر افزایش تغییرات آهنگ لرزه‌خیزی، افزایش در تعداد و کاهش عمق و بزرگای زلزله‌ها بعد از آبیگری سد می‌باشد. مقایسه داده‌های لرزه‌ای و نوسانات سطح آب مخزن نشان می‌دهد که بین تغییرات سطح آب و فعالیت لرزه‌ای منطقه همبستگی وجود دارد. اغلب لرزه‌خیزی در اطراف محدوده مخزن سد اتفاق افتاده است و پاسخ لرزه‌ای از نوع سریع است. بر این اساس ماهیت القایی زمین‌لرزه‌های رخ داده در منطقه ساختگاه سد پیشنهاد می‌شود.

واژه‌های کلیدی: سلمان فارسی، لرزه‌خیزی القایی، پاسخ لرزه‌ای، سد، زاگرس.

۱. مقدمه

سدهای بزرگ می‌توانند باعث لرزه‌خیزی شوند. اولین مشاهده لرزه‌خیزی القایی مخزن برای سد فویدودا الجزایر در سال ۱۹۳۲ ذکر شده است و اولین مطالعه گسترده در مورد رابطه بین افزایش فعالیت زمین‌لرزه و تغییرات عمق مخزن در دهه ۱۹۴۰ بر روی سد هوور (Hoover) انجام شد. امروزه شواهدی بر ارتباط بین لرزه‌خیزی و آبیگری یا تخلیه مخزن برای بیش از ۷۰ سد در سطح جهان وجود دارد (مک کولی، ۱۹۹۶). سد کوینا با بزرگ‌ترین زمین‌لرزه القایی مخزن در سال ۱۹۶۷ با بزرگی ۶/۴ نمونه‌ای روشن از لرزه‌خیزی القایی است که بعد از آبیگری سد رخ داد. مشاهدات دقیق‌تر نشان می‌دهد که تغییرات بسیار کم در سطح آب می‌تواند برای تغییر رفتار لرزه‌ای کافی باشد به گونه‌ای که مکانیسم زمین‌لرزه القایی در مخازن بزرگ پیچیده‌تر است. این امر تا حدی ناشی از مقیاس است (مک گار و همکاران، ۲۰۰۲). بررسی زمین‌لرزه‌های القایی مخزن در نقاط مختلف دنیا نشان داده است که شدیدترین زمین‌لرزه‌ها بعد از تعدادی پیش‌لرزه اتفاق افتاده‌اند و با یک سری از

زمین‌لرزه القایی یا لرزه‌خیزی القایی به زمین‌لرزه‌هایی گفته می‌شود که در اثر فعالیت‌های انسانی مانند عملیات مهندسی، آبیگری سدها، استخراج سیالات و یا تزریق سیالات که سبب تغییر شرایط تنش محلی می‌شود، رخ می‌دهند. گاه ممکن است در مناطقی زمین‌لرزه القایی اتفاق افتد که چندان معمول نیست (السورث، ۲۰۱۳). بزرگی این زمین‌لرزه‌ها از ریززمین‌لرزه تا زمین‌لرزه‌هایی با بزرگی بیش از ۶/۵ متغیر است (دویچینوفسکی و همکاران، ۲۰۱۲). با وجود تفاوت شدید در نرخ لرزه‌خیزی طبیعی و لرزه‌خیزی القایی مصنوعی به نظر می‌رسد این نوع لرزه‌خیزی در مناطق پایدار بیشتر از محل‌های حاشیه ورقه‌های زمین‌ساختی مورد توجه قرار گرفته است (مک گار و همکاران، ۲۰۰۲). همان‌طور که گفته شد دلایل مختلفی از جمله آبیگری مخازن سدها، برداشت از معادن، ذخایر نفت و چاه‌های تزریق، امکان وقوع لرزه‌خیزی القایی را فراهم می‌کنند. در این میان لرزه‌خیزی القایی ناشی از آبیگری مخازن سد بیشتر مطالعه شده است. نتایج مطالعات نشان می‌دهد که

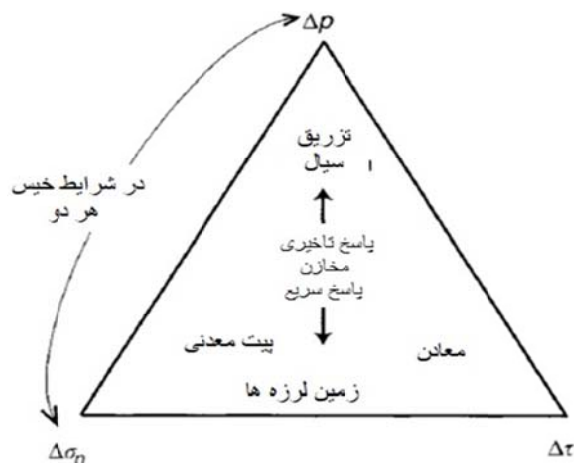
گسل تقویت شود. عدم تناسب ساختاری یا سنگ‌شناسی می‌تواند یک مکانیسم برای تولید تنش لازم باشد (مک‌گار و همکاران، ۲۰۰۲).

بر اساس مطالعات میدانی تالوانی (۱۹۹۷) در مورد ماهیت لرزه‌خیزی القایی، عوامل کنترل لرزه‌خیزی القایی مخزن عبارت‌اند از شرایط محیطی میدان تنش، وجود شکستگی، خواص هیدرومکانیکی سنگ‌های زیرزمینی، زمین‌شناسی منطقه، همراه با ابعاد مخزن و ماهیت نوسانات سطح دریاچه.

در ایران نیز مطالعاتی در زمینه لرزه‌خیزی القایی مخزن انجام شده‌است. ابراهیمی و تاتار (۱۳۹۱) به بررسی زمین‌لرزه‌های القایی ناشی از مخزن سد مسجدسلیمان در یک بازه زمانی ۱۵ ماهه پرداختند. موقعیت اکثر زمین‌لرزه‌ها پس از آبرگیری در قسمت شرق دریاچه سد در پایان گسل باغ ملک، در زیر مخزن سد قرار گرفته‌است. مطالعات آماری صورت‌گرفته در منطقه سد، ارتباط تغییرات سطح تراز آب با لرزه‌خیزی و همچنین مطالعه توزیع فرکتالی زمین‌لرزه‌ها، همگی دلالت بر القایی بودن زمین‌لرزه‌های رخ داده در قسمت شرق دریاچه سد مسجد سلیمان داشته‌است. زمین‌لرزه ۲۰۰۲/۹/۲۵ Mw=۵/۶ بزرگ‌ترین زمین‌لرزه القایی است که در ایران شناسایی و ثبت شده‌است.

پس‌لرزه‌ها ادامه یافته‌اند. در برخی موارد چنین فعالیتی برای چندین سال ادامه داشته‌است. وجود سری‌های پیش‌لرزه‌ای اهمیت نظارت لرزه‌ای مخازن قبل و بعد از ساخت سد را نشان می‌دهد. نکته قابل‌توجه دیگر فاصله زمانی بین اولین پرشدن مخزن و زمین‌لرزه شدید است که می‌تواند به مدت چند روز (سد کرماستا (kremasta)، یونان)، هفته (سد کاریبا (Kariba) در زیمباوه، از اوت تا نوامبر سال ۱۹۶۳، نه زمین‌لرزه ثبت شدند) یا یک یا چند سال (سد کونیا (Koyna) در هند با زمین‌لرزه سپتامبر ۱۹۷۶ کویناناگار (Koyanagar) با بزرگای ۵) باشد (دویچینوفسکی و همکاران، ۲۰۱۲).

مک‌گار و همکاران (۲۰۰۲) بر این باورند که لرزه‌خیزی القایی یا رهایی زمانی رخ می‌دهد که حالت مکانیکی پوسته زمین‌لرزه‌زا به حد شکست رسیده و باعث ایجاد گسل شود که این شکست می‌تواند به دو دلیل (شکل ۱) یعنی افزایش بارگذاری گسل به علت تنش برشی یا کاهش مقاومت گسل به علت کاهش تنش نرمال و یا افزایش در فشار منفذی رخ دهد. لرزه‌خیزی ناشی از مخزن می‌تواند به دو نوع تقسیم شود: پاسخ سریع مربوط به پاسخ الاستیک لحظه‌ای و پاسخ تأخیری که در ارتباط با انتشار سیال است. رخداد لرزه‌خیزی القایی حاصل از تغییرات کوچک در تنش حتی در مناطقی که لرزه‌خیزی طبیعی کم است نسبتاً شایع است (سیمپسون و همکاران، ۱۹۸۸). تغییر تنش ممکن است به صورت محلی بر روی



شکل ۱. طبقه‌بندی ساده از سه مکانیسم کنترل‌کننده لرزه‌خیزی تحریک شده (T تنش برشی، p فشار منفذی، σ_n تنش نرمال) (مک‌گار و همکاران، ۲۰۰۲).

واقع شده‌است. این سد بر روی رودخانه قره‌آغاج که از کوه‌های زاگرس سرچشمه می‌گیرد، ساخته شده‌است. فاصله محل احداث سد تا شیراز حدود ۲۰۰ کیلومتر می‌باشد. از نظر جغرافیایی، محدوده سد بین ۲۸ درجه و ۳۰ دقیقه تا ۲۸ درجه و ۴۵ دقیقه عرض شمالی و ۵۳ درجه تا ۵۳ درجه و ۱۵ دقیقه طول شرقی قرار دارد.

هدف از احداث این سد تأمین آب برای مصارف کشاورزی، شرب و صنعتی است. تولید برق و حفظ محیط زیست منطقه از دیگر اهداف این سد بوده است (شرکت آب منطقه‌ای فارس، ۱۳۹۷). ارتفاع سد از پی ۱۲۵ متر، طول تاج آن ۳۵۲ متر و عرض آن را هفت متر، ارتفاع از بستر ۱۰۰ متر، حجم مفید سد ۸۸۰ میلیون متر مکعب، ظرفیت سرریز آن ۱۹ هزار و ۸۰۰ متر مکعب در ثانیه است. هم‌اکنون ۲/۵ متر مکعب در ثانیه آب وارد سد و ۶/۵ متر مکعب در ثانیه خارج می‌شود. مرحله مطالعات مقدماتی طرح سد سلمان فارسی (قیر) از سال ۱۳۶۳ شروع و در سال ۱۳۶۹ خاتمه یافت. مطالعات مرحله دوم طرح از سال ۱۳۷۰ آغاز شد و در سال ۱۳۸۸ به اتمام رسید (شرکت آب منطقه‌ای فارس، ۱۳۹۷).

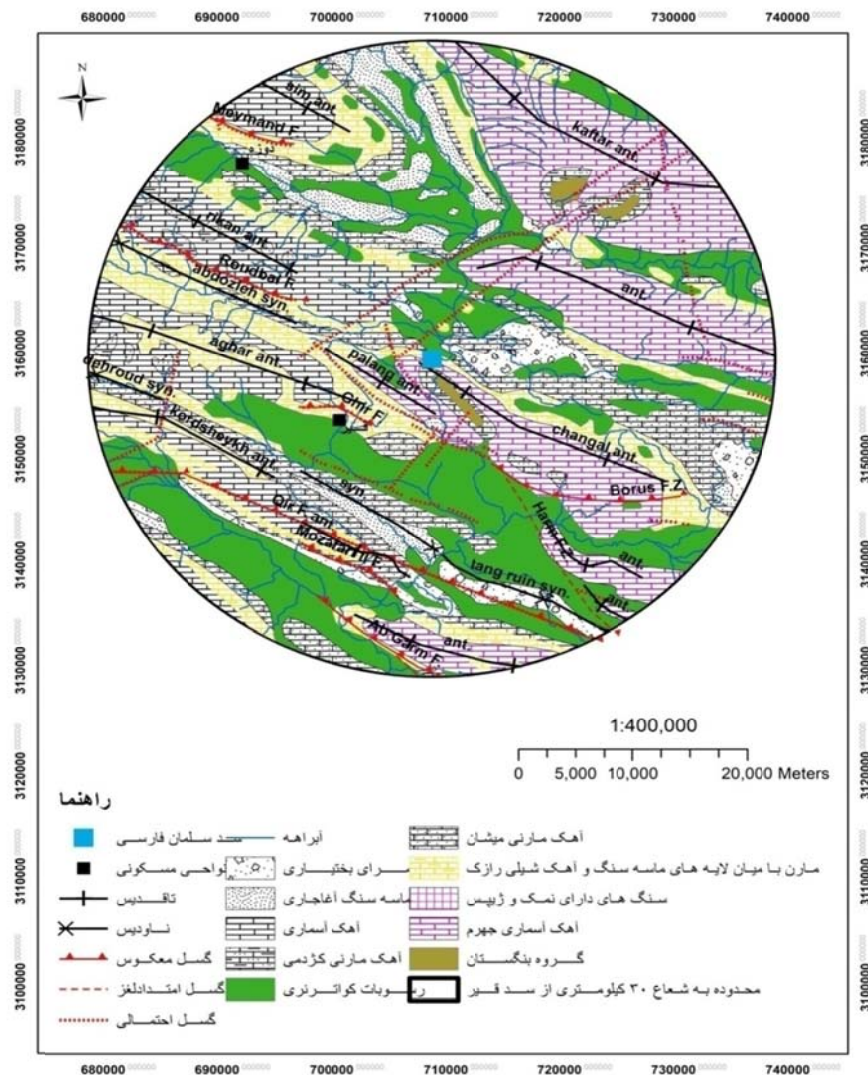
سد سلمان فارسی از نظر تقسیمات زمین‌شناسی ساختاری در کمربند چین‌خورده رانده زاگرس قرار دارد. منطقه زاگرس از بندرعباس در جنوب تا کرمانشاه در شمال‌غرب کشیده شده‌است و تا عراق ادامه دارد. درحقیقت این بخش لبه شمال‌شرقی صفحه عربی است. تشکیلات زمین‌شناسی موجود در منطقه عبارت‌اند از: گروه بنگستان، پابده-گورپی، آسماری-جهرم، چمپه، مول، رازک، ممبر گوری، میشان، آغاجاری، بختیاری و رسوبات آبرفت کواترنری (شکل ۲).

حافظی مقدس و عسگری (۱۳۸۴) به بررسی زمین‌لرزه‌های القایی مرتبط با برخی از سدهای مهم ایران پرداخته و با انتخاب ۵ سد بزرگ کشور مربوط به مناطق تکتونیکی مختلف، خصوصیات زمین‌لرزه‌های القایی مربوط به پر و خالی شدن سدها را بررسی کردند. آنها به این نتیجه رسیدند که پراکندگی زمین‌لرزه‌های القایی در اطراف مخزن سدها تمرکز بیشتری داشته و فراوانی زمین‌لرزه‌ها تابعی از مشخصات سد و محیط تکتونیکی است.

بنابراین، برای درک رابطه بین لرزه‌خیزی القایی مخزن و علت آن، ضروری است که نظارت دقیق بر روی عامل آن (مثلاً سطح آب در مخازن، فشار و حجم مایعات تزریق یا استخراج) وجود داشته باشد. هدف از این تحقیق شناسایی روند تغییرات فراوانی زمین‌لرزه و بررسی رابطه آن با تغییرات سطح آب در مخزن سد سلمان فارسی است. بر این اساس، زمین‌لرزه‌هایی که طی یک دوره نه‌ساله قبل و بعد از آغاز فرآیند پر شدن مخزن از آب اتفاق افتاده‌اند، مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته است. علاوه بر این، رابطه بین این زمین‌لرزه‌ها و بارگذاری القایی به‌وسیله تغییرات سطح آب مخزن بررسی شده است.

۲. روش پژوهش و داده‌ها

۱-۲. جایگاه جغرافیایی و موقعیت زمین‌شناسی سد سلمان فارسی (قیر) یک سد بتنی قوسی وزنی است که در حوضه خلیج فارس و دریای عمان در ۳۰ کیلومتری شمال‌شرقی شهرستان قیر استان فارس



شکل ۲. نقشه زمین شناسی محدوده مورد مطالعه (برگرفته از سازمان زمین شناسی و اکتشافات معدنی کشور).

۲-۲. کاتالوگ داده های لرزه ای

ایران از جمله کشورهایی است که زمین لرزه ها را برای ۴۰۰۰ سال ثبت کرده است (امبرسیز و ملویل ۱۹۸۲؛ بربریان ۱۹۷۶). بر اساس شواهد تاریخی، بسیاری از شهرهای ایران به علت زمین لرزه های بزرگی ویران شده اند. زاگرس از نقطه نظر لرزه خیزی بسیار فعال است به طوری که بیش از ۵۰ درصد زمین لرزه های ایران که توسط شبکه های جهانی به ثبت رسیده اند در این گستره اتفاق افتاده است (میرزایی و همکاران، ۱۹۹۸). زمین لرزه ۲۳ ژانویه ۱۹۰۹ سیلاخور با بزرگی ۷/۴ بزرگ ترین زمین لرزه ثبت شده در زاگرس با ۴۵ کیلومتر گسبختگی سطحی است. از دیگر زمین لرزه های رخ داده در این منطقه

می توان به زمین لرزه ۱۶ اوت ۱۹۵۸ فیروز آباد با بزرگی $M_s=6/6$ ، ۲۴ آوریل ۲۰۰۲ دینور صحنه با بزرگی $M_w=5/4$ (حیدری و میرزایی، ۱۳۸۸)، زمین لرزه ۳۱ مارس ۲۰۰۶ با بزرگای ۶/۱ (اسلامی و اشعری، ۱۳۸۹) و زمین لرزه ۲۱ آبان ۱۳۹۶ (۲۰۱۷) از گله کرمانشاه با بزرگای ۷/۳ (مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی، ۱۳۹۶) اشاره کرد. زمین لرزه تاریخی واقع در محدوده ۳۰ کیلومتری سد، زمین لرزه ۸۱۹ هجری شمسی (۱۴۴۰ میلادی) قیروکارزین است، که مایه آسیب چشمگیر و تلفات جانی در کارزین و نیز در دیگر بخش های منطقه شیراز شد و نزدیک به ۱۰۰۰۰ تن را کشت (جدول ۱).

جدول ۱. زمین‌لرزه‌های تاریخی و دستگاهی با بزرگی بیش از ۵ در محدوده مطالعاتی سد سلمان فارسی قیر.

محدوده	طول جغرافیایی	عرض جغرافیایی	تاریخ رخداد	Ms بزرگی
۲۰ کیلومتری-۳۰ کیلومتری-۵۰ کیلومتری-۱۰۰ کیلومتری سد قیر	۵۳/۱	۲۸/۴	۱۴۴۰	۷/۱
۵۰ کیلومتری-۱۰۰ کیلومتری سد قیر	۵۳/۵	۲۸/۸	۱۸۹۰/۰۳/۲۵	۶/۴
۱۰۰ کیلومتری سد قیر	۵۲/۷	۲۹/۱	۱۸۹۲/۰۸/۱۵	۵/۳
۱۰۰ کیلومتری سد قیر	۵۲/۶۲	۲۹/۱	۱۹۹۴/۰۳/۰۱	۶/۰
۱۰۰ کیلومتری سد قیر	۵۱/۹۱۷	۲۹/۵۳	۱۹۹۹/۰۵/۰۶	۶/۳
۱۰۰ کیلومتری سد قیر	۵۱/۸۸	۲۹/۵	۱۹۹۹/۰۵/۰۶	۶/۲
۱۰۰ کیلومتری سد قیر	۵۱/۶۲	۲۹/۶۹	۲۰۱۰/۰۹/۲۷	۶/۱
۱۰۰ کیلومتری سد قیر	۵۱/۵۷	۲۸/۴۷	۲۰۱۳/۰۴/۰۹	۶/۳

کاتالوگ متعلق به دسته زمین‌لرزه‌های ۳ تا ۳/۵ است. بزرگی ۲/۸ با تعداد ۴۲۶ زمین‌لرزه فراوان‌ترین بزرگی اتفاق افتاده در منطقه است. حداکثر عمق این زمین‌لرزه‌ها ۴۵ کیلومتر می‌باشد و زمین‌لرزه‌هایی که در دسته عمق ۱۰ تا ۱۵ کیلومتری قرار دارند، بیشترین فراوانی را دارند. اغلب زمین‌لرزه‌های این منطقه در عمق ۱۰ کیلومتری اتفاق افتاده‌اند. در اعماق ۳۷، ۳۸ و ۴۱ تا ۴۴ کیلومتری زمین‌لرزه‌ای رخ نداده است. به‌عبارت دیگر، بیشتر زمین‌لرزه‌های منطقه در عمق بین ۵ تا ۲۰ کیلومتر اتفاق افتاده‌اند و بیشتر زمین‌لرزه‌های منطقه از سال ۱۹۹۰ تاکنون عمق کم تا متوسط دارند. البته لازم به‌ذکر است که عمق زمین‌لرزه‌ها نسبت به بزرگی آنها از دقت کمتری برخوردار است.

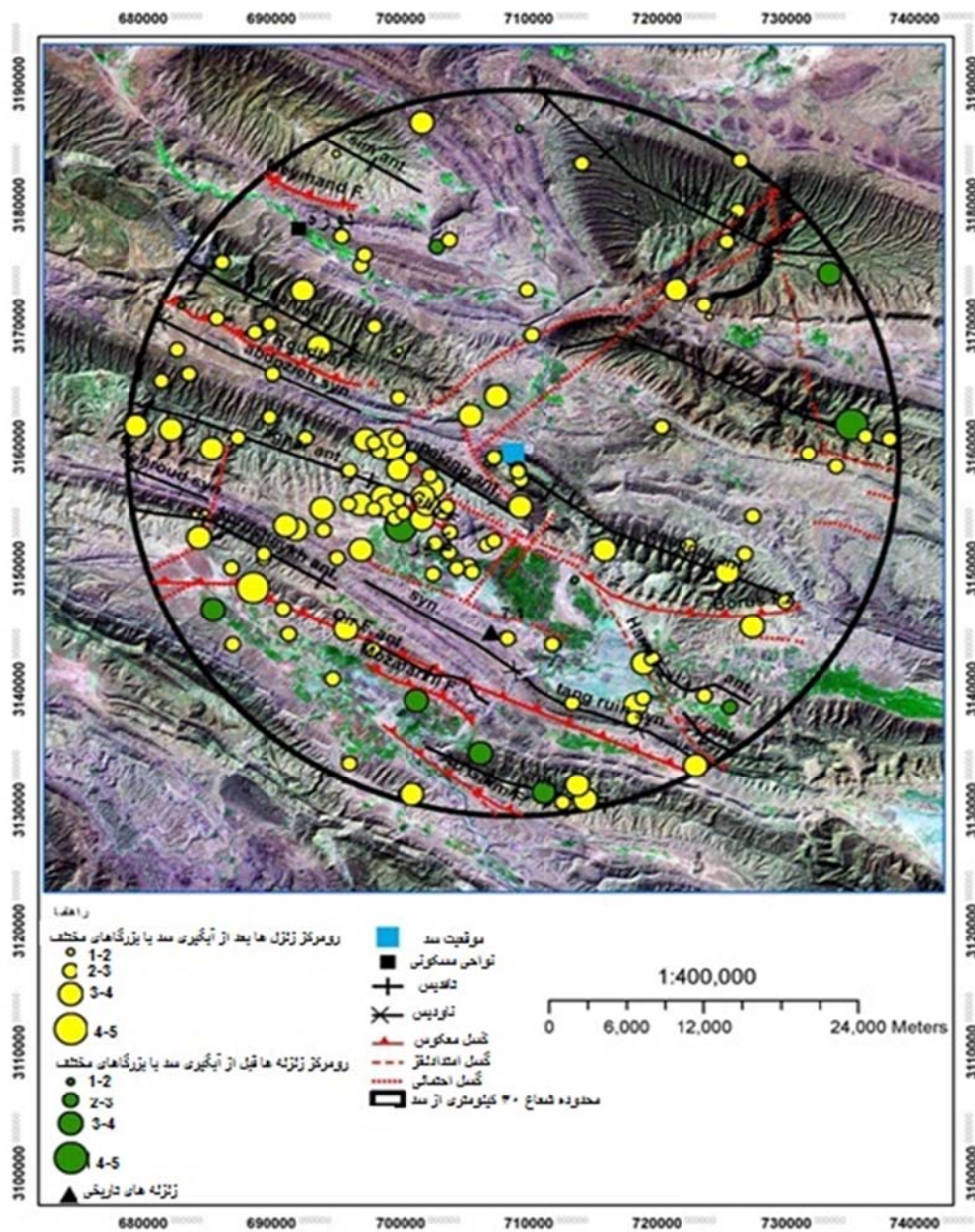
برای یافتن شعاع تأثیر مناسب برای بررسی زمین‌لرزه‌های متأثر از سد قیر محدوده‌هایی با شعاع ۱۰، ۲۰، ۳۰، ۵۰ و ۱۰۰ کیلومتر به مرکزیت این سد انتخاب شدند و تغییرات چگالی آنها مورد بررسی قرار گرفت. تغییرات چگالی از شعاع ۱۰ کیلومتری تا ۵۰ کیلومتری روندی کاهشی داشت و بعد از آن ثابت باقی ماند از آنجا که سد دیگری در شعاع ۵۰ کیلومتری به نام سد تنگاب وجود دارد

داده‌های مورد استفاده در این پژوهش بر اساس داده‌های شبکه لرزه‌نگاری کشور (مؤسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران) است که برای یک دوره هجده‌ساله از ۲۰۰۰/۴/۲۱ تا ۲۰۱۸/۱۰/۱۳ برای محدوده‌ای به شعاع ۱۰۰ کیلومتری به مرکزیت سد سلمان فارسی استخراج شد، این کاتالوگ شامل ۱۴۹۷ رویداد است. لازم به‌ذکر است که در محل سد قیر داده‌های زمین‌لرزه‌های محلی وجود ندارد و تنها داده‌های موجود به ایستگاه در محل سد، گرافهایی مربوط به ثبت شتاب زلزله‌ها بوده و داده‌ها نیز پردازش نشده است. به‌همین دلیل امکان استفاده از شبکه محلی سد قیر برای بررسی بیشتر زلزله‌ها ممکن نبوده است. بر اساس اطلاعات اخذ شده از مؤسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران، ایستگاه لرزه‌نگاری قیر که نزدیکترین ایستگاه به منطقه مورد مطالعه می‌باشد، در اکتبر ۲۰۱۴ تأسیس شده است. همچنین ایستگاه‌های لرزه‌نگاری لار و لامرد از سال ۲۰۱۲ به شبکه لرزه‌نگاری شیراز اضافه شده‌اند.

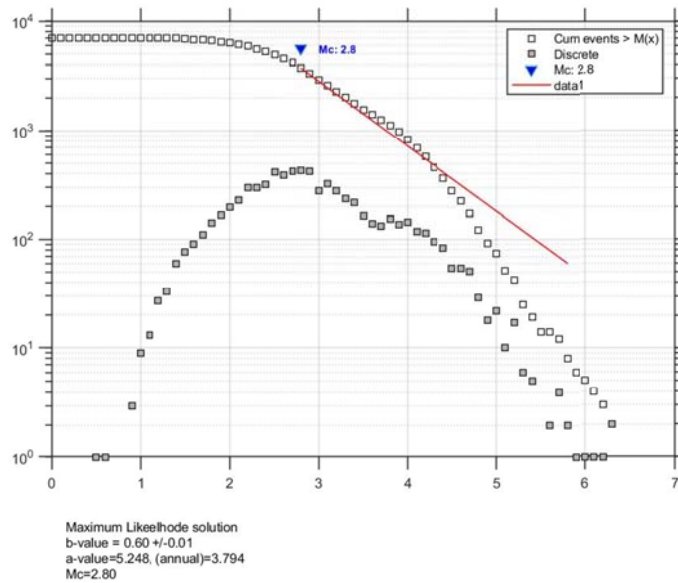
محدوده بزرگی زمین‌لرزه‌ها در این بازه زمانی بین ۰/۵ تا ۶/۳ متغیر است. ۵ زمین‌لرزه دستگاهی با بزرگی بیشتر از ۶ در منطقه به شعاع ۱۰۰ کیلومتری سد قیر از سال ۱۹۹۰ تا ۲۰۱۸ اتفاق افتاده است (جدول ۱). فراوان‌ترین بزرگی

می‌توان این ثبات در تغییرات چگالی زمین‌لرزه‌ها را ناشی از تأثیر این سد دانست، بنابراین با توجه به تغییرات چگالی زمین‌لرزه‌ها، بررسی شعاع تأثیر سدهای دیگر در منطقه و مساحت دریاچه سد در تراز عادی، شعاع ۳۰ کیلومتری برای بررسی اثر سد قیر بر زمین‌لرزه‌های منطقه انتخاب شد. این محدوده به مساحت ۲۸۲۶ کیلومتر مربع ۱۴۱ زمین‌لرزه از سال ۱۹۹۰ تا ۲۰۱۸ را دربر دارد که با بزرگی

از ۱/۳ تا ۴/۹ است (شکل ۳).
 به‌منظور بررسی داده‌های لرزه‌ای تغییرات کامل بودن بزرگی، M_c ، به‌عنوان تابعی از زمان با استفاده از نگرش زمان پنجره تعیین می‌شود. M_C برای رویدادهای کاتالوگ لرزه‌ای همان‌طور که در شکل ۴ مشاهده می‌شود ۲/۸ به‌دست آمد و داده‌های با بزرگی بیشتر از ۲/۸ در بررسی و آنالیز داده‌ها استفاده شده است.



شکل ۳. موقعیت رومرکز زمین‌لرزه‌های دستگاهی و تاریخی در محدوده به شعاع ۳۰ کیلومتری از سد.



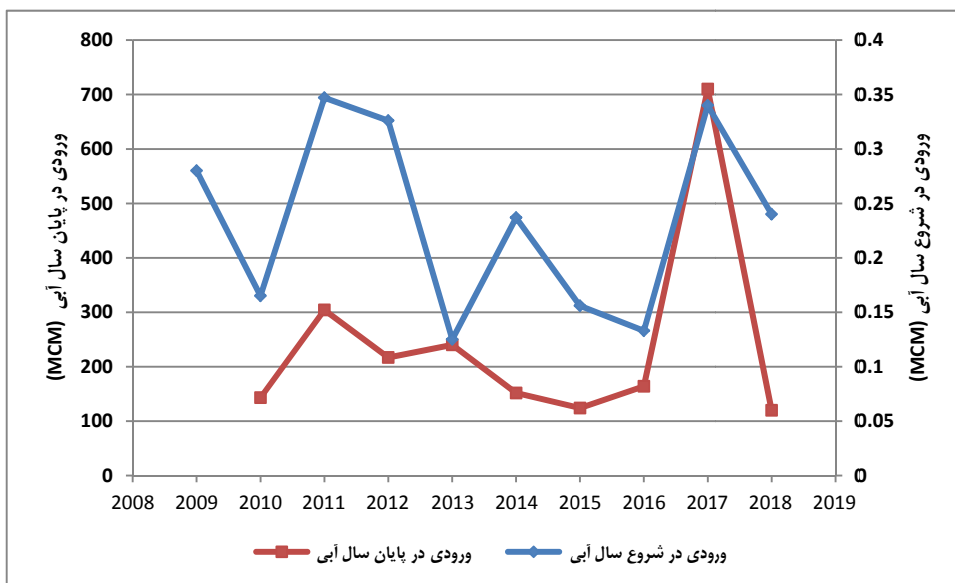
شکل ۴. توزیع فراوانی-بزرگی کاتالوگ کلی. هر دو شکل تجمعی و غیرتجمعی رسم شده‌است. $MC=2.8$.

آب مخزن به صورت روزانه توسط شرکت سهامی آب منطقه‌ای فارس اندازه‌گیری شده‌است.

شروع آبرگیری سد سلمان فارسی (قیر) از اول اردیبهشت ۱۳۸۸ (۲۰۰۹) انجام شده‌است و تا لحظه مطالعات این پژوهش ۹ سال آبی را پشت سر گذاشته‌است. حداکثر مقدار ورودی در ابتدای سال آبی مربوط به اکتبر سال ۲۰۱۷ با مقدار ۰/۳۴۷ میلیون مترمکعب و حداقل مقدار مربوط به اکتبر ماه سال ۲۰۱۳ با مقدار ۰/۱۲۵ میلیون مترمکعب است.

۳. اندازه‌گیری، مشاهده و محاسبه داده‌های لرزه‌خیزی و آبی مخزن سد

برای این تحقیق از اطلاعات لرزه‌ای پایگاه مؤسسه ژئوفیزیک استفاده شد. به طوری که دوره زمانی نه سال قبل از آبرگیری و نه سال بعد از آبرگیری مورد توجه قرار گرفت. با توجه به تغییرات چگالی زمین‌لرزه‌ها، بررسی شعاع تأثیر سدهای دیگر در منطقه و مساحت دریاچه سد در تراز عادی شعاع ۳۰ کیلومتری برای بررسی اثر سد بر زمین‌لرزه‌های منطقه انتخاب شد. اطلاعات نوسانات سطح



شکل ۵. ورودی آغازین ماه اکتبر (شروع سال آبی) و ورودی سالانه در پایان سال آبی به مخزن سد سلمان فارسی.

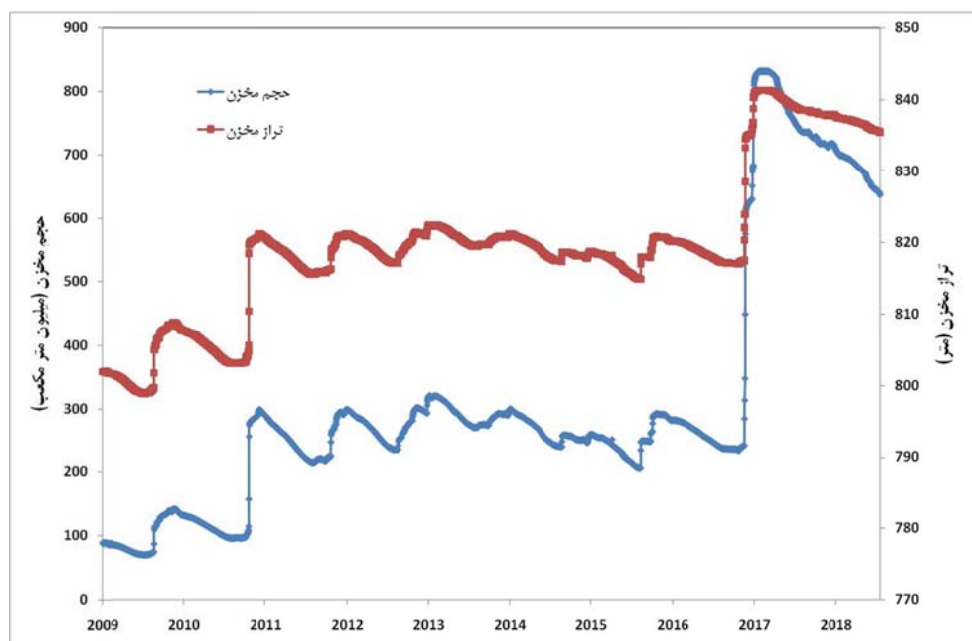
به فوریه ۲۰۱۷ (۲۴۳/۱۷ میلیون مترمکعب) تا ژوئن ۲۰۱۷ (۸۳۲/۱۷ میلیون مترمکعب) می‌باشد که معادل دومین تغییر ناگهانی در تراز مخزن به میزان ۲۳/۷۷ متر (از ۸۱۷/۵۲ متر تا ۸۴۱/۲۹ متر) در همین بازه زمانی است. تغییر ناگهانی اول در سال ۲۰۱۱ و تغییر ناگهانی دوم در سال ۲۰۱۷ اتفاق افتاده که این سال دارای بیشترین دامنه تغییرات در میزان ورودی در حد ۷۱۰/۶۸۱ میلیون مترمکعب در میان بقیه سال‌ها است (شکل ۶).

ورودی سال ۲۰۱۱ (سال آبی ۹۰-۱۳۸۹) از ابتدای سال تا انتهای سال به ترتیب از ۰/۱۶۵ میلیون مترمکعب تا ۳۴۰/۱۰۳ میلیون مترمکعب متغیر است. در حالی که در مورد سال ۲۰۱۷ (سال آبی ۹۶-۱۳۹۵) این مقدار معادل ۰/۱۳۳ تا ۷۱۰/۸۱۴ میلیون مترمکعب است (شکل ۵). سال ۲۰۱۷ دارای بیشترین میزان بارش به مقدار ۶۹۲/۷ میلی‌متر در سال است مرتبه بعدی بارش به سال ۲۰۱۱ (سال آبی ۹۰-۱۳۸۹) مربوط می‌شود که میزان بارش در این سال به مقدار ۳۸۰/۱ میلی‌متر در سال می‌باشد (شکل ۷). از مقایسه شکل ۵ و ۷ مشخص می‌شود که بارش‌های اتفاق افتاده در سال‌های ۲۰۱۱ و ۲۰۱۷ مسئول تغییرات ایجاد شده در حجم و تراز مخزن در سال‌های آبی مذکور هستند.

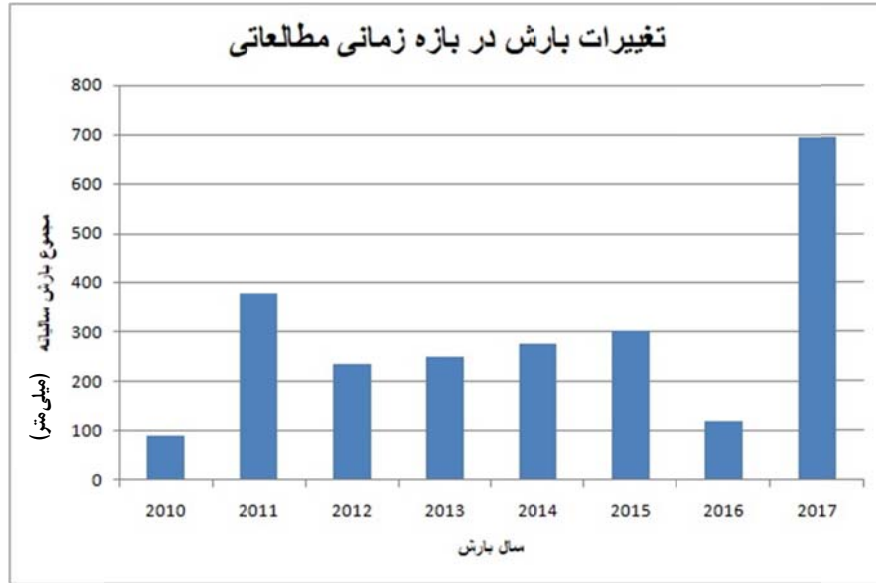
حد اکثر مقدار ورودی در پایان سال آبی همانند آغاز سال آبی مربوط به سال ۲۰۱۷ (۱۳۹۶) است که برابر با ۷۱۰/۸۱۴ میلیون مترمکعب ثبت شده است ولی حداقل ورودی در پایان سال آبی متعلق به سال ۲۰۱۸ (از اول مهر ۱۳۹۶ تا ۳۱ شهریور ۱۳۹۷) به مقدار ۱۱۹/۸۱۷ میلیون مترمکعب است.

همان‌طور که در شکل ۶ دیده می‌شود تغییرات تراز مخزن با تغییرات حجم مخزن ارتباط مستقیم دارد به طوری که حد اکثر تراز آب در مخزن ۸۴۱/۲۹ متر است که در همان تاریخ حجم مخزن هم در حد اکثر مقدار خودش یعنی ۸۳۲/۱۷ میلیون مترمکعب است. حداقل تراز مخزن و حجم مخزن هم به ترتیب ۷۹۸/۸۱ متر و ۶۹/۷۲ میلیون مترمکعب‌اند.

دو تغییر بزرگ در تراز و حجم مخزن اتفاق افتاده است. یکی با دامنه تغییرات ۱۹۸/۷۹ در حجم مخزن مربوط به ژانویه ۲۰۱۱ با کمترین مقدار ۹۷/۱۷ میلیون مترمکعب تا آوریل ۲۰۱۱ با بیشترین مقدار ۲۹۵/۹۶ میلیون مترمکعب است. این روند با دامنه تغییرات ۱۷/۸۵ متری در سطح آب از ۸۰۳/۱۶ متر تا ۸۲۱/۰۱ متر همخوانی دارد. دومین تغییر دارای دامنه بزرگ تری به میزان ۵۸۹ است که مربوط



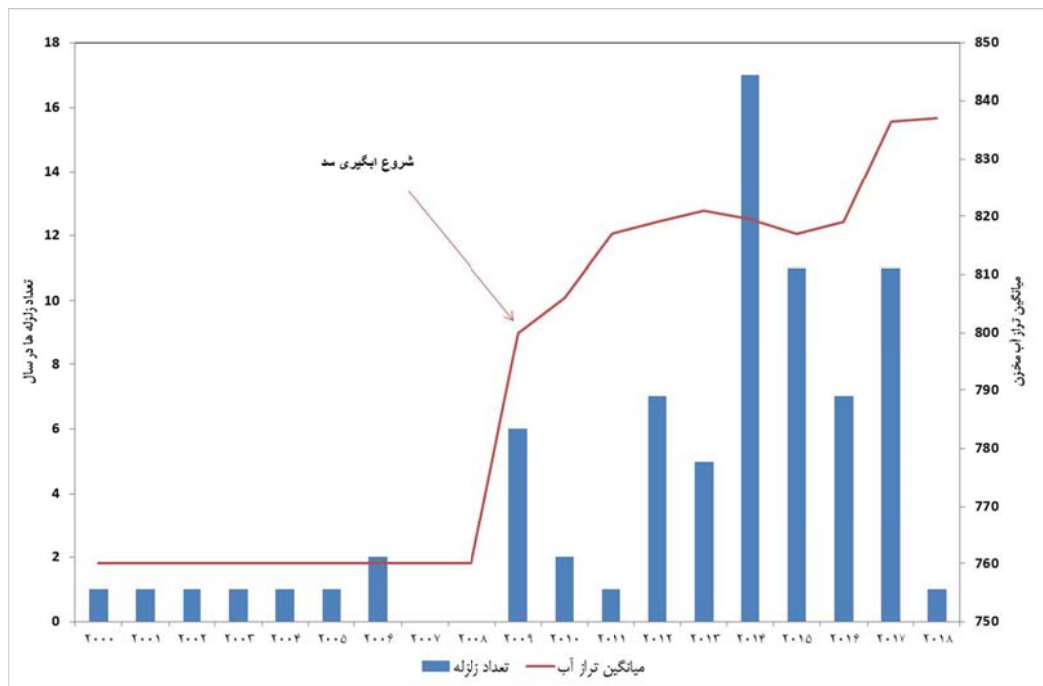
شکل ۶. رابطه مستقیم تراز و حجم مخزن سد سلمان فارسی از سال ۲۰۰۹ تا ۲۰۱۸.



شکل ۷. بارش سالیانه در مدت زمان سال‌های ۲۰۱۰ تا ۲۰۱۷ برگرفته از داده‌های ایستگاه هواشناسی قیروکارزین (سازمان هواشناسی کشور، ۱۳۹۷).

در سال بعد از شروع آبیگری سد است. بیشترین تعداد زمین‌لرزه‌های رخ داده مربوط به سال ۲۰۱۴ با تعداد ۱۷ زمین‌لرزه و کمترین تعداد زمین‌لرزه‌های رخ داده مربوط به سال‌های ۲۰۰۷ و ۲۰۰۸ بدون زمین‌لرزه بوده است.

برای ارزیابی مکانیسمی که مسئول لرزه‌خیزی القایی مخزن در سد سلمان فارسی هست تعداد رویدادهای سالیانه در شکل ۸ نشان داده شده است. بررسی آماری لرزه‌خیزی در محدوده سد سلمان فارسی در شعاع ۳۰ کیلومتری نشان‌دهنده افزایش چشمگیر تعداد زمین‌لرزه‌ها



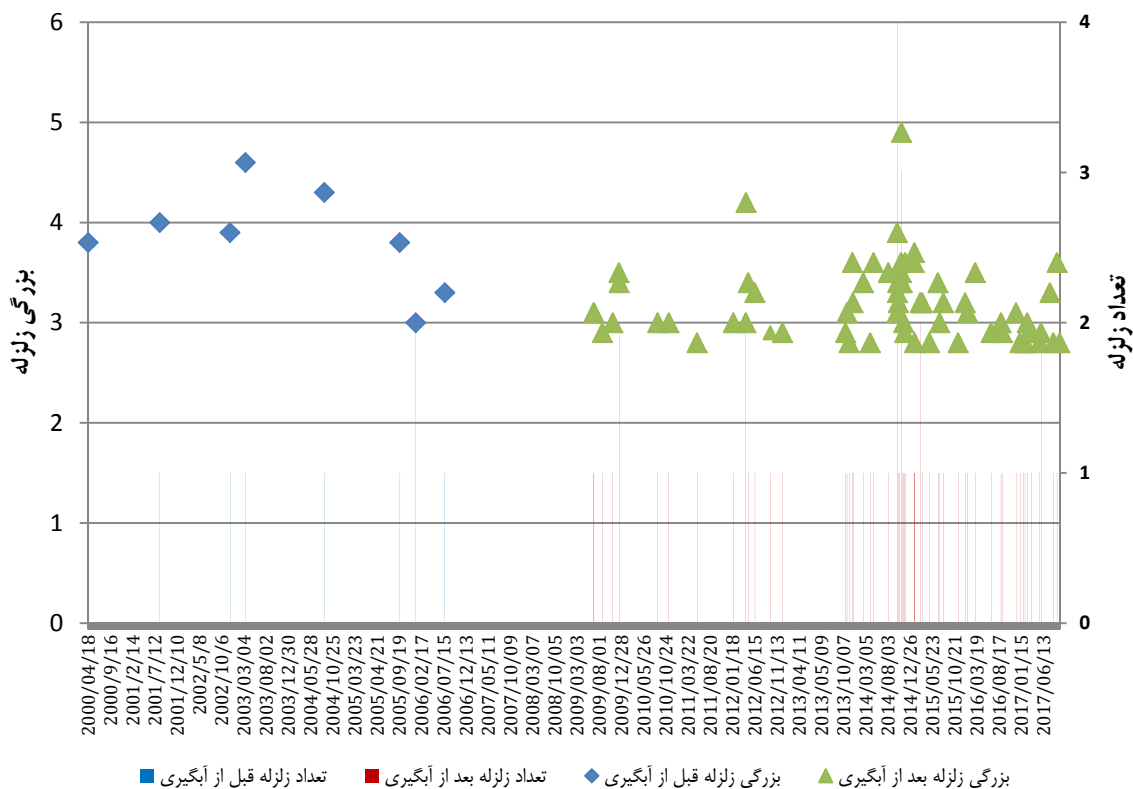
شکل ۸. تعداد زمین‌لرزه‌ها در محدوده ۳۰ کیلومتری سد سلمان فارسی در بازه زمانی هجده‌ساله قبل و بعد از آبیگری.

دو زمین‌لرزه در روز بوده‌اند و بزرگی آنها از ۳ تا ۴/۶ متغیر بوده‌است.

همان‌طور که در نمودار شکل ۹ دیده می‌شود فراوانی زمین‌لرزه‌ها در دورهٔ نه‌ساله بعد از آبرگیری سد از صفر تا ۴ متغیر است. در این نمودار اغلب روزهایی که در آنها زمین‌لرزه رخ داده است حداقل تعداد یک زمین‌لرزه را دارا بوده‌اند. علاوه بر روزهایی که یک زمین‌لرزه در آنها رخ داده است، نمودار دو روز ۲ زمین‌لرزه‌ای در سال ۲۰۰۹، یک روز ۳ زمین‌لرزه‌ای در سال ۲۰۱۲، دو روز ۳ و ۴ زمین‌لرزه‌ای در سال ۲۰۱۴، یک روز ۲ زمین‌لرزه‌ای در سال ۲۰۱۵، و نهایتاً یک روز ۲ زمین‌لرزه‌ای در سال ۲۰۱۷ نشان می‌دهد. بیشترین فراوانی زمین‌لرزه اتفاق افتاده در روز ۴ زمین‌لرزه مربوط به سال ۲۰۱۴ است. حداکثر فراوانی زمین‌لرزه‌ها در سال‌های ۲۰۱۰، ۲۰۱۱، ۲۰۱۳ و ۲۰۱۶ برابر یک می‌باشد. بزرگی زمین‌لرزه‌ها در دورهٔ نه‌ساله بعد از آبرگیری سد از ۲/۸ تا ۴/۹ متغیر بوده‌است.

بر این اساس تعداد زمین‌لرزه‌ها در بازهٔ زمانی نه‌ساله قبل از آبرگیری سد از تاریخ ۲۰۰۰/۰۴/۲۱ تا تاریخ ۲۰۰۹/۰۴/۲۱ در محدوده‌ای به شعاع ۳۰ کیلومتری نشان داد که تعداد ۸ زمین‌لرزه در محدوده ۳۰ کیلومتری سد سلمان فارسی در این منطقه رخ داده است و این در حالی است که در دورهٔ نه‌ساله دوم بعد از آبرگیری سد یعنی از ۲۰۰۹ تا ۲۰۱۸ فراوانی زمین‌لرزه‌ها در همین محدوده به تعداد ۶۸ زمین‌لرزه افزایش یافته است که نشان‌دهندهٔ افزایش آهنگ تغییرات لرزه‌خیزی منطقه به میزان ۸ برابر است. در بررسی تغییرات لرزه‌خیزی، مقدار b-value قبل و بعد از احداث سد محاسبه شده که مقدار b قبل از احداث سد ۰/۶۱ و بعد از احداث سد ۱/۰۶ به دست آمده است.

برای مطالعهٔ رفتار لرزه‌خیزی القایی مخزن، فراوانی، بزرگی و عمق زمین‌لرزه‌ها در سد سلمان فارسی مورد بررسی قرار گرفت که به ترتیب در شکل ۹، ۱۰ و ۱۱ نشان داده شده‌است. در بازهٔ زمانی قبل از آبرگیری تعداد ۸ زمین‌لرزه در منطقه اتفاق افتاده‌است که دارای مقدار ۱ یا



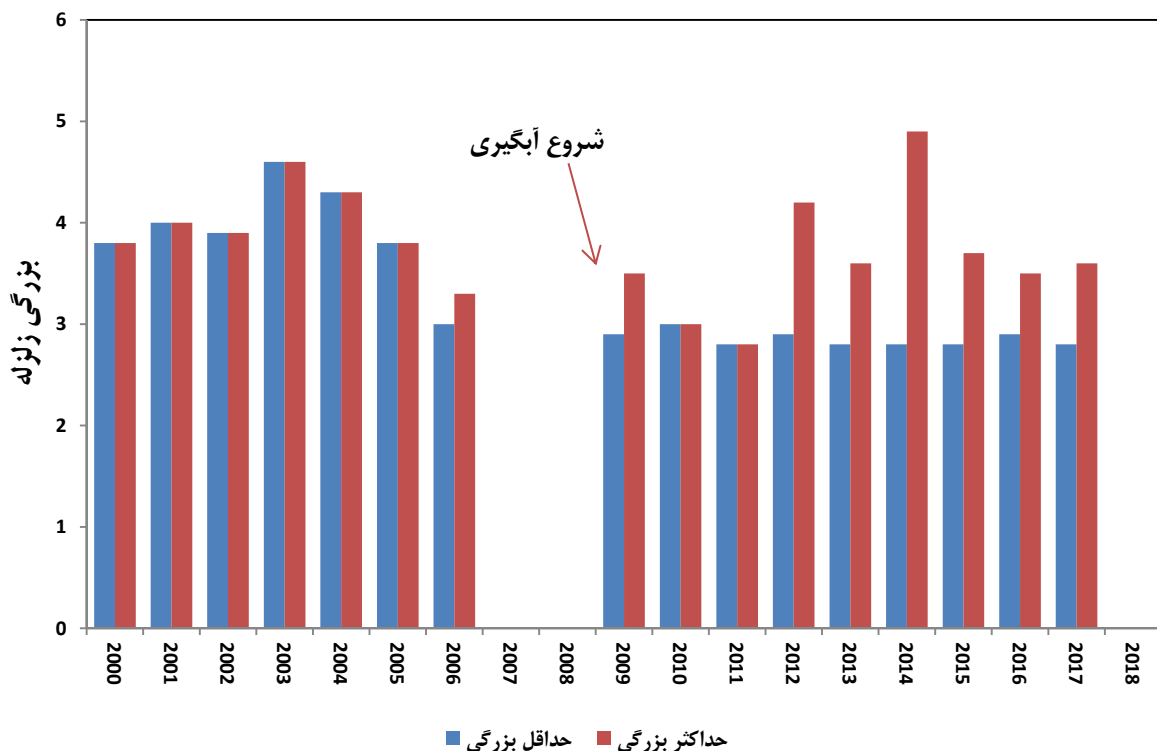
شکل ۹. فراوانی و بزرگی زمین‌لرزه‌های رخ داده در محدوده‌ای به شعاع ۳۰ کیلومتری سد قیر در دورهٔ زمانی ۲۰۰۰ تا ۲۰۱۸ (بازهٔ زمانی قبل و بعد از آبرگیری سد).

این سال‌ها تنها دو زمین‌لرزه هست که هر دو دارای بزرگی یکسان هستند.

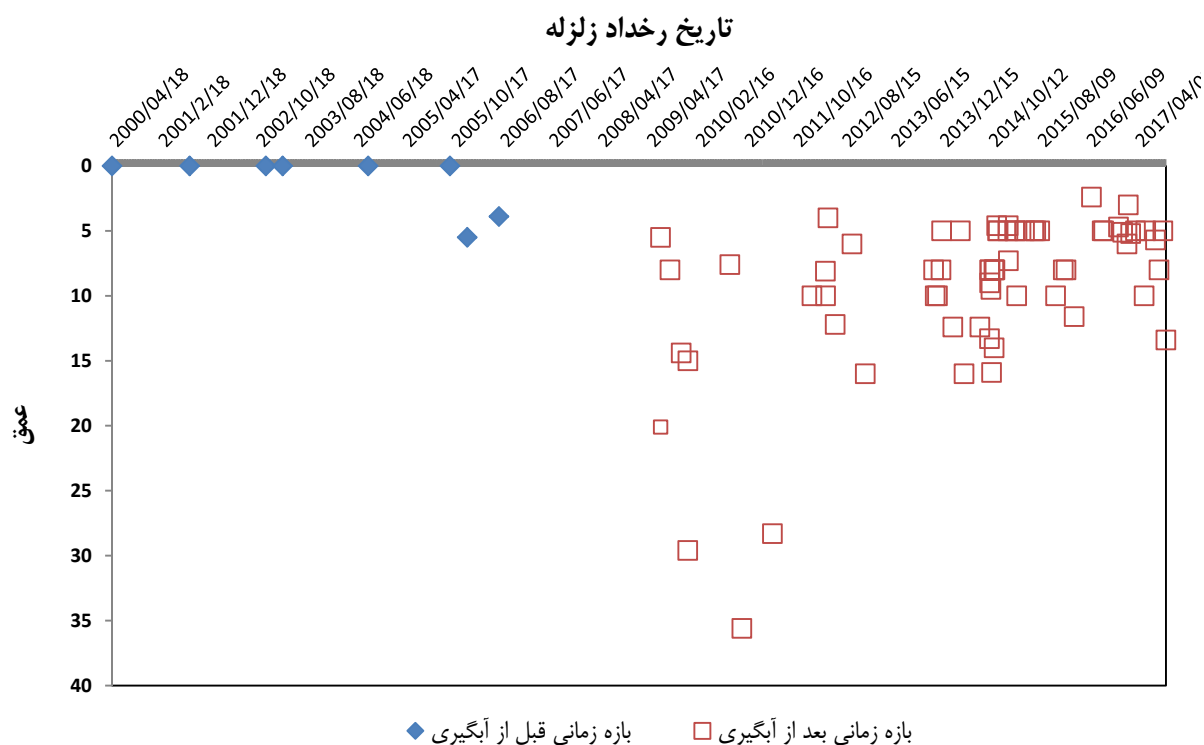
تغییرات بزرگی زمین‌لرزه‌ها قبل از آبگیری ۰/۳ و بعد از آبگیری ۲/۱ می‌باشد و میانگین بزرگی زمین‌لرزه‌ها قبل از آبگیری ۳/۹ و بعد از آبگیری ۳/۲۵ می‌باشد.

در شکل ۱۱ تغییرات عمق زمین‌لرزه‌های رخ داده در محدوده سد سلمان فارسی در بازه زمانی قبل از آبگیری و بعد از آبگیری سد ارائه شده است. اطلاعات عمق زمین‌لرزه‌ها در قبل از سال ۲۰۱۱ دارای خطای زیادی است و خصوصاً در بیشتر موارد عمق صفر ثبت شده است. اما میزان خطای عمق از بعد از ۲۰۱۱ به میزان چشمگیری کاهش یافته است و همان‌طور که از شکل فوق مشاهده می‌شود بیشتر زمین‌لرزه‌های رخ داده بعد از آبگیری سد از نوع کم‌عمق می‌باشد.

شکل ۱۰ تغییرات سالیانه بزرگی زمین‌لرزه را در این دوره زمانی هجده‌ساله از ۲۰۰۰ تا ۲۰۱۸ نشان می‌دهد. بیشترین بزرگی در بازه زمانی نه‌ساله قبل از آبگیری سد متعلق به تاریخ ۲۰۰۳/۰۳/۱۶ با بزرگی ۴/۶ می‌باشد. در سال‌های ۲۰۰۷ و ۲۰۰۸ بزرگی زلزله‌ها کمتر از بزرگی حد آستانه می‌باشد. بیشترین دامنه تغییرات متعلق به سال ۲۰۰۶ با مقدار ۰/۳ و کمترین دامنه تغییرات متعلق به سال‌های ۲۰۰۰ تا ۲۰۰۵ با مقدار ۰ است. تعداد زمین‌لرزه‌های رخ داده در این سال‌ها تنها یک زمین‌لرزه هست. بیشترین بزرگی در بازه زمانی نه‌ساله بعد از آبگیری سد متعلق به تاریخ ۲۰۱۴/۱۰/۲۸ با بزرگی ۴/۹ و کمترین بزرگی ۲/۸ است. بیشترین دامنه تغییرات متعلق به سال ۲۰۱۴ با مقدار ۲/۱ و کمترین دامنه تغییرات متعلق به سال‌های ۲۰۱۰ و ۲۰۱۱ با مقدار ۰ است. تعداد زمین‌لرزه‌های رخ داده در



شکل ۱۰. تغییرات سالیانه بزرگی زمین‌لرزه‌های رخ داده در شعاع ۳۰ کیلومتری سد قبر در دوره ۲۰۰۰ تا ۲۰۱۸.



شکل ۱۱. عمق زمین‌لرزه‌های رخ داده در محدوده سد سلمان فارسی قبل و بعد از آبگیری.

۴. بحث

سال ۱۹۷۱ ثبت شد که همراه با ۲۰ پس‌لرزه بود. هیچ پیش‌لرزه‌ای ثبت نشده بود. از این جهت (نداشتن پیش‌لرزه)، این مورد با الگوی موردانتظار زمین‌لرزه‌های القایی متفاوت است. سد و مخزن گرنکاروو (Grancarevo) یک سد بتنی قوسی است که بر روی سنگ آهک‌های دوران مزوزوئیک قرار گرفته است که دارای انواع و اقسام گسل‌ها و درزوشکاف‌ها می‌باشد و به شدت کارستی است. تعداد زمین‌لرزه‌های ثبت شده پس از ساخت سد در محدوده شعاع ۲۰ کیلومتری به مرکزیت سد حدود ۳۰ برابر شده است و مقدار انرژی آزاد شده در اثر زمین‌لرزه نیز حدود ۳ برابر شده است. بنابراین مشاهده می‌شود که در این سد تاثیر آبگیری سد به صورت افزایش تعداد زمین‌لرزه‌ها، ظاهر شده است. اغلب زمین‌لرزه‌های حادث شده در محدوده سد گرنکاروو از نوع زمین‌لرزه‌های بسیار کوچک بوده است ولی در سطح فعالیت‌های لرزه‌ای کوچک، یک تغییر بسیار بزرگ در تعداد زمین‌لرزه‌ها وجود داشته است در حالی که انرژی کل صادر شده از این زمین‌لرزه‌ها با نسبت بسیار کمتری افزایش یافته است

مطالعات زیادی در دنیا بر روی لرزه‌خیزی القایی در سدهای مختلف انجام شده است. سد اوندفودا (Oued Fodda) در الجزایر، بر روی سنگ‌های آهکی درزدار متعلق به دوره ژوراسیک بنا شده است. داده‌های خاصی در مورد لرزه‌خیزی منطقه قبل از احداث سد موجود نمی‌باشد. آبگیری سد در اواخر سال ۱۹۳۲ شروع شده و چندین زمین‌لرزه در سال ۱۹۳۳ گزارش شد. این زمین‌لرزه‌ها که در طول ماه می ادامه یافتند، تنها در مجاورت مخزن سد گزارش شدند، یکی از تفسیرها این بود که لایه خشک زمین واقع در زیر طاقدیس در محل سد، در اثر تراوش آب مخزن، اشباع و متورم شد و در نتیجه موجب وقوع زمین‌لرزه‌ها شد (حیدرزاده، ۱۳۸۹). سد ووگلس (Vouglans) یک سد بتنی قوسی بر روی سنگ آهک قرار گرفته است. آبگیری سد در سال ۱۹۶۸ آغاز شد و اولین بار در سال ۱۹۶۹ به صورت کامل پر شد. سپس سد در سال ۱۹۷۱ خالی شد و دوباره در ژوئن سال ۱۹۷۱ پر شد. یک زمین‌لرزه با بزرگای ۵ در ۲۱ ژوئن

وزن آب می‌تواند باعث تغییر در فعالیت لرزه‌ای منطقه شود.

تالوانی (۱۹۹۷) پاسخ لرزه‌خیزی مخزن را به دو دسته زمانی لرزه‌خیزی اولیه و لرزه‌خیزی طولانی‌مدت تقسیم کرده‌است. او با بررسی لرزه‌خیزی القایی مخزن چند سد بیان کرده‌است که لرزه‌خیزی اولیه حاصل از تأثیر لحظه‌ای بارگذاری (یا تخلیه) و اثر تأخیری انتشار فشار منفذی است. پس از این فعالیت اولیه، فرکانس و بزرگی زمین‌لرزه‌ها افزایش می‌یابد. بزرگ‌ترین رویداد مرتبط معمولاً پس از اتمام آبگیری مخزن و رسیدن به حداکثر سطح آب اتفاق می‌افتد. تأخیر بین شروع پر کردن و رویدادهای بزرگ‌تر از ماه‌ها تا سال‌ها متغیر است و با مخزن و خصوصیات ساختگاه محلی ارتباط دارد. یک ثبات کلی و (معمولاً) فقدان لرزه‌خیزی در زیر عمیق‌ترین بخش مخزن و لرزه‌خیزی گسترده در حاشیه، مهاجرت به خارج در یک یا چند جهت وجود دارد. این دوره افزایش لرزه‌خیزی به‌دنبال تنزل تدریجی در فعالیت (در طی ماه‌ها یا سال‌ها) به سطوح پیش از آبگیری است، که نشان از پایان پاسخ الاستیک پس از آن تا آبگیری دارد. در مورد لرزه‌خیزی طولانی‌مدت، مدل سازی نشان می‌دهد که افزایش فشار منافذ که باعث لرزه‌خیزی می‌شود، با فرکانس و دامنه تغییرات سطح دریاچه ارتباط دارد (روولف، ۱۹۸۸). تغییرات پیک در فشارهای منفذی به‌طور مستقیم در زیر دریاچه رخ می‌دهد و با دور شدن از آن کاهش می‌یابد. تغییرات مقاومت نشان می‌دهد تأخیر در رابطه با سطح دریاچه است. در این دسته، لرزه‌خیزی هم در زیر عمیق‌ترین بخش مخزن و هم در مناطق اطراف دیده می‌شود. لرزه‌خیزی برای دهه‌ها ادامه دارد و به‌نظر نمی‌رسد که از بین برود (تالوانی، ۱۹۹۷). همان‌طور که تالوانی (۱۹۹۷) بیان کرده‌است وضعیت قرارگیری گسل نسبت به مخزن سد و نوع آنها نیز می‌تواند در لرزه‌خیزی منطقه مؤثر باشد.

رشد ۸ برابری در تغییرات آهنگ لرزه‌خیزی خود می‌تواند دلیلی بر تأثیر سد بر زمین‌لرزه‌های اتفاق افتاده در منطقه

(گوپتا، ۲۰۰۲؛ فانگویان و بوچانگ، ۱۹۹۷). سد سلمان فارسی از نظر ساختگاه همانند سدهای ذکر شده بر روی سازند آهکی واقع شده‌است.

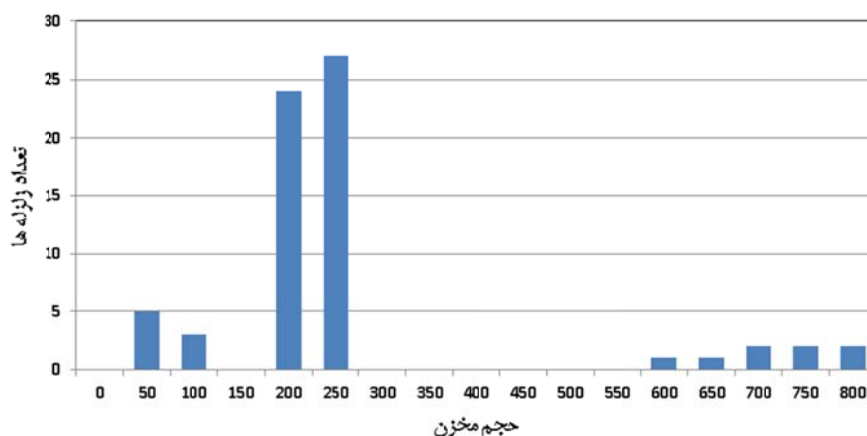
بررسی زمین‌لرزه‌های اطراف سدهای بزرگ کشور همانند سدهای لتیان، لار، شیرین دره و تجن (حافظی مقدس و عسگری، ۱۳۸۴) و در منطقه زاگرس همانند سد کرخه (حیدرزاده و میرمحمد حسینی، ۲۰۱۴؛ حافظی مقدس و همکاران، ۱۳۹۳) کارون ۳ (حافظی مقدس و همکاران، ۱۳۹۳؛ حافظی مقدس و عسگری، ۱۳۸۴)، گتوند علیا (ابراهیمی و تاتار، ۱۳۹۷)، سد داریان (شیرزادی و معهود، ۱۳۹۷) و سد مسجد سلیمان (ابراهیمی و تاتار، ۱۳۹۱) حاکی از پتانسیل آنها جهت ایجاد زلزله‌های القایی می‌باشد. فراوانی زمین‌لرزه‌های القایی سدها در مناطق مختلف تکنونیک کشور با هم متفاوت است. در منطقه زاگرس که از نرخ فعالیت بالاتری برخوردار است تعداد زمین‌لرزه‌های القایی فراوانی بیشتری نسبت به دیگر مناطق دارد. کمترین فراوانی زمین‌لرزه‌های القایی مربوط به کپه داغ می‌باشد (حافظی مقدس و عسگری، ۱۳۸۴).

تعداد زلزله‌ها در سد سلمان فارسی بعد از آبگیری سد افزایش داشته و عمق آنها به‌دلیل تعداد کم اطلاعات عمق مربوط به قبل از آبگیری قابل مقایسه نمی‌باشد (در بیشتر زلزله‌ها عمق صفر ثبت شده است). تغییر در عمق و تعداد زلزله‌ها پیش از این در مطالعه انجام شده بر روی سد کرخه (حیدرزاده و میرمحمد حسینی، ۲۰۱۴؛ حافظی مقدس و همکاران، ۱۳۹۳)، سد کارون ۳ (حافظی مقدس و همکاران، ۱۳۹۳؛ حافظی مقدس و عسگری، ۱۳۸۴) و سد گتوند علیا (ابراهیمی و تاتار، ۱۳۹۷)، سد شیرین دره در کپه‌داغ (حافظی مقدس و عسگری، ۱۳۸۴) و سد سلمان فارسی (ابراهیمی و تاتار، ۱۳۹۱) مشاهده شده‌است.

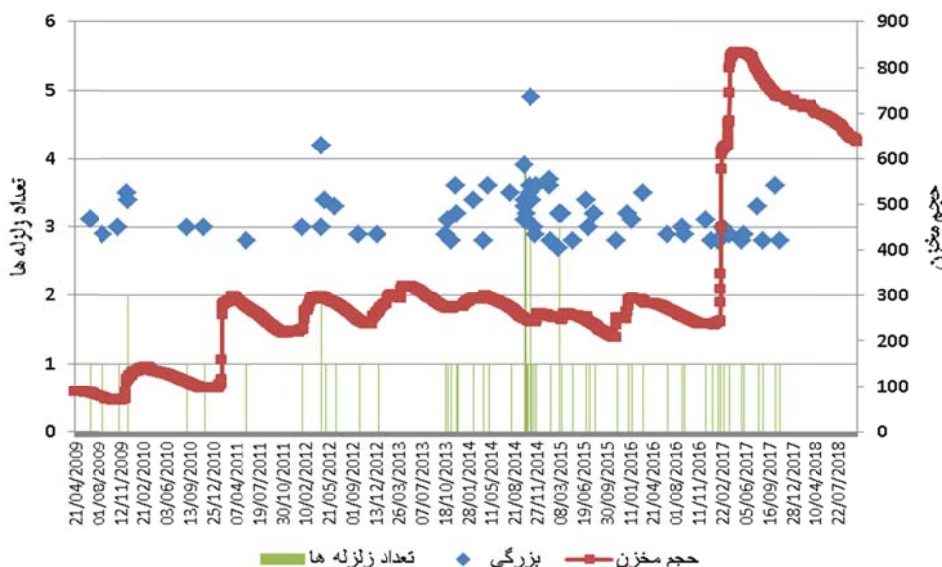
با توجه به سیمپسون و همکاران (۱۹۸۸) دو نوع پاسخ به آبگیری سدهای بزرگ وجود دارد که عبارت‌اند از پاسخ‌های سریع و تأخیری. دو مکانیسم مرتبط با این پاسخ‌ها به ترتیب شامل افزایش در تنش به‌دلیل بارگذاری مخزن و انتشار فشار منفذی است. افزایش تنش ناشی از

یا آبیاری، این پارامتر دقیقاً و اغلب توسط اپراتور سد اندازه‌گیری می‌شود. اندازه‌گیری روزانه با دقت سانتیمتر معمولاً در دسترس است. حجم آب در مخزن نیز معمولاً از طریق شناخت هندسه حوضه تخمین زده می‌شود. به‌منظور بررسی تغییرات لرزه‌خیزی با حجم مخزن، داده‌های حجم مخزن به ۱۶ دسته با طول ۵۰ تقسیم شد و تعداد زمین‌لرزه‌های مربوط به هر دسته محاسبه شد؛ نمودار شکل ۱۲ حاصل این محاسبه است. همان‌طور که در این نمودار مشاهده می‌شود حجم مخزن از دو جامعه آماری تشکیل شده یکی مربوط به حجم بین ۵۰ تا ۳۰۰ دربرگیرنده سال آبی ۲۰۱۱-۲۰۱۰ و دیگری مربوط به حجم ۶۰۰ تا ۸۰۰ است که دربرگیرنده سال آبی ۲۰۱۷-۲۰۱۶ می‌باشد.

باشد. این افزایش تغییرات در لرزه‌خیزی پیش از این در مطالعه انجام شده بر روی سد کرخه واقع در کمربند چین خورده فعال زاگرس در یک دوره ۱۰ ساله قبل و بعد از آبیاری سد (حیدرزاده و میرمحمد حسینی، ۲۰۱۴) نیز مشاهده شده‌است به‌گونه‌ای که در سد کرخه آهنگ تغییرات رشد ۳ برابری را نشان داده‌است. بنابراین همان‌طور که دیده می‌شود پاسخ سریع به دلیل افزایش در تنش به دلیل بارگذاری مخزن در این مورد مشاهده می‌شود. حداکثر بارگذاری حاصل از مخزن آب در مورد سد سلمان فارسی ۱۲ بار می‌باشد. واضح‌ترین پارامتر برای اندازه‌گیری عمق آب در مخزن سد معمولاً عمیق‌ترین قسمت مخزن است. به دلیل اهمیتش در بهره‌برداری از نیروگاه‌ها و



شکل ۱۲. تغییرات تعداد زمین‌لرزه با حجم مخزن در محدوده‌ای به شعاع ۳۰ کیلومتری از سد قیر در دوره زمانی ۲۰۰۹ تا ۲۰۱۸.



شکل ۱۳. تغییرات تعداد زمین‌لرزه با حجم مخزن به صورت روزانه در محدوده‌ای به شعاع ۳۰ کیلومتری از سد قیر در دوره زمانی ۲۰۰۹ تا ۲۰۱۸.

تنها با افزایش تعداد روزهای تک زمین‌لرزه‌ای همراه بوده‌است.

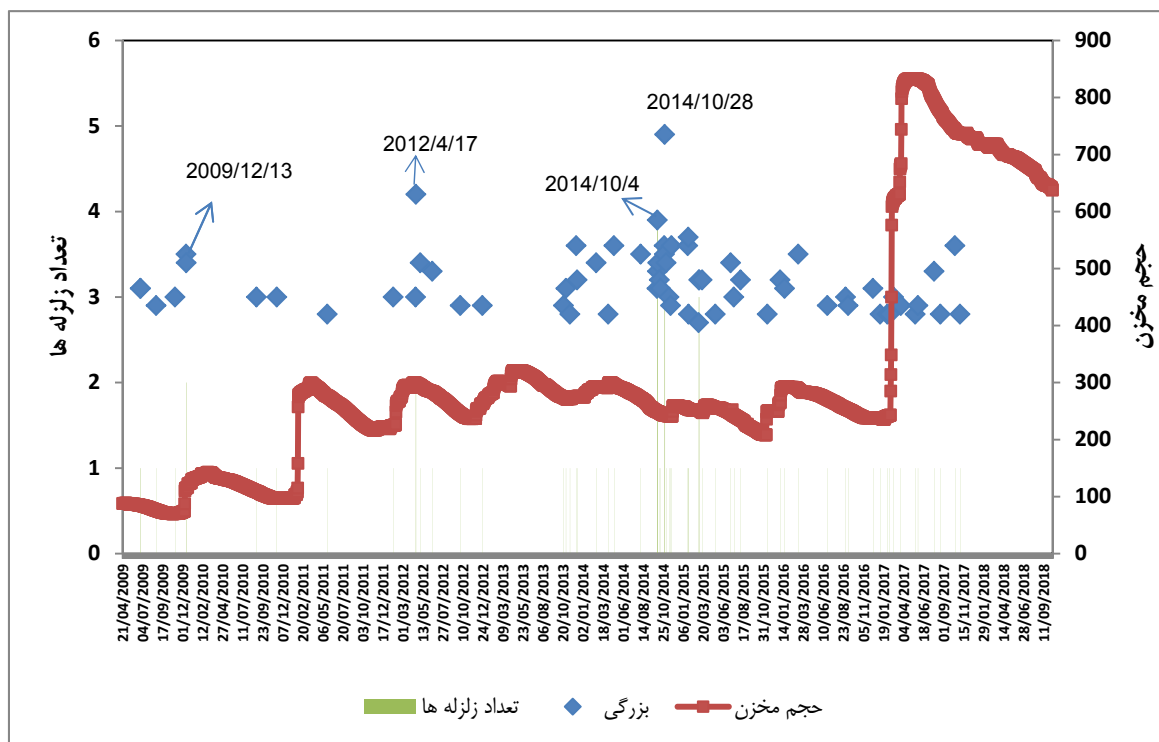
همان‌طور که در شکل ۸ دیده می‌شود و در بالا هم توضیح داده شد با تغییر در تراز سطح آب بر تعداد زمین‌لرزه‌ها بعد از آبرگیری افزوده شده‌است و رابطه مستقیمی بین آنها وجود دارد. چنین رفتاری در مطالعات سدهای کرخه و کارون ۳ (حافظی مقدس و همکاران، ۱۳۹۳) و سد سلمان فارسی (ابراهیمی و تاتار، ۱۳۹۱) نیز گزارش شده‌است.

۱۱ مرحله آبرگیری و تخلیه در مخزن سد سلمان فارسی در این بازه زمانی اتفاق افتاده‌است که در جدول ۲ مشاهده می‌شود. افزایش و کاهش مدت روز هر چرخه بر تعداد زمین‌لرزه‌ها تأثیر داشته‌است. هر مرحله شامل یک دوره آبرگیری و یک دوره تخلیه است. به عبارت دیگر در این بازه زمانی مجموعاً ۲۲ بار سد دستخوش آبرگیری و تخلیه شده‌است.

همان‌طور که در نمودار شکل ۱۳ مشاهده می‌شود با افزایش حجم مخزن از سال ۲۰۰۹ تا سال ۲۰۱۰ علاوه بر افزایش تعداد روزهایی که زمین‌لرزه تک اتفاق افتاده، تعداد زمین‌لرزه‌های با دو زمین‌لرزه در روز نیز افزایش داشته‌است. در ادامه به دلیل بارندگی‌های سال آبی ۹۰-۱۳۸۹ (۲۰۱۱) افزایش ناگهانی در نمودار حجم مخزن مابین سال ۲۰۱۰ تا ۲۰۱۱ دیده می‌شود که تا سال ۲۰۱۶ به صورت خطی ادامه یافته‌است این تغییر نیز با افزایش تعداد روزهای با زمین‌لرزه تک و همچنین دو بازه زمانی با تعداد دو زمین‌لرزه در روز، سه بازه زمانی با تعداد سه زمین‌لرزه در روز و یک بازه زمانی با تعداد ۴ زمین‌لرزه در روز همراه بوده‌است. به دنبال آن به دلیل بارندگی‌های سال آبی ۹۶-۱۳۹۵ (۲۰۱۷) افزایش ناگهانی دوم در نمودار حجم مخزن مابین سال ۲۰۱۶ تا ۲۰۱۷ اتفاق افتاده‌است که تا سال ۲۰۱۸ به صورت خطی با روند صعودی ادامه یافته‌است. این تغییر تا مدت‌زمان مورد بررسی

جدول ۲. مرحله‌های آبرگیری و تخلیه در سد سلمان فارسی.

شماره مرحله	طول مرحله (روز)	تعداد زمین‌لرزه	میانگین بزرگی در هر دوره
۱	۲۲۹	۴	۳
۲	۴۲۰	۴	۳/۲
۳	۳۷۱	۲	۲/۹
۴	۲۹۹	۵	۳/۴
۵	۴۱۵	۶	۳/۱
۶	۳۱۶	۱۵	۳/۴
۷	۸۹	۷	۳/۳
۸	۲۵	۲	۳/۲
۹	۲۳۵	۵	۳/۱
۱۰	۴۶۳	۹	۳
۱۱	۶۰۷	۱۰	۳



شکل ۱۴. تراز آب مخزن، بزرگی زمین لرزه و تعداد آن به صورت روزانه در بازه زمانی ۱۸ ساله از سال ۲۰۰۹ تا ۲۰۱۸.

در این بخش نشان می‌دهد که فعالیت زمین ساختی در یال جنوبی تاقدیس چنگال بیشتر از یال شمالی است و در بخش شرقی آن تعداد درزه و شکستگی‌ها افزایش داشته‌است. تاقدیس چنگال نسبت به تاقدیس پلنگ که در مجاورت آن قرار دارد از فعالیت زمین ساختی بیشتری برخوردار است. در تمام یازده مرحله از آبگیری و تخلیه مخزن سد زمین لرزه‌های با بزرگی سه به بالا وجود دارد. برخی از این زمین لرزه‌ها چند روز بعد از آبگیری یا تخلیه اتفاق افتاده‌اند و برخی دیگر با فاصله ماهانه از بارگذاری و باربرداری اتفاق افتاده‌اند. تعداد زمین لرزه‌های با بزرگی سه و بیشتر در هنگام تخلیه مخزن سد بیشتر از تعداد آنها در هنگام آبگیری است. این در حالی است که مجموع تعداد روزهای آبگیری سد بیشتر از تعداد روزهای تخلیه است که مویده این موضوع است که بزرگ‌ترین رویداد مرتبط معمولاً پس از اتمام آبگیری مخزن و رسیدن به حد اکثر سطح آب اتفاق می‌افتد.

گوپتا و همکاران (۱۹۷۲) با بررسی داده‌های واقعی زمین لرزه‌های القایی در سدهای مختلف جهان دریافتند که زمین لرزه‌های القایی معمولاً دارای عمق و بزرگای

چهار زمین لرزه بزرگ منطقه در این محدوده در شکل ۱۴ مشخص شده‌است. زمین لرزه‌های ۲۰۰۹/۱۲/۱۳ و ۲۰۱۲/۰۴/۱۷ به گسل قیر که در بخش جنوب غربی محدوده قرار دارد نسبت داده شده‌است که زمین لرزه ۲۰۰۹/۱۲/۱۳ شش ماه پس از آبگیری سد و همزمان با شروع آبگیری مرحله دوم اتفاق افتاده‌است و زمین لرزه دوم ۷۴ روز پس از آبگیری سد در مرحله چهارم در تاریخ ۲۰۱۲/۰۴/۱۷ اتفاق افتاده‌است. زمین لرزه‌های ۲۰۱۴/۱۰/۰۴ و ۲۰۱۴/۱۰/۲۸ به ترتیب با بزرگی ۳/۹ و ۴/۹ به گسل قطع کننده تاقدیس چنگال نسبت داده شده‌اند و هر دو در زمان تخلیه مرحله ششم سد به وقوع پیوسته‌اند. بررسی مقادیر b در این محدوده نشان دهنده مقادیر ۰/۴۴ تا ۰/۸ برای سمت جنوبی محدوده و ۰/۸۰ تا ۱/۲۰ برای سمت شمالی محدوده است و به همان نسبت قبل از آبگیری سد پراکندگی رومرکز زمین لرزه‌ها بعد از آبگیری سد در محدوده جنوب غربی سد سلمان فارسی بیشتر شده‌است. احتمالاً بتوان علت آن را وجود سازند آهکی آسماری جهرم که دارای شکستگی‌های زیاد است در این بخش خواند. مطالعات طالبی و همکاران (۱۳۹۱)

آب مخزن و تعداد زمین‌لرزه‌ها نیز همبستگی مشاهده شد. در این سد ۱۱ مرحله آبیگیری و تخلیه در مخزن در بازه زمانی ۲۰۱۸-۲۰۰۹ اتفاق افتاده است که افزایش و کاهش مدت روز هر چرخه (یک دوره آبیگیری و تخلیه) بر تعداد زمین‌لرزه‌ها تأثیر داشته است.

مراجع

ابراهیمی، م. ر. و تاتار، م.، ۱۳۹۱، توزیع بر خالی (فرکتالی) لرزه‌خیزی القایی در مخزن سد مسجد سلیمان (جنوب غرب ایران)، م. فیزیک زمین و فضا، ۳۸(۲)، ۱۵-۲۷.

ابراهیمی، م. ر. و تاتار، م.، ۱۳۹۷، مدل سازی تنش القایی ناشی از وزن دریاچه گتوند علیا بر روی گسل گلستان، م. علوم زمین، ۲۷(۱۰۷)، ۲۰۲-۱۹۳.

اسلامی، آ. و اشعری، ع.، ۱۳۸۹، گزارش زمین‌لرزه ۱۳۸۹/۸/۱۵ خاور درود، تهران، پژوهشگاه بین المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله.

اجل لوثیان، ر. و صالحی، م.، ۱۳۷۹، نگرشی بر زمین‌شناسی مهندسی سد قیر، چهارمین همایش انجمن زمین‌شناسی ایران

حافظی مقدس، ن. و عسگری، ق.، ۱۳۸۴، زمین‌لرزه‌های القایی مرتبط با برخی از سدهای مهم ایران، مجموعه مقالات نهمین همایش انجمن زمین‌شناسی ایران، تهران، دانشگاه تربیت معلم تهران، ۱۸۰-۱۷۰.

حافظی مقدس، ن.، امید، پ.، دولویی جوان، غ. و حسینی، ز.، ۱۳۹۳، زلزله‌های القایی در ساختگاه سدهای کرخه و کارون ۳، م. انجمن زمین‌شناسی مهندسی ایران، ۷(۳-۴)، ۸۴-۷۱.

حیدرزاده، م.، ۱۳۸۹، مطالعه عوامل مؤثر در ایجاد زلزله‌های القایی در مخازن سدهای بزرگ، انتشارات بنیاد نخبگان نیروهای مسلح جمهوری اسلامی ایران، تهران-ایران.

حیدری، ر. و میرزایی، ن.، ۱۳۸۸، الگوی لرزه‌زمین‌ساختی گسل اصلی عهد حاضر زاگرس بین ۳۳ تا ۳۵ درجه

کمتری هستند. درمورد سد سلمان فارسی نیز هر دو پارامتر عمق زلزله و بزرگای آن در اثر آبیگیری مخزن کاهش یافته است و این افزایش تقریباً دو برابر لرزه‌خیزی سد کرخه در مطالعات حیدرزاده و میرمحمد حسینی (۲۰۱۴) بوده است و رفتارشان مشابه سدهای مسجد سلیمان، کارون ۳، داریان و گتوند علیا است که همگی در محدوده زمین‌ساختی زاگرس قرار دارند. البته مانند سد مسجد سلیمان رفتار مهاجرتی در زلزله‌های منطقه مشاهده نشد. ساختگاه سد سلمان فارسی همانند سدهای ووگلنس، گرنکاروو و اوندفودا بر روی سنگ‌های آهکی دارای شکستگی واقع شده است و همانند سدهای گرنکاروو و اوندفودا اغلب لرزه‌خیزی در اطراف محدوده مخزن سد اتفاق افتاده است. با توجه به نتایج (اجل لوثیان و صالحی، ۱۳۷۹) و نتایج مطالعه سد اوندفودا (حیدرزاده، ۱۳۸۹) می‌توان تراوش آب مخزن به لایه‌های زیرین و اشباع آنها را دلیل وقوع زمین‌لرزه‌ها دانست.

۵. نتیجه گیری

فعالیت لرزه‌ای در محدوده سد سلمان فارسی (قیر) از طریق بررسی زمین‌لرزه‌های رخدادده در ناحیه مخزن سد در یک بازه زمانی از سال ۲۰۰۰ تا ۲۰۱۸ مورد مطالعه قرار گرفت. در هنگام پر کردن سد، افزایش قابل توجهی در آهنگ لرزه‌خیزی کم عمق مشاهده می‌شود که دلالت بر اثر سد بر زمین‌لرزه‌های کم عمق دارد. با توجه به تغییرات بزرگی و تعداد مشخص می‌شود که با آبیگیری سد در این منطقه به تعداد زمین‌لرزه‌ها افزوده شده و از بزرگی آنها کاسته شده است. این زمین‌لرزه‌ها می‌تواند زمین‌لرزه‌های القایی باشد.

برپایه ارزیابی لرزه‌ای در ساختگاه سد تعداد زمین‌لرزه‌ها در بازه زمانی نه‌ساله بعد از آبیگیری ۸ برابر تعداد زمین‌لرزه‌ها در بازه زمانی نه‌ساله قبل از آبیگیری مخزن سد است. علاوه بر این آبیگیری مخزن رفتار لرزه‌ای محل سد را تغییر داده است به طوری که در منطقه زمین‌لرزه‌های بیشتر با بزرگی کمتر مشاهده می‌شود. بین نوسانات سطح

- هجدهمین کنفرانس ژئوفیزیک ایران، ۶۷۳-۶۷۶. طالبی، ا.، گنجویان، م.، مفاخریان، ع.، هاشمی، ض. و رمضانی، م.، ۱۳۹۱، ارزیابی ریخت زمین ساخت تاقدیس‌های منطقه قیر و کارزین (جنوب شرق شیراز)، فصلنامه علمی پژوهشی زمین‌شناسی محیط زیست، ۶۳-۵۱، (۲۱)۶.
- مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی، ۱۳۹۶، گزارش فوری مقدماتی زلزله ۲۱/۰۸/۱۳۹۶ کرمانشاه-سرپل ذهاب. مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی، تهران-ایران.
- Berberian, M., 1976, an explanatory note on the first seismotectonics map of Iran; a seismotectonics review of the country, geological survey of Iran, Rep., 39, 7-141.
- Dojchinovski, D., Olumceva, T., Dimiskovska, B., Pekevski, L. and Guoxin, W., 2012, Estimating Reservoir Induced Seismicity RIS Potential, 15 WCEE. C., LISBOA.
- Ellsworth, W., 2013, injection induced earthquakes, science. J.
- Fangquan, L. and Bochong, Z., 1997, Possibility of reservoir induced seismicity around three gorges dam on Yangtze river, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. J., 34.
- Gupta, H., 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., Rastogi, B. and Narain, H., 1972, Common features of the reservoir-associated seismic activities, Bulletin of the Seismological Society of America, 62, 481-492.
- Heidarzadeh, M. and Mir-mohammad Hosseini, S. M., 2014, Preliminary evaluation of induced seismicity at the Karkheh dam site in southwest Iran, Structural Engineering and Geotectonics. J., 4, 1-8.
- McCully, P., 1996, Silenced Rivers: The Ecology and Politics of Large Dams, Zed Books P., London.
- McGarr, A., Simpson, D. and Seeber, L., 2002, case histories of induced and triggered seismicity, Geophysics. J. Int., 647-661.
- Mirzaei, N., Gao, M. and Chen, Y., 1998, Seismic source regionalization for seismic zoning of Iran: major seismotectonic provinces, earthquake. J., 7, 465-495.
- Simpson, DW, Leith, W. and Scholtz, CH., 1988, Two types of reservoir-induced seismicity, Bull. Seismol. Soc. Am., 75, 2025-2040.
- Talwani, P., 1997, on the nature of reservoir-induced seismicity, Pure and Applied Geophysics, 150, 473-492.
- عرض شمالی، م. فیزیک زمین و فضا، ۳۵(۳)، ۸۳-۹۶. شرکت آب منطقه ای، ب. آ.، ۱۳۹۷، شرکت مدیریت منابع آب ایران، معاونت طرح و توسعه، بازیابی از <http://daminfo.wrm.ir>
- سازمان هواشناسی کشور، ا. ه.، ۱۳۹۷، شرکت مدیریت منابع آب ایران، معاونت طرح و توسعه، بازیابی از <https://www.irimo.ir/far>
- شرکت آب منطقه ای فارس، ۱۳۹۷، اطلاعات سدهای مخزنی کشور، بازیابی از <http://frrw.ir>
- شیرزیدی، ر. ا. و معهود، م.، ۱۳۹۷، بررسی تأثیر آبرگیری سد داریان بر لرزه‌خیزی منطقه، مجموعه مقالات

Induced seismicity assessment in Salman-Farsi Dam (Ghir), Iran

Sahraei, H.^{1*}, Alavi, S. A.² and Ehteshami Moinabadi, M.³

1. Ph.D. Student, Faculty of Earth Science, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran

2. Professor, Faculty of Earth Science, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran

3. Assistant Professor, Faculty of Earth Science, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran

(Received: 10 July 2019, Accepted: 29 Sep 2020)

Summary

Nowadays investigating the reservoir induced seismicity phenomenon (RIS) is one of the important subjects because of the extension of dammings in Iran and the potential hazards that they may cause. The phenomenon of dam-triggered earthquakes is known as reservoir-induced seismicity (IRS). It has been expressed through earthquakes with magnitudes ranging from 3 to 6.3 on the Richter scale. For the last 70 years, over 80 cases of RIS have been reported such as Lake Mead, USA, Kremasta, Greece, Oued Fodda in the world and Lar, Latian, Shirin dare, Masjed Soleiman, Karkheh and Karun dams in Iran.

Salman-Farsi (Ghir) dam is a two arched gravity concrete dam that is located at 30 km from northeast of Ghir town in Fars province. Geographically, the dam is located at 28° 30' N latitude and 53°15' E longitude. It is situated in Zagros fold-thrust belt zone. This zone is active in the view of seismology and tectonic activates. The lithology of the site dam is mostly limestone with fracture zones in it. The impounding of Salman-Farsi dam started from April 2009 (1st day of Ordibehesht 1388) which has experienced 9 water years after filling up to now. The maximum and minimum entrance annual water amounts are 347 and 125 million m³ belongs to the 1396 and 1392, respectively.

We used earthquakes data from Iranian seismological centre (ISC) and dam's data to study the impoundment effects in 9 years period before and after the filling from 2000 to 2018. The studied region is a circle with 30 km radius from the dam where it is in the centre. The area of this circle is 2826 km² include 134 earthquakes from 2000 to 2018. There is one historical earthquake with magnitude 7.1 which belongs to 1440 in this region.

Statistical results present an increase in seismicity rate change, number of earthquakes, and reduction in the depths and magnitudes of them. The Number of earthquakes after the filing period is 4.7 times more than before it. There are earthquakes with magnitudes ranging from 3 to more than 3 in all stages of loading and unloading. The average depth of earthquakes is 15 km before the reservoir impounding that is reduced to 10 km after it. The growth of seismicity rate changes 7 times more than that before. Comparison of seismic data and reservoir water level fluctuations indicates that between the water level and changes of seismic activity of the area, there is a correlation. Some of the earthquakes have occurred a few days after the reservoir impounding and others have occurred after a monthly period from its first filly time. Based on the evaluation of seismicity in the dam site, most earthquakes have occurred in the vicinity of the reservoir dam and seismic response has been rather fast. Furthermore, we suggest that the occurred earthquakes have an induced seismicity nature. In fact, the reservoir impounding has changed the seismic behaviour of the dam site so that the region experiences more earthquakes with smaller magnitudes. This dam does not have the immigrant behaviour in earthquake locations as some other dams in this region such as Masjed Soleiman, have shown.

Keywords: Salman-Farsi, Induced Seismicity, Seismic Response, Dam, Zagros.

* Corresponding author:

h.sahraee.88@gmail.com