

## بررسی تنش و زمین‌لرزه القایی ناشی از مخزن سد رودبار لرستان

حمیدرضا شریفی<sup>۱</sup> و زهره سادات ریاضی راد<sup>۲\*</sup>

<sup>۱</sup> دانشجوی دکترا، گروه مهندسی نفت، مواد و معدن، واحد تهران مرکزی، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

<sup>۲</sup> دانشیار گروه زمین‌شناسی، واحد چالوس، دانشگاه آزاد اسلامی، چالوس، ایران

(دریافت: ۱۴۰۴/۰۳/۰۹، پذیرش: ۱۴۰۴/۰۷/۱۱)

### چکیده

ساختن سد در یک منطقه باعث وارد شدن تنش به محیط اطراف و رخداد زمین‌لرزه‌های القایی می‌گردد. این مطالعه در محدوده سد رودبار لرستان بخشی از ایالت لرزه‌زمین‌ساخت زاگرس انجام شده است، که رخداد زمین‌لرزه‌ها با بزرگی‌های متفاوت از ویژگی‌های این ایالت لرزه‌زمین‌ساختی می‌باشد. با در نظر گرفتن بارگذاری چرخه‌ای در محدوده سد و جهت‌گیری آن، مکان و عمق گسل‌ها را می‌توان نسبت به مخزن سد، مدل‌سازی کرد. زمین‌لرزه‌های القایی مخزن که در نتیجه یک شکست برشی در امتداد یک صفحه گسلی می‌باشند، در این مطالعه مورد بررسی قرار گرفت. با فرض این که رویدادها از قانون توزیع گوتنبرگ-ریشتر تبعیت می‌کنند، چگونگی توزیع تنش ناشی از وزن دریاچه رودبار روی نزدیک‌ترین گسل‌های سد رودبار لرستان مدل‌سازی گردید. محل مخزن سد توسط ۱۰ گسل محصور شده است که فعال‌ترین گسل‌ها در نزدیک‌ترین منطقه به ساختگاه سد، گسل F1 در بالا دست و گسل F10 در پایین دست، مورد بررسی قرار گرفت. متغیرهای مختلف تنش ناشی از مخزن سد در مقاطع مختلف و مقادیر تغییرات تنش در فاصله‌ها و اعماق مختلف محاسبه گردید. نتایج ناشی از مدل‌سازی انجام شده نشان می‌دهد که تنش‌ها در غرب منطقه مورد مطالعه به خصوص در محدوده گسل لهری بعد از آبیگری سد بیشتر شده است. روند زمین‌لرزه‌های القایی سد رودبار لرستان، جهت شمال غرب-جنوب شرق را نشان می‌دهد.

**کلمه‌های کلیدی:** تنش القایی، سد رودبار، فشار آب منفذی، زمین‌لرزه القایی، معیار کلمب

## ۱ مقدمه

لرزه‌خیزی پیرامون مخازن سدها در نتیجه بار گذاری اولیه پشت سد و پاسخ غیرزه‌کشی مخزن است که در اثر توزیع آب در زیر مخزن و افزایش فشار منفذی در سنگ‌های زیرین آن رخ می‌دهد، (علی‌پور و همکاران، ۱۳۹۰). فعالیت‌های انسانی می‌تواند باعث تغییرات وضعیت تنش ساختگاه و زمین‌ساخت باشد که باعث ایجاد زمین‌لرزه‌های القایی می‌گردد. از میان زمین‌لرزه‌های القایی، آبرگیری مخازن سدها، باعث ایجاد بزرگ‌ترین زمین‌لرزه‌های القایی شده‌اند، (سعیدیان و همکاران، ۱۳۹۱). زلزله‌های القایی نه تنها در اثر آبرگیری دریاچه سدها، بلکه در هنگام تخلیه دریاچه‌ها نیز ممکن است رخ دهند. محل احداث اکثر سدهای ایران در مناطق لرزه‌خیز، کوهستانی و در دره‌ها واقع شده است، از سوی دیگر به دلیل پراکندگی گسل‌ها در مناطق کوهستانی و فرسایش شیب دامنه آن‌ها خطراتی را برای سد به دنبال خواهد داشت؛ از این‌رو لزوم مطالعات دقیق‌تر در خصوص زلزله‌های القایی مخزن ضروری به نظر می‌رسد. براساس توزیع سکونت‌گاه‌های انسانی و مراکز مهم اقتصادی عوامل لرزه‌خیزی در نواحی گوناگون مورد بررسی قرار می‌گیرد. براساس تجربیات موجود در مورد مخزن سدهای بزرگ با ژرفای آب بیش از ۸۰ تا ۱۰۰ متر می‌توان وقوع زمین‌لرزه‌های با بزرگای ۵/۶ را انتظار داشت. البته ذکر این نکته مهم است که معمولاً زمین‌لرزه‌های القایی بزرگ در نواحی با زمین‌ساخت جنبی و احتمال گسیختگی کواترنری رخ می‌دهد، (تاتار و همکاران، ۱۳۹۰). از سوی دیگر امکان گسیختگی سطحی زمین‌لرزه‌ای نیز در لرزه‌خیزی القایی وجود دارد. مثلاً زلزله ۱۹۶۷ سد کوینا در هند (سیمپسون و همکاران، ۱۹۸۸؛ گوپتا، ۲۰۰۲) با وقوع ۳۰ سانتی‌متر تغییر مکان سطحی در راستای یک گسل کواترنری که از یکی از جناح‌های مخزن سد عبور می‌کند، همراه بود. براساس تحقیقی که در ایالات متحده آمریکا انجام گرفته است توسط تزریق ۲۳ میلیون

لیتر مکعب آب در صفحه گسلش، ۴۶ مورد زلزله در طی یک ماه و تزریق ۱۸ میلیون مترمکعب آب، ۱۳ مورد زلزله در طی یک ماه ثبت گردید، در حالی که قبل از تزریق آب، ۱۲ زلزله در طی یک سال ثبت شد (گوپتا، ۲۰۰۲). بسته به میزان نفوذپذیری و شکستگی‌های موجود در سنگ، ممکن است ماه‌ها یا سال‌ها طول بکشد تا اثر فشار منفذی به دورن پوسته توزیع شود. در پایان زمانی که پالس فشار منفذی به منطقه ترک‌های ریز برسد، آب با فشار وارد ترک‌ها و سبب کاهش تنش عادی روی گسل و در نتیجه آن موجب چکانیده شدن زمین‌لرزه القایی می‌شود (راستگویی، ۲۰۰۳). نمونه‌های کلاسیک از این نوع دسته سدهای اسوان و کوینا هستند. پاسخ تأخیری در مخزن سد اسوان هفده سال پس از شروع آبرگیری آن (سیمسون و همکاران ۱۹۸۸؛ سلیم و همکاران، ۲۰۰۲) و در سد کوینا چهار سال پس از آغاز آبرگیری مخزن رخ داد (تالوانی، ۲۰۰۰؛ گوپتا، ۲۰۰۲ و ۲۰۰۵).

توزیع برخالی (فرکتالی) لرزه‌خیزی القایی در مخزن سد مسجد سلیمان واقع در زون لرزه‌خیز زاگرس، نشان می‌دهد که همبستگی خوبی بین بعد برخالی (D) و تغییر روند لرزه‌خیزی منطقه (b) وجود دارد. این امر می‌تواند دلیلی بر وقوع زمین‌لرزه‌های القایی در منطقه باشد (ابراهیمی و تاتار، ۱۳۹۱). در بررسی‌های صورت گرفته بر روی زمین‌لرزه‌های سد مخزنی شهید رجایی که در دامنه شمالی و جنوبی البرز خاوری و بخشی از ایران مرکزی می‌باشد، بخش جنوبی سد، پهنه پتانسیل لرزه‌زایی بالایی دارد که در ارتباط با گسل‌های آستانه، فیروزکوه و مشاء می‌باشد. نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که لرزه‌خیزی القایی عمدتاً در اثر کاهش تراز آب به وقوع پیوسته است (سعیدیان و همکاران، ۱۳۹۱). تنش القایی در سد گتوند علیا که بر روی رودخانه کارون احداث شده بود توسط ابراهیمی و تاتار (۱۳۹۷) و حافظی و همکاران (۱۳۹۳) مورد مطالعه قرار گرفت. آن‌ها تنش ناشی از مخزن را در

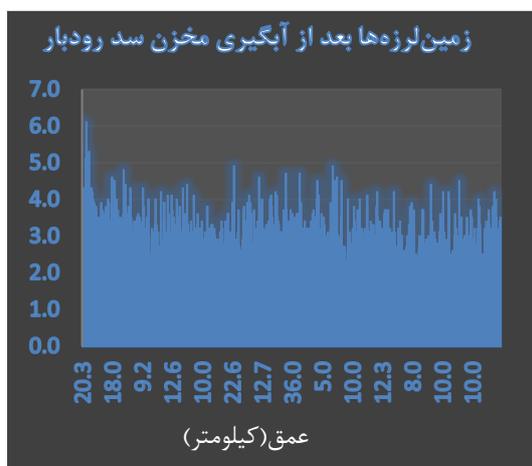
سد رودبار لرستان و نیروگاه آن بر روی رودخانه رودبار، از سرشاخه‌های شرقی حوزه آبخیز رودخانه دز و در فاصله حدود ۱۰۰ کیلومتری جنوب شهرستان الیگودرز در استان لرستان واقع گردیده است. شکل ۱ نشان می‌دهد که مورفولوژی رودخانه رودبار در این محدوده و چرخش مسیر آن در پایین دست محل احداث سد به گونه‌ای است که اختلاف ارتفاعی طبیعی حدود ۳۰۰ متر را در محلی که رودخانه الکن قرار دارد، ایجاد می‌کند (شرکت توسعه منابع آب و نیروی ایران، ۱۳۹۲). مساحت حوضه آبریز رودخانه تا محل احداث سد خاکی رودبار لرستان ۲۲۵۵ کیلومترمربع و میزان متوسط جریان سالانه رودخانه در محل سد، معادل  $30/2$  مترمکعب در ثانیه می‌باشد. حداقل دبی ماهیانه رودخانه پس از برداشت‌های بالادست در حدود  $4/1$  مترمکعب بر ثانیه و حداکثر آن در حدود  $250/5$  مترمکعب بر ثانیه می‌باشد. همچنین آورد سالیانه این رودخانه ۹۵۷ میلیون مترمکعب و حداکثر سیلاب محتمل حوضه در حدود ۳۷۳۴ مترمکعب بر ثانیه می‌باشد (شرکت توسعه منابع آب و نیروی ایران، ۱۳۹۲). این منطقه به عنوان بخشی از پهنه لرزه‌زمین‌ساختی زاگرس می‌باشد که رخداد زمین‌لرزه‌ها با بزرگی‌های متفاوت از ویژگی‌های این ایالت لرزه‌زمین‌ساختی می‌باشد (آمبرسایز و ملویل، ۱۹۸۲). گسیختگی که در زیر محور سد رخ می‌دهد می‌تواند توزیع تنش درون گسل‌های منطقه را تغییر دهد که به فعال شدن گسل‌های غیرفعال می‌انجامد. مطالعات انجام شده نشان می‌دهد که در اکثر موارد، زمین‌لرزه‌های القایی با زمین‌لرزه‌های طبیعی مشابه بوده و بزرگی آن به زمین‌ساخت منطقه وابسته است. همچنین احتمال وقوع این زمین‌لرزه‌ها در درون مخزن یا نزدیک آن بیشتر بوده و تا بازه زمانی ۱۰ سال بعد از احداث سد می‌تواند به وقوع بپیوندد. در این مطالعه کلیه زمین‌لرزه‌های قبل از احداث سد از سال ۱۳۸۶ تا ۱۳۹۵ و دوره بعد از آبخیزی از ۱۳۹۶ تا ۱۴۰۲ مورد بررسی قرار گرفت (شکل ۲).

بخش‌های کم‌عمق و عمیق گسل محاسبه نمودند و نتیجه گرفتند که در بخش‌های عمیق، این تنش موجب پایداری گسل و در نتیجه تأخیر در زمان بروز گسیختگی در همه شیب‌ها می‌شود. ارزیابی لرزه خیزی القایی در سد سلمان فارسی قیر، بیانگر افزایش تغییرات آهنگ لرزه خیزی، افزایش در تعداد و کاهش عمق و بزرگی زلزله‌ها بعد از آبخیزی سد می‌باشد (صحرائی و همکاران، ۱۳۹۹).

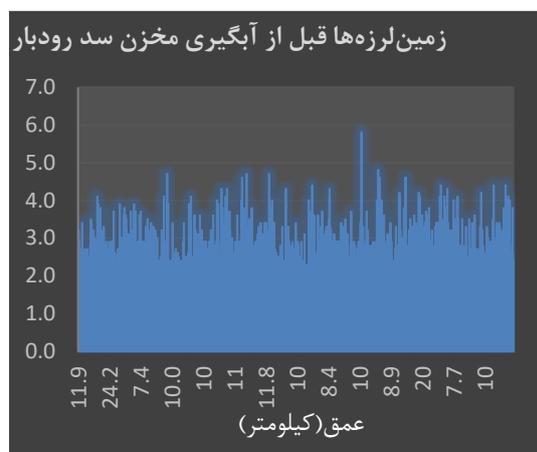
تأثیر فشار هیدرودینامیکی مخزن سد ناشی از زلزله در نتایج تحلیل دینامیکی سه بعدی سدهای سنگ‌ریزه‌ای با رویه بتنی نشان می‌دهد که مدل‌سازی آب مخزن بصورت المان‌های آکوستیک در محیط لاگراژی می‌باشد. این امر سبب افزایش تنش کششی رویه و کاهش تغییر مکان افقی تاج و بدنه سد می‌گردد، (شاهوردی طرخورانی و میرمحمد حسینی، ۱۳۹۸؛ شب‌خانه و میرقاسمی، ۱۴۰۰). زمین‌لرزه‌های القایی بعد از آبخیزی سد البرز در دو دوره باربرداری مورد بررسی قرار گرفت که نشان دهنده گسترش فشار آب منفذی متناسب با تراوایی سنگ، بین آبخیزی سد و بالا رفتن فشار منفذی و در نتیجه لرزه‌خیزی تأخیری وجود دارد (ملک‌زاده و رکنی، ۱۴۰۰). این تأخیر موجب می‌شود که زمین‌لرزه‌ها در عمق و فاصله بیشتری از سد رخ داده و با توجه به درگیری طول و سطح بیشتری از شکستگی‌ها، اختلاف تنش کمتری را برای فعالیت گسل‌های فعال بر اساس معیار گسیختگی کلمب فراهم سازد. با توجه به نوساز بودن سد رودبار لرستان که شروع عملیات اجرایی ساخت سد ۱۳۸۶ و شروع آبخیزی اولیه ۱۳۹۶ می‌باشد، هنوز مطالعه‌ای در این خصوص انجام نشده است، در این پژوهش با استفاده از نتایج بررسی سایر پژوهشگران و داده‌های زمین‌شناسی و لرزه‌ای در محدوده سد رودبار لرستان به مطالعه زلزله‌های القایی ناشی از ساخت و آبخیزی سد رودبار لرستان و ارتباط این زمین‌لرزه‌ها با سایر پارامترهای زمین‌شناسی پرداخته شده است.



شکل ۱. نمایی از سد رودبار لرستان.



(ب)



(الف)

شکل ۲. زمین لرزه‌های به‌وقوع پیوسته در محدوده سد رودبار، الف) قبل از آبیگیری سد ب) بعد از آبیگیری سد.

گستره مورد مطالعه به شعاع ۱۰۰ کیلومتر پیرامون نقطه مرکزی سد رودبار، براساس تقسیم‌بندی زمین‌ساختی ایران توسط بربریان (۱۹۷۶) در واحد زمین‌ساختی زاگرس و قسمت کوچک‌تری از گستره در محدوده شمال و شمال خاوری، در کمربند سنندج - سیرجان قرار دارد. کمربند سنندج - سیرجان از نظر ساختاری دارای روندی همانند زاگرس (روند چیره شمال باختری - جنوب خاوری) می‌باشد و بوسیله راندگی اصلی زاگرس از آن جدا شده است و در واقع بخشی از ایران مرکزی را تشکیل می‌دهد. کمربند سنندج - سیرجان از کمربند چین خورده ساده و فعال زاگرس توسط زونی باریک بنام کمربند زاگرس مرتفع جدا می‌شود. ریخت‌شناسی امروزی کمربند چین خورده - رانده شده فعال زاگرس نتیجه تکامل ساختاری و

## ۲ روش پژوهش

زمین‌شناسی عمومی و ساختاری منطقه نقش مهمی در ایجاد زمین لرزه‌های القایی دارد. در این مطالعه، براساس زمین‌ساخت و الگوی ساختاری ساختگاه سد از دیدگاه نوزمین‌ساختی، تنشهای منطقه مورد ارزیابی قرار گرفت. سپس بر اساس شواهدی دال بر فعال بودن گسل‌های اصلی منطقه، به‌ویژه ساختگاه سد، مدلسازی انجام گرفت. از جمله مطالعات ساختاری، تحلیل سینماتیک گسل‌های فعال اصلی موجود در منطقه شامل گسل پیرامون سد، با تکیه بر روش برگشتی، وضعیت تنش نوزمین‌ساختی در منطقه را مشخص گردید.

## ۱-۲ زمین‌ساخت و الگوی ساختاری سد رودبار لرستان

زمین شناسی سازمان زمین شناسی (به مقیاس ۱:۲۵۰۰۰۰) و نگاره‌های ماهواره‌ای (LANDSAT 7) استفاده شده است و گسل‌های واقع در شعاع ۳۰ کیلومتری ساختگاه سد با استفاده از تصاویر هوایی (به مقیاس ۱:۵۵۰۰۰) و نقشه‌های توپوگرافی (به مقیاس ۱:۵۰۰۰۰) و عملیات صحرایی مورد بررسی قرار گرفت. بر اساس مطالعات موجود می‌توان اظهار کرد که گسل‌های موجود در گستره مطالعه اساساً دارای روند شمال باختر- جنوب خاور بوده و عملکرد آن‌ها به صورت معکوس، گسل‌های رانده و معکوس واقع در جنوب و شمال ساختگاه سد و گسل‌های پنهان در زیر تاقدیس‌ها دارای سازوکار راستالغز که پاره‌های مختلف گسل جوان زاگرس است، می‌باشند. از آنجائی که بخش جنوب و جنوب خاوری گستره مطالعه در واحد چین خورده ساده زاگرس واقع شده است و اکثر گسل‌های معکوس موجود در این واحد از نوع پنهان می‌باشند، توجه به نحوه مدل‌سازی این گونه چشمه‌های لرزه‌ای بسیار مهم خواهد بود. گسل‌های مهم گستره طرح (به شعاع ۱۰۰ کیلومتر از ساختگاه سد) به اختصار در جدول ۱ آورده شده‌اند. همچنین موقعیت این گسل‌ها در شکل ۳ به تصویر درآمده است.

## ۲-۳ گسل‌های گستره مؤثر و نزدیک به ساختگاه سد

گسل سراوند - بز نوید یکی از پاره‌های اصلی گسل اصلی جوان زاگرس است که با یک آرایش پلکانی پرش به راست در جنوب خاور گسل دورود واقع شده است. این گسل بعنوان نزدیک‌ترین گسل اصلی به ساختگاه سد رودبار لرستان شناخته می‌شود. گسل سراوند - بز نوید یک گسل کاملاً مشخص و جوان است، (شکل ۴ و شکل ۵الف). گسل اسلام‌آباد از گسلی است با درازای پیرامون ۱۵ کیلومتر که از محل مخزن سد می‌گذرد. این گسل سازنده یک پرتگاه گسلی در محل روستاهای اسلام‌آباد

تاریخچه رسوبگذاری آن قرار دارد. ابتدا در مرحله پلاتفرمی در طی پالئوزوئیک، سپس ریفت زایی در پرمین - تریاس، در ادامه حاشیه قاره‌ای غیرفعال در ژوراسیک - کرتاسه آغازی، سپس فرورانش به سمت شمال خاور و جایگزینی افیولیت - رادیولاریت در کرتاسه پایانی، و در نهایت برخورد- کوتاه شدگی در طی نئوژن می‌باشد (بربریان و کینگ، ۱۹۸۱؛ بربریان، ۱۹۸۳؛ سمبرونی و همکاران، ۲۰۲۴). شکل زمین در زاگرس اساساً ساختاری است. چین‌ها در زاگرس، نامتقارن می‌باشند بطوری که سطح محوری آنها به سمت شمال و شمال خاوری شیب دارند. شیب یال‌های جنوبی و جنوب باختری بیشتر است و در بعضی از موارد نزدیک به قائم، برگشته یا گسلی می‌باشد (جکسون و مکزی، ۱۹۸۴؛ دی متس و همکاران، ۱۹۹۰؛ اوتمن و امیر عمر، ۲۰۲۳). توالی پالئوزوئیک زیرین در زاگرس تقریباً بطور کامل ناشناخته است و فقط در یک ناحیه در بخش شمال خاوری کمربند زاگرس (زاگرس مرتفع) مشاهده می‌شود. ساختگاه سد رودبار لرستان در این واحد قرار گرفته است.

## ۲-۲ گسل‌های اصلی

در مناطق لرزه‌خیز همواره رابطه‌ای بین گسل‌های اصلی منطقه و زمین‌لرزه‌های آن وجود دارد. لذا به بررسی گسل‌های موجود در گستره مورد مطالعه بویژه آنهایی که در فاصله کمتری نسبت به مخزن سد رودبار لرستان قرار دارند، پرداخته می‌شود. از طرف دیگر بعلت قرارگیری ساختگاه‌ها در محدوده زاگرس و وجود چین‌های فعال (گسل‌های پنهان) در این محدوده پس از بررسی گسل‌ها به مطالعه تاقدیس‌های فعال و طویل موجود در منطقه مورد مطالعه پرداخته خواهد شد.

در این مطالعه گسل‌های محدوده طرح به شعاع ۱۰۰ کیلومتر پیرامون ساختگاه سد از نقشه‌های زمین‌شناسی شرکت نفت (به مقیاس ۱:۱۰۰۰۰۰۰) و نقشه‌های

(۱۳۹۰). از آنجائی که در حال حاضر دسترسی به تکیه گاه راست در محل این عارضه بطور مستقیم امکان پذیر نیست بنابراین اطلاعات ارائه شده بر اساس مطالعات از فاصله دور و بطور غیر مستقیم (از تکیه گاه چپ) می باشد. این عارضه به عنوان یک صفحه ناپیوستگی (درزه یا گسل) قابل تشخیص است که درازای زیادی ندارد. این صفحه در بخش بالایی (مرتفع تر) بصورت تقریباً قائم و در بخش پایینی با شیب تندی به سمت تکیه گاه راست و به داخل آن امتداد می یابد. موقعیت تقریبی این عارضه در شکل ۷ (الف) نشان داده شده است.

(ده شاهی) و موجرلا می باشد (شکل ۵. ب). در دره محل ساختگاه سد رودبار لرستان یک صفحه گسلی با آینه گسلی کاملاً مشخص و واضح وجود دارد. این گسل تحت عنوان گسل F1 نامیده شده است (شکل ۶). اگرچه گسل مذکور دارای درازای قابل ملاحظه ای نیست و قرارگیری آن در حریم مؤثر به گسل سراوند- بز نوید و داده های سن یابی نشان دهنده جنبایی آن ضمن فعالیت گسل سراوند- بز نوید است. در تکیه گاه راست عارضه ای مشاهده می گردد که در نقشه های زمین شناسی تحت عنوان گسل F10 نام گذاری شده است (شکل ۷)، (علی پور و همکاران،

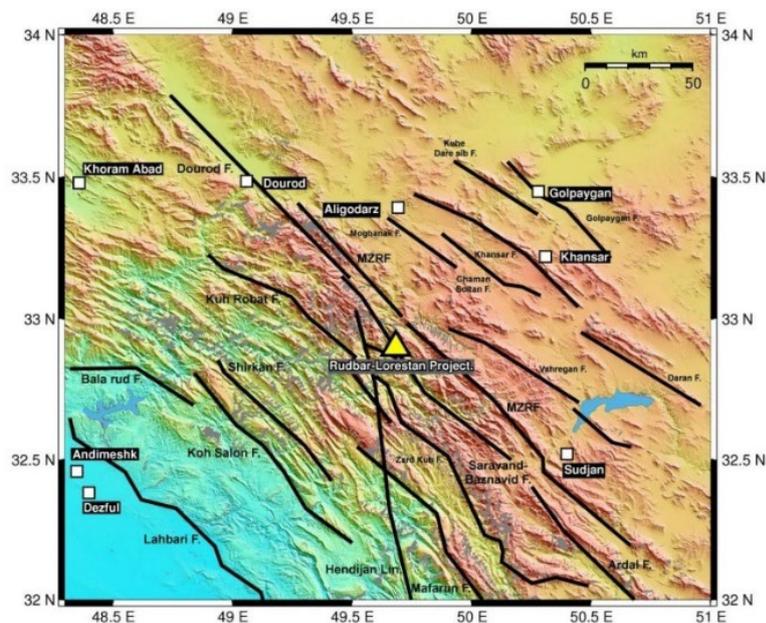
جدول ۱. مشخصات برخی از گسل های مهم و تاقدیس های فعال موجود در ناحیه مورد مطالعه، شعاع ۱۰۰ کیلومتری پیرامون ساختگاه (علی پور و همکاران، ۱۳۹۰).

ردیف	نام گسل	سازوکار گسل	فاصله (کیلومتر)	درازا (کیلومتر)
۱	سراوند - بز نوید (قالی کوه)	راستالغز راستگرد	۱/۶	~۱۰۰
۲	دورود	راستالغز راستگرد	۳۲	~۱۰۰
۳	اصلی معکوس زاگرس	معکوس	۹	>۱۰۰
۴	زرد کوه	معکوس	۱۵	>۱۰۰
۵	اردل	معکوس با مولفه راستالغز	۴۳	۹۰
۶	مافارون	معکوس	۴۰	۹۰
۷	خطواره هندوچان	راستالغز	۱۲	>۱۰۰
۸	کوه رباط	معکوس	۱۷	~۱۰۰
۹	جبهه کوهستان زاگرس	معکوس پنهان	۶۵	~۱۰۰
۱۰	وهرگان	معکوس	۲۱	>۱۰۰
۱۱	مغانک	معکوس	۳۸	۲۵
۱۲	خوانسار	معکوس	۵۷	۸۰
۱۳	چمن سلطان	معکوس	۴۷	۵۰
۱۴	دره سیب	معکوس	۷۴	۴۰
۱۵	داران	معکوس	۷۴	~۶۰
۱۶	* تاقدیس لیلا	معکوس پنهان	۲۶	۵۰
۱۷	* تاقدیس محل باخ	معکوس پنهان	۴۲	۴۵
۱۸	شیرکان	معکوس پنهان	۵۳	~۷۰
۱۹	اسلام آباد	راستالغز	۳	۱۵

\* در مورد تاقدیس ها فاصله سطحی ساختگاه سد تا محور تاقدیس ارائه شده است.



(الف)



(ب)

شکل ۳. الف) بخشی از نگاره ماهواره‌ای Landsat 7 که نشان‌دهنده گسل‌های دورود و سراوند - بزنیوید (قالی کوه) بعنوان پاره‌هایی از گسل اصلی جوان زاگرس در گستره سد است. به جایجایی راستگرد آبراهه‌ها که توسط گسل قالی کوه صورت گرفته توجه شود. ب) گسل‌های فعال اصلی که با خط سیاه و نام با مربع سفید در اطراف سد رودبار لرستان که با ستاره مشخص شده است.

## ۲-۴ اندازه‌گیری سینماتیکی

از مواد و یا کاهش مقاومت سنگ‌ها بر اثر تزریق سیالات و افزایش فشار در درزها، شکاف‌ها و خلل و فرج آنها ایجاد می‌گردند (براجا، ۲۰۱۹؛ تالوانی و همکاران، ۲۰۰۷). از

معمولاً وقوع زمین‌لرزه‌های القایی بر اساس تغییر تنش‌های کلی و مؤثر در نتیجه بارگذاری یا بار برداری حجم عظیمی

تریگو و همکاران، ۲۰۰۲) نشان می‌دهد که یک ارتباط مشخص بین وقوع زمین‌لرزه‌های القایی مخزن و حضور گسل‌های فعال در منطقه سد وجود دارد. اساس روش تحلیل سینماتیکی پی بردن به جهت‌های تنش اصلی است. با داشتن جهت حداکثر برش اعمال شده بر سطح گسل جهت خش لغز و مکانیسم گسل مشخص می‌شود.

عوامل زمین‌شناسی مؤثر بر وقوع زمین‌لرزه القایی شامل ساختارها و قابلیت نفوذپذیری زمین است؛ به نحوی که در دو سد حتی در یک فاصله نزدیک نسبت به هم متفاوت است. گسل‌ها (به ویژه گسل‌های فعال) و شکستگی‌های ناشی از چین‌خوردگی موجب نفوذپذیری آب می‌شود، عاملی که به طور اساسی بر ایجاد زمین‌لرزه القایی مؤثر است. تحقیقات انجام شده (ندل رومرو و همکاران، ۲۰۲۵؛



(ب)

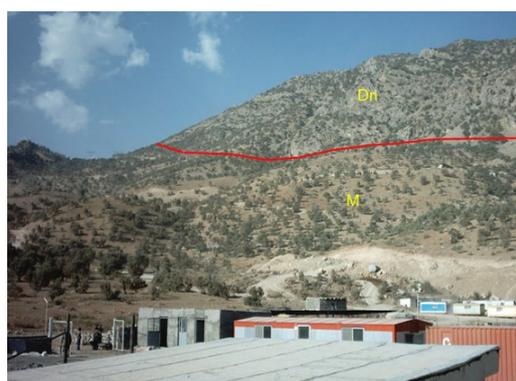


(الف)

**شکل ۴.** الف) نمای از صفحه گسل سراوند - بز نوید در شمال خاور گله مویه در مسیر گله مویه به کیش (نگاه به خاور). پیکان دوطرفه قرمز رنگ در امتداد خش لغزش‌های موجود بر روی صفحه گسل رسم شده است و نشان‌دهنده نوع حرکت راست‌الغز راستگرد می‌باشد. ب) نمای از صفحه گسل سراوند - بز نوید در بالای پرتال خروجی تونل دسترسی T2 (نگاه به خاور).



(ب)



(الف)

**شکل ۵.** الف) نمای از پرتگاه گسل سراوند - بز نوید در شمال کارگاه کیش (نگاه به شمال). Dn نشان‌دهنده آهک‌های متعلق به سازند دالان و M نشان‌دهنده واحدهای سنگی قدیمی‌تر شامل مارن و شیل و... که به رنگ‌های سبز و زرد بر روی زمین مشخص هستند. ب) پرتگاه گسل اسلام آباد در محل روستای اسلام آباد (نگاه به باختر تا شمال باختر). خط زرد رنگ نشان‌دهنده پهنه‌ای است که در آن برش‌های مشکوک به برش گسله است.



(ب)



(الف)

شکل ۶. الف) نمایی از سطح گسل F1 در دره محل ساختگاه سد (نگاه به خاور تا شمال خاور). پیکان دوطرفه قرمز رنگ نشان‌دهنده خش لغزش روی سطح گسل است. ب) نمایی از گسل راست‌الغز در مجاور پرتال ورودی تونل دسترسی T2 در جنوب محور سد (نگاه به جنوب). پیکان دوطرفه قرمز رنگ نشان‌دهنده خش لغزش روی سطح گسل است.



(ب)



(الف)

شکل ۷. الف) نمایی از بخشی از صفحه ناپیوستگی F10 در تکیه‌گاه راست ب) نمایی از گسل F10 در تکیه‌گاه راست.

یک مخزن طبق فرمول (۱) و (۲) انجام می‌گیرد (بل و نور، ۱۹۷۸؛ زوفی و همکاران، ۲۰۲۵):

$$\Delta S = \mu(\Delta \delta_n - \Delta P) - \Delta \tau \quad (1)$$

$$\Delta P = (\Delta P_u + \Delta P_{diff}) \quad (2)$$

## ۲ اندازه‌گیری، مشاهده و محاسبه

زمین‌لرزه‌های القایی مخزن در نتیجه یک شکست برشی در طول یک صفحه گسلی از پیش موجود است. طبق قانون کلمب تغییر توان برشی کل ( $\Delta S$ )، (انرژی در واحد زمان)، در طول صفحه یک گسل از پیش موجود در نتیجه آنگیری

ارتباط بین زمین‌لرزه‌های القایی که با آبرگیری سد رودبار لرستان به وقوع پیوسته‌اند، مورد بررسی قرار گرفت. از بین این زمین‌لرزه‌ها، می‌توان به زمین‌لرزه ۲۰۱۷/۰۱/۲۲ با بزرگای ۴/۵ و عمق ۸ کیلومتری به مختصات ۴۹/۸۶ درجه شرقی و ۳۲/۷۳ درجه شمال در ایستگاه فریدون شهر اصفهان در زمان شروع آبرگیری سد و زمین‌لرزه ۲۰۲۴/۰۶/۲۸ با بزرگای ۳/۸ و عمق ۱۲ کیلومتر به مختصات ۴۹/۴۷ درجه شرقی و ۳۲/۹۳ درجه شمالی در ایستگاه شولاباد لرستان بعد از ۷ سال از آبرگیری مخزن سد به وقوع پیوسته است، اشاره نمود. مرکز زمین‌لرزه القایی در مخزن سد از حدود ۴۰ کیلومتری محل سد دورتر نبوده و تعداد آن‌ها به طور قابل توجهی از تغییرات ارتفاع آب دریاچه سد تبعیت می‌کند. عمق زمین‌لرزه القایی در مخزن سد در حدود ۱۰ کیلومتری سطح زمین و بزرگی آن‌ها حدود ۲ تا ۳ درجه مقیاس امواج محلی و در فاصله حدود ۱۰ تا ۱۵ کیلومتری (مناطق اطراف سد) رخ داده است. سازوکار زمین‌لرزه القایی در اثر آبرگیری مخزن سد تحت تأثیر افزایش فشار آب منفذی است. با افزایش سن سد، عمق زمین‌لرزه‌های به‌وقوع پیوسته بیشتر و فراوانی آن‌ها کم می‌شود. زمین‌لرزه‌های بعد از آبرگیری سد رودبار لرستان افزایش ۷۰٪ را نشان می‌دهد. آبرگیری سد در اوایل ۱۳۹۶ انجام گرفت و تا بزرگ‌ترین ثبت زلزله رخ داده بیش از ۵ در مقیاس محلی در آذر ماه ۱۳۹۸، دو دوره باربرداری یا کاهش سطح آب مخزن در سد اتفاق افتاده است. به کمک برنامه رایانه‌ای که توسط مرسی و همکاران (۱۹۹۱) نوشته شده است و با برداشت تعداد مناسبی از سطح گسل و تعیین جهت حرکت آن، تنش‌های اساسی و در نتیجه سازوکار گسل‌های فعال منطقه شناخته شد (جدول ۲). مشاهدات صحرائی و اندازه‌گیری‌ها در محل حاکی از این است که بدلیل حضور اثر الگوی تابش و جهت‌گیری چشمه لرزه‌زا و حل صفحات گسلی در دسترس (جدول ۲)، می‌توان برآورد راستای عمومی تنش وارده به ساختگاه سد را انجام

که در آن  $\Delta\delta_n$  و  $\Delta\tau$  به ترتیب تنش‌های نرمال و برشی هستند و  $\mu$  ضریب اصطکاک است. تغییر فشار منفذی  $\Delta P$  نیز به دو صورت رخ می‌دهد. به صورت آبی که در واقع در نتیجه پاسخ غیرزهکشی سیال و بارگذاری مخزن است،  $\Delta P_u$  در این حالت سنگ در حال تخلخل، فشرده می‌شود اما سیال‌ها اجازه نفوذ به آن را ندارند. حالت دوم نیز پس از یک تأخیر زمانی با توزیع فشار منفذی  $\Delta P_{diff}$  از مخزن به سنگ‌های پوسته زیرین آن رخ می‌دهد. مقادیر منفی برای  $\Delta S$  نشان دهنده تضعیف پایداری گسل و مقادیر مثبت بیان‌گر تقویت پایداری آن است، بطوری که یک افزایش  $\Delta P$  موجب کاهش پایداری گسل می‌شود.

با نادیده گرفتن اثرات غیر خطی، می‌توان گفت که سطوح زیر سطحی به صورت کشسان با تغییر تنش‌های برشی و عادی روی یک صفحه گسل به بارگذاری مخزن پاسخ می‌دهند، به طوری که افزایش در تنش عادی سبب تقویت پایداری گسل‌های زیر سطحی می‌شود؛ در حالی که تغییر در تنش برشی بسته به جهت‌گیری نسبی گسل به میدان تنش منطقه ممکن است سبب تضعیف یا تقویت گسل شود (ابراهیمی و تاتار، ۱۳۹۷). تغییر پایداری در حالت آبی یا غیر زهکشی  $\Delta S_u$  در نتیجه پاسخ کشسان به بارگذاری مخزن رخ می‌دهد و به صورت معادله (۳) می‌باشد.

$$\Delta S_u = \mu(\Delta\delta_n - \Delta P_u) - \Delta\tau \quad (3)$$

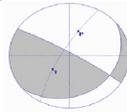
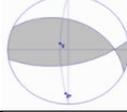
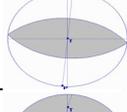
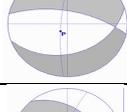
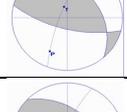
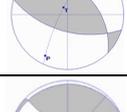
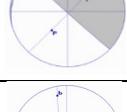
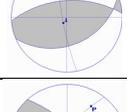
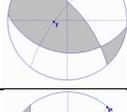
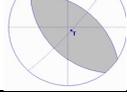
بنابراین با آگاهی داشتن از تاریخچه آبرگیری مخزن، موقعیت گسل نزدیک به سد، جهت‌گیری صفحات گسلی که زمین‌لرزه‌ها روی آن‌ها رخ داده‌اند، می‌توان مقادیر  $\Delta P_u$ ،  $\Delta\delta_n$  و  $\Delta\tau$  را محاسبه نمود. در نهایت می‌توان  $\Delta S_u$  را در منطقه مشخص و سپس توزیع پذیری هیدرولیکی برای شکستگی‌ها را محاسبه نمود. از محاسبه این مقادیر می‌بایست به مدل‌سازی تغییر توان برشی کل در نقاط مختلف گسل در زمان رخداد زلزله دسترسی پیدا کرد.

با استفاده از داده‌های موجود در شبکه لرزه‌نگاری کشوری به همراه ایستگاه‌های نصب شده در اطراف سد،

بنابراین در جنوب خاوری، فرونشست دره سیلاخور، احتمالاً نتیجه حرکات راستگرد کواترنری در امتداد گسل دورود و یک گسل کوچک تقریباً موازی می‌باشد که در طی زمینلرزه ۱۹۰۹ دوباره جنباً شده‌اند. با توجه به اینکه زمین‌لرزه‌ها در زاگرس غالباً در ژرفای بیشتر از ۶ کیلومتر

داد. زمین‌لرزه‌هایی که روی گسل جوان زاگرس مکان‌یابی شده‌اند ارتباط نزدیکی را با پاره گسل‌های منفرد نشان می‌دهند. آن‌ها را به صورت یک دگرریختی امتداد لغز راستگرد کنونی می‌توان در نظر گرفت که کاملاً با دگرریختی‌های کواترنری مشاهده شده، هم‌خوانی دارند.

جدول ۲. حل صفحه گسلی برخی از زمین‌لرزه‌های رویداده در گستره مورد مطالعه.

شماره	تاریخ	زمان	روند	شیب	ریک	سازوکارکانونی
۱	۶۵۰۳۱۰	۰۵۴۴۵۱	۳۲۱	۱۶	۵۱	
۲	۶۶۰۷۲۷	۱۴۴۹۰۴	۳۵	۵۹	۸۰	
۳	۷۷۰۴۰۶	۱۳۳۶۳۸	۵	۴۶	۹۵	
۴	۸۵۰۲۲۷	۰۲۰۶۴۵	۱۹۱	۶۲	۲۸۱	
۵	۷۷۰۶۰۵	۰۴۴۵۰۸	۱۴	۶۶	۱۰۴	
۶	۸۳۰۵۲۸	۱۱۳۵۵۸	۱۶	۵۶	۱۰۶	
۷	۸۳۰۳۰۵	۱۴۲۲۳۶	۱۶۴	۴	۲۵۴	
۸	۸۰۱۰۱۹	۱۷۲۴۱۱	۴	۵۶	۹۴	
۹	۹۰۰۸۰۳	۱۱۵۷۲۰	۶	۳۳	۹۶	
۱۰	۹۰۰۸۰۳	۱۱۵۷۲۰	۶	۳۳	۹۶	

پاره دیگر انتقال می‌یابد. بنابراین بر روی زمین نمی‌توان آن‌را به طور پیوسته دید.

وجود گسل‌های راست‌الغز متعدد در موقعیت " ۵۱/۵ ، ۵۳' ، ۳۲° شمالی و " ۴۵/۹ ، ۴۰' ، ۴۹° خاوری در جنوب محور سد و گسل‌های متعدد راست‌الغز پیرامون ساختگاه سد می‌توانند صحت این رابطه را مشخص نماید. این گسل اصولاً درازای چندانی نداشته و در واقع انتقال دهنده جابجایی از یک زون برشی به زون برشی دیگر است، که در این صورت زون‌های برشی حداقل به اندازه جابجایی راست‌الغز این گسل حرکت رانندگی را در خود جای داده‌اند با وجود زون‌های برشی متعدد پیرامون ساختگاه این امکان نیز دور از انتظار نیست (شکل ۸). گسل F10 علی‌رغم اینکه از فاصله دور آثاری شبیه به خش‌لغزش بصورت افقی بر روی صفحات مجزا دیده می‌شود. ولی آثار جابجایی لایه‌ها حداقل از فاصله دور مشاهده نمی‌شود. امتداد این عارضه به سمت پایین دست قابل پیگیری نیست و احتمالاً در درزه‌ها و یا گسل‌های فرعی پایین دست خاتمه می‌یابد و به سمت بالادست نیز، در زیر رودخانه پنهان شده و در سمت دیگر رودخانه نیز قابل پیگیری نیست. این موضوع نشان می‌دهد که احتمالاً عارضه مذکور در بالا دست یا به گسل F1 متصل می‌شود و یا در زیر رودخانه خاتمه می‌یابد، (شکل ۸). از آنجائی که امکان دستیابی به صفحه این عارضه برای مشاهده مستقیم آثار جابجایی و یا نمونه‌گیری برای آزمایشات سن‌یابی در این مرحله از مطالعات مهیا نیست و به استناد مشاهدات از فاصله دور می‌توان در حال حاضر بطور قطعی عارضه مذکور را یک درزه اصلی در نظر گرفت. با این حال با یک دیدگاه محافظه کارانه جابجایی همراه با جنبش گسل سرآوند-بزنوید برای عارضه مذکور پیرامون ۵ سانتی متر پیشنهاد می‌گردد.

بیشینه بزرگای زمین‌لرزه محتمل در پیوند با گسل سرآوند-بزنوید در زون سنندج - سیرجان با توجه به پایین بودن سطح لرزه‌خیزی این واحد ساختاری بر اساس پذیرش

روی می‌دهند که برای زمین‌لرزه‌های مرتبط با چشمه‌های پوشش رسوبی منطقی باشد. در این صورت با توجه به میزان شیب ۶۰ درجه برای گسل‌های معکوس و ارتفاع توپوگرافی متوسط ۱۵۰۰ متر برای زاگرس چین خورده ساده، پهنای گسیختگی عددی پیرامون ۱۰ کیلومتر را برای رمپ‌های فعال در محدوده مورد مطالعه مشخص شده است. گسل سرآوند-بزنوید در دامنه شمالی ارتفاعات قالی‌کوه سبب جابجایی راستگرد آبراهه‌ها به میزان ۵۰۰ تا ۱۰۰۰ متر شده است. این مسئله به وضوح بر روی تصاویر هوایی و ماهواره‌ای مشاهده می‌گردد. براساس سالیایی (به روش ترمولومینسانس) نمونه‌ای از سطح گسل در بالای پرتال خروجی تونل دسترسی T1 سنی معادل  $400 \pm 3600$  سال بدست آمده است. بنا بر تحقیق کمیته بین‌المللی سدهای بزرگ (ICOLD, Bulletin 112) گسل را می‌توان به عنوان یک گسل جنب‌فعال (فعال) شناخته می‌شود، (پژوهشکده حفاظت و مرمت آثار تاریخی-فرهنگی، ۱۳۸۳). طول‌اندازه‌گیری شده در امتداد گسل مذکور پیرامون ۱۰۰ کیلومتر است و موقعیت صفحه گسلی برداشت شده در بالای پرتال خروجی تونل دسترسی T1، N30W, 70NE است. این گسل در نزدیک‌ترین موقعیتش به ساختگاه سد از فاصله پیرامون ۱۶۰۰ متری جنوب ساختگاه عبور می‌کند. این گسل به وضوح در پای ارتفاعات مشرف به روستای کیش، سازنده یک پرتگاه است. خروجی تونل‌های دسترسی T1 و T2 در این پرتگاه واقع شده‌اند. در محل گسل اسلام‌آباد ضخامت قابل ملاحظه‌ای از برش‌هایی مشاهده می‌شود که مشکوک به برش گسله هستند در عین حال وجود قطعات دولومیتی بدبو و تیره رنگ می‌تواند نشانگر تعلق برش‌های مذکور به سازند هرمز باشد. در هر دو صورت محل مذکور را می‌توان بعنوان منطقه‌ای با آنومالی گسلی شناخت. گسل F1 به سوی شمال و جنوب ادامه دارد ولی جابجایی آن به صورت پلکانی از پاره‌ای به

انتساب بیشینه بزرگای  $M_s = 7/4$ ، نیازی به مدل‌سازی گسل اسلام آباد نمی‌باشد. برآورد توان لرزه‌زایی گسل‌های مهم در منطقه مورد مطالعه در جدول ۳ به آن اشاره شده است. این رخداد موجب افزایش زمین‌لرزه‌ها در ساختگاه سد شده است. بعد از دوره دوم باربرداری، که بیشتر از دوره اول بوده است، چند زمین‌لرزه  $M_L = 3/5$  رخ داده است. پخش فشار آب منفذی با ضریب موسوم به  $c$ ، یکی از دلایل فعال شدن گسل‌های منطقه می‌باشد. بنابراین بین آبیگری سد و بالا رفتن فشار منفذی، تأخیر در لرزه‌خیزی وجود دارد. این پدیده سبب شده است که زمین‌لرزه‌ها در عمق و

گسیختگی ۵۰ درصد از طول این گسل صورت گرفته است. گسل‌های مغانک، خوانسار، وهرگان، چمن سلطان، دره سیب و داران در این دسته قرار می‌گیرند. گسل اسلام آباد با درازای ۱۵ کیلومتر به عنوان شاخه‌ای از گسل سراوند - بز نوید محسوب می‌شود. گسل مذکور بر اساس مدل برش ساده راست‌الغز راستگرد، برش نوع P (برش سری دوم گسل سراوند - بز نوید) می‌باشد. این گسل با توجه درازای نه چندان زیادش احتمالاً به لایه لرزه‌زا نخواهد رسید. بنابراین بهتر است که به عنوان یک چشمه لرزه‌زا در مدل‌سازی‌ها به کار گرفته نشود. لازم به توضیح است که با توجه به نزدیکی گسل سراوند - بز نوید به مخزن سد و نیروگاه و

جدول ۳. برآورد توان لرزه‌زایی گسل‌های مهم گستره طرح.

ردیف	نام گسل	سازوکار گسل	بیشینه بزرگا			
			$M_s$ (4)	$M_s$ (3)	$M_s$ (2)	$M_w$ (1)
۱	سراوند - بز نوید (قالی کوه)	راست‌الغز راستگرد	۷/۴	-	-	۷/۴
۲	دورود	راست‌الغز راستگرد	۷/۴	-	-	۷/۴
۳	اصلی معکوس زاگرس	معکوس	۷/۲	-	-	۷/۲
۴	زرد کوه	معکوس	۷/۲	-	-	۷/۲
۵	اردل	معکوس با مولفه راست‌الغز	۶/۹	-	-	۶/۹
۶	مافارون	معکوس	۶/۹	-	-	۶/۹
۷	خطواره هندیجان	راست‌الغز	۷/۲	-	-	۷/۲
۸	کوه رباط	معکوس	۶/۹	-	-	۶/۹
۹	جبهه کوهستان زاگرس	معکوس پنهان	۷/۲	-	-	۷/۲
۱۰	تاقدیس لایلا	معکوس پنهان	۶/۳	-	-	۶/۳
۱۱	تاقدیس محل باخ	معکوس پنهان	۶/۳	-	-	۶/۳
۱۲	گسل شیرکان	معکوس پنهان	۶/۳	-	-	۶/۳
۱۳	وهرگان	معکوس	۷/۱	۷/۰۵	۷/۱	۷/۰۷
۱۴	مغانک	معکوس	۶/۵	۶/۴	۶/۵۳	۶/۵۱
۱۵	خوانسار	معکوس	۶/۹	۶/۹۱	۶/۹۸	۶/۹۵
۱۶	چمن سلطان	معکوس	۶/۷	۶/۶۲	۶/۷۳	۶/۷
۱۷	دره سیب	معکوس	۶/۵	۶/۴۸	۶/۶	۶/۵۸
۱۸	داران	معکوس	۶/۸	۶/۷۳	۶/۸۲	۶/۸
۱۹	اسلام آباد	راست‌الغز	۶/۴	۶/۳۰	۶/۴۵	۶/۴۷

1- Ghassemi (2016)

2- Wells and Coppersmith (1994)

3- Ambraseys and Melville 1982

4- Final and selected magnitude based on judgment

فاصله بیشتری از سد به وقوع پیوندند. درگیری طول و سطح بیشتری از شکستگی‌ها، باعث ایجاد اختلاف تنش کمتری بر اساس معیار گسیختگی کلمب فراهم ساخته است.

با استفاده از داده‌های ثبت شده در ایستگاه‌های مورد مطالعه از مرداد ۱۳۹۲ تا ۱۴۰۲ (آگوست ۲۰۱۳ تا ۲۰۲۳)، در فواصل کمتر از ۵۰ کیلومتر و ۲۵ کیلومتری محل سد، آزاد شدن انرژی در محدوده سد رودبار مورد بررسی قرار گرفت. در بازه زمانی فوق ۱۷۷۲ رویداد نزدیک‌تر از ۵۰ کیلومتر و حدود ۲۲۵ رویداد خارج از مرزهای شبکه قرار داشتند. برای افزایش صحت فرآیندها در این دوره و فرآیندهای دقیق‌تر برای مرکز و عمق داده‌های ثبت شده توسط ایستگاه‌های گتوند که شامل یک شبکه ریز لرزه‌ای سد علیا که در جنوب غربی این شبکه قرار دارد، استفاده گردید. داده‌های ۴ ایستگاه میان رودان، تنبل، محمد آباد و گتوند، به مطالعه اضافه گردید. براساس داده‌های ثبت شده در ایستگاه‌های لرزه‌ای نصب شده در سد رودبار لرستان، نقشه‌های آزاد سازی انرژی در فواصل مختلف رسم گردید. ایستگاه‌های نصب شده در محدوده مورد مطالعه، مجهز به سنسورهای کوتاه مدت ۱ هرتز و وضوح ۲۴ بیت هستند. بنابراین ثبت کاتالوگ لرزه‌ای با پردازش تمام داده‌های خام استخراج شده، ایجاد می‌شود.

### ۳ بحث

زمین لرزه‌های القایی بسته به نوع گسل، وضعیت تنش حاکم بر گسل و فشار منفذی ناشی از نفوذ آب به زیر مخزن سد متفاوت می‌باشند. تحقیقات انجام گرفته (گون و همکاران، ۲۰۰۵؛ ژو و همکاران، ۲۰۱۰؛ ایمپورتا و همکاران، ۲۰۱۷) نشان می‌دهد که زمین لرزه‌های القایی مخزن عموماً در نقاط انتهایی گسل‌ها، در جاهایی که دو گسل با هم برخورد می‌کنند و نقاطی که در اثر عبور گسل‌ها خرد شده‌اند، نیز رخ می‌دهند. برای مخازنی که تحت رژیم تنش فشاری قرار می‌گیرند، انتظار می‌رود گسلش معکوس در عمق کم، یا

گسلش امتدادلغز روی گسل با شیب زیاد رخ دهد. زمین ساخت حاکم بر منطقه ناشی از گسل اصلی جوان زاگرس است که در موقعیت زمین ساختی متفاوتی نسبت به ایالت لرزه‌زمین ساختی زاگرس قرار گرفته است. لازم به ذکر است که در گستره طرح رژیم زمین ساختی راستالغز بطور غالب وجود نداشته و رژیم حاکم از نوع فشارشی است. (علوی، ۱۹۹۴؛ محمدنیا و همکاران، ۱۳۹۶؛ کریم نژاد لالامی و همکاران، ۲۰۲۰؛ زارعی و همکاران، ۱۴۰۰). بررسی گسل‌ها در محدوده سد نشان می‌دهد که سازوکار غالب آنها رانده است که به سمت شمال خاوری تا شمال شیب داشته و دارای مؤلفه راستالغز راستگرد است. این مؤلفه با توجه به حل صفحات گسلی مشاهده شده است. البته برخی از این گسل‌ها بویژه گسل‌های نزدیک به ساختگاه سد و نیروگاه (گسل‌های قالی کوه و دورود که پاره‌هایی از گسل اصلی جوان زاگرس محسوب می‌شوند) دارای سازوکار راستالغز راستگرد می‌باشند. بنابراین راستای عمومی تنش اصلی بزرگتر در منطقه مورد مطالعه شمال شمال خاوری - جنوب جنوب باختری (SSW- NNE) بدست آمده است.

در طول آبگیری سد به کمک کد zmap در محیط نرم‌افزار متلب و با توجه به داده‌های ثبت شده در ایستگاه‌های شبکه لرزه‌نگاری کشوری و شبکه نصب شده موقت (جدول ۴ و شکل ۹) در مدت زمان قبل از آبگیری سد (شکل ۱۰ الف) و بعد از آن (شکل ۱۰ ب) داده‌های مناسب به دست آمد. که میتوان اقدام به استخراج پارامترهای لرزه خیزی اعم از توزیع زمین لرزه‌ها نسبت به عمق (شکل ۱۱)، ضرایب لرزه‌خیزی موسوم به  $a$ ،  $b$  و  $Mc$  حد آستانه‌ای زمین لرزه (شکل ۱۲ الف و ب)؛ نمود. انرژی زمین لرزه آزاد شده در منطقه قبل از آبگیری سد و بعد از آبگیری سد نسبت به تاریخ احداث (شکل ۱۳ الف و ب) رسم شده است. البته قبل از آن و به منظور حذف زمین لرزه‌های وابسته، پالایش داده‌ها به روش رزبرگ (چن و

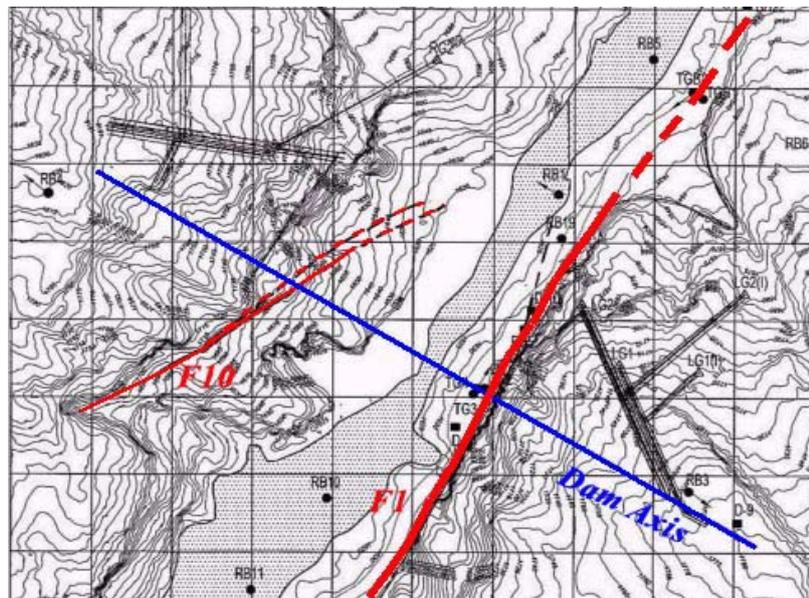
۴-۱ آزادسازی انرژی

برای تعیین کل انرژی لرزه‌ای منتشر شده از یک زلزله، از روش آزادسازی انرژی استفاده می‌شود. ابتدا باید انرژی منتشر شده در تمام فرکانس‌ها، در کل کره کانونی یکپارچه شود. طیف تابش متوسط روی کره کانونی را می‌توان با یک سطح ثابت، تقریب زد. فرکانس‌های پایین متناسب با ممان، (Mo) و کاهش یکنواخت با افزایش فرکانس بالاتر از فرکانس گوشه‌ی (Fc)، رویداد می‌باشد. بنابراین انرژی لرزه‌ای تابعی از هر دو پارامتر Mo و.

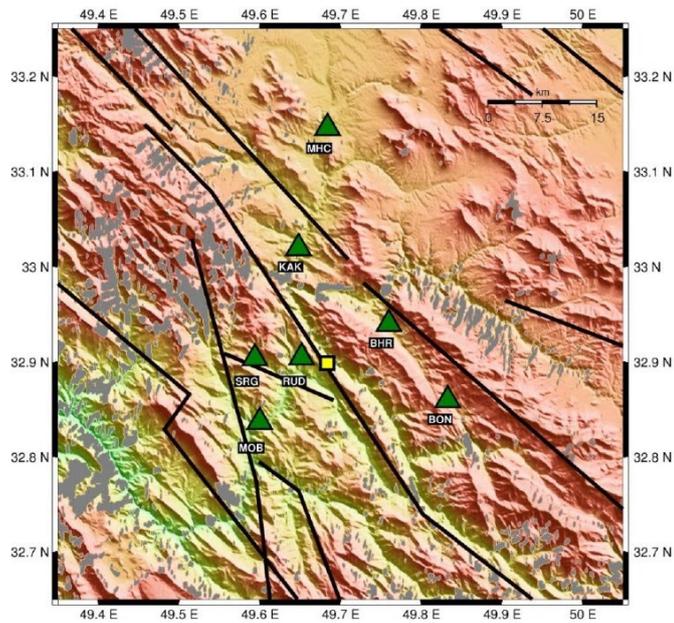
تاوانی، (۲۰۰۱) انجام شد. با توجه به شکل ۱۲ ب، مشاهده می‌شود که اغلب زمین‌لرزه‌های ثبت شده دارای عمق ۵ تا ۱۵ کیلومتری هستند. زمین‌لرزه‌های محدوده مورد مطالعه در فواصل ۳۰ کیلومتری، ۳۰-۵۰ کیلومتری و ۵۰-۱۰۰ کیلومتری مورد بررسی قرار گرفت. شعاع شبکه احداث شده حداکثر در فاصله ۲۸ کیلومتری از محل سد قرار دارد. هرگونه انفجار کوچک در فعالیت‌های ساخت و ساز در اطراف محل یا ایستگاه‌های سد بر اساس لیست دقیق همه انفجارها ثبت شده است و برخی رویدادها با زمان انفجار مطابقت دارند که از کاتالوگ حذف می‌شوند.

جدول ۴. مختصات ایستگاه‌های شبکه سد لرستان رودبار.

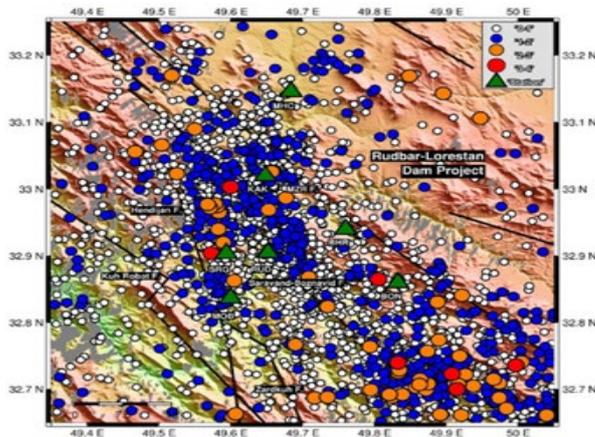
شماره	نام ایستگاه	کد ایستگاه	طول جغرافیایی درجه شرقی	عرض جغرافیایی درجه شمالی
۱	مرکزی	RUD	۴۹/۶۸	۳۲/۹۰
۲	بهرام آباد	BHR	۴۹/۷۶	۳۲/۹۴
۳	بندر	BON	۴۹/۸۳	۳۲/۸۶
۴	کاکلستان	KAK	۴۹/۶۵	۳۳/۰۲
۵	ماهیچال	MHC	۴۹/۶۸	۳۲/۱۴
۶	مبارک آباد	MOB	۴۹/۶۰	۳۲/۸۳
۷	سرقله	SRG	۴۹/۵۹	۳۲/۹۰



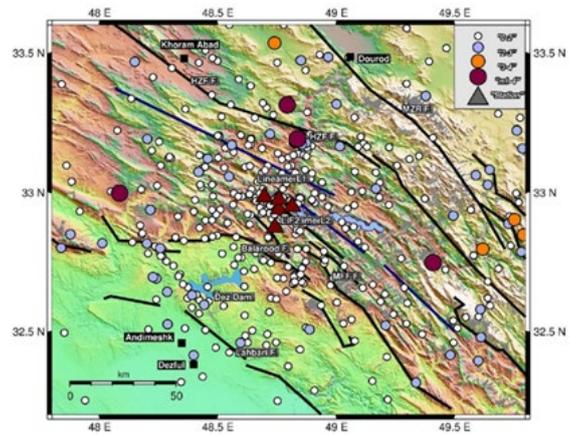
شکل ۸. نمایی از گسل F1 و F10 نسبت به محور سد رودبار (ویرایش نقشه توپوگرافی ۱/۵۰۰۰۰ سازمان زمین‌شناسی کشوری).



شکل ۹. موقعیت ایستگاه های مورد مطالعه، ایستگاه ها با مثلث سبز رنگ و موقعیت سد با مربع زرد نشان داده شده است.



(ب)



(الف)

شکل ۱۰. ثبت زمینلرزه در محدوده سد رودبار (الف) قبل از آبرگیری سد (ب) بعد از آبرگیری سد.

$$M_o = \mu D A$$

(۴)

که

$\mu$ : مدول برشی  $(3 - 6 \times 10^{11}) \text{ dyn/cm}^2$

D: جابجایی متوسط

A: مساحت شکست

با این حال، اگر فقط یک ممان زلزله شناخته شود،

می توان انرژی آزاد شده را محاسبه کرد و انرژی را

می باشد. برای یک ممان معین، انرژی تابیده شده با

افزایش فرکانس گوشه افزایش می یابد. (کاناموری، ۱۹۷۷؛

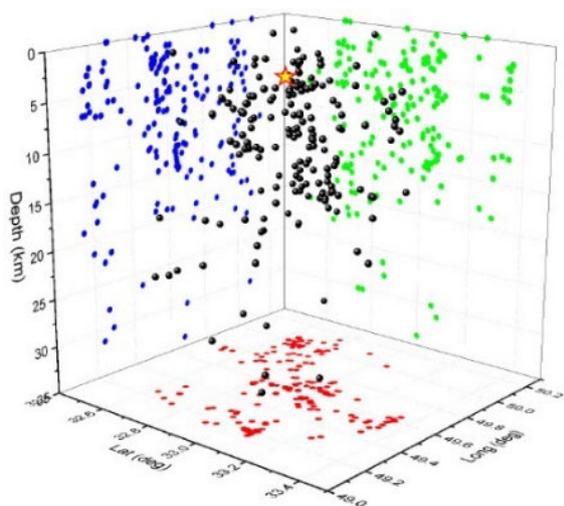
رضاپور و پیرس، ۱۳۸۶؛ پاسبه و علیائی، ۱۳۹۲). اگر دو

زلزله با جابه جایی و گسیختگی یکسان را در نظر گرفته شود

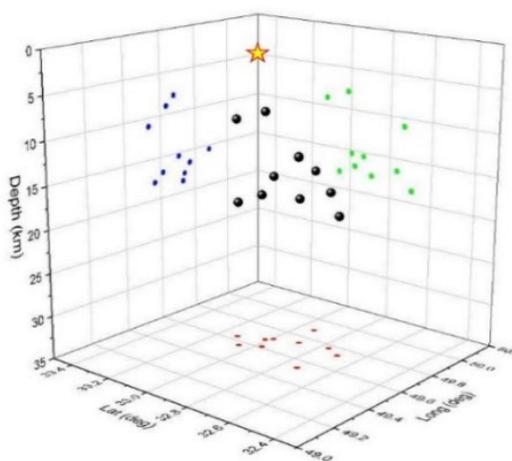
که در سنگ هایی با مدول برشی یکسان همان ممان را

می توان از رابطه ۴ محاسبه کرد (کاناموری، ۱۹۷۷؛ رضاپور

و پیرس، ۱۳۸۶):

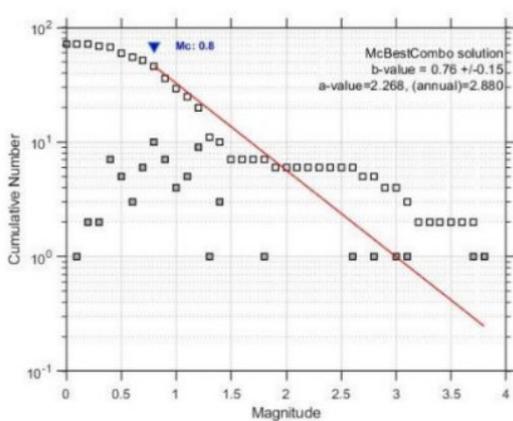


(ب)

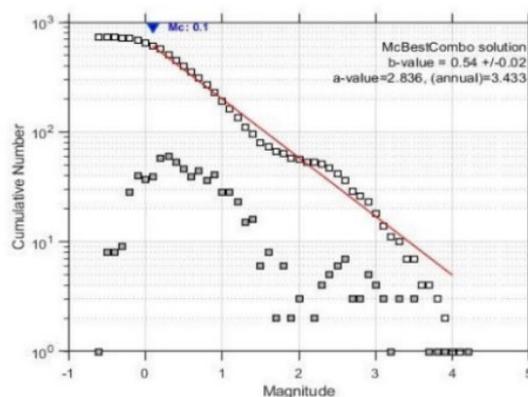


(الف)

شکل ۱۱. توزیع عمق سه بعدی رومرکز زمین لرزه های سد رودبار تا شعاع ۲۵ کیلومتری از سایت سد با عمق وقوع دایره های سیاه، رویدادها، مربع های آبی: طرح ریزی در عمق به طول صفحه، مربع های سبز: طرح ریزی روی صفحه عمقی و مربع های قرمز: طرح ریزی بر روی صفحه طولی. ستاره زرد موقعیت سد را نشان می دهد. (الف) قبل از آبیگری سد، که بزرگ ترین زمین لرزه به وقوع پیوسته در ۲۰۱۷/۱/۲۲،  $ML=4/5$  می باشد (ب) بعد از آبیگری سد، که بزرگ ترین زمین لرزه بعد از آبیگری مخزن در ۲۰۲۴/۶/۲۸،  $ML=3/8$  می باشد.



(ب)



(الف)

شکل ۱۲. پارامترهای لرزه خیزی محدوده سد رودبار (الف) قبل از آبیگری سد (ب) بعد از آبیگری سد.

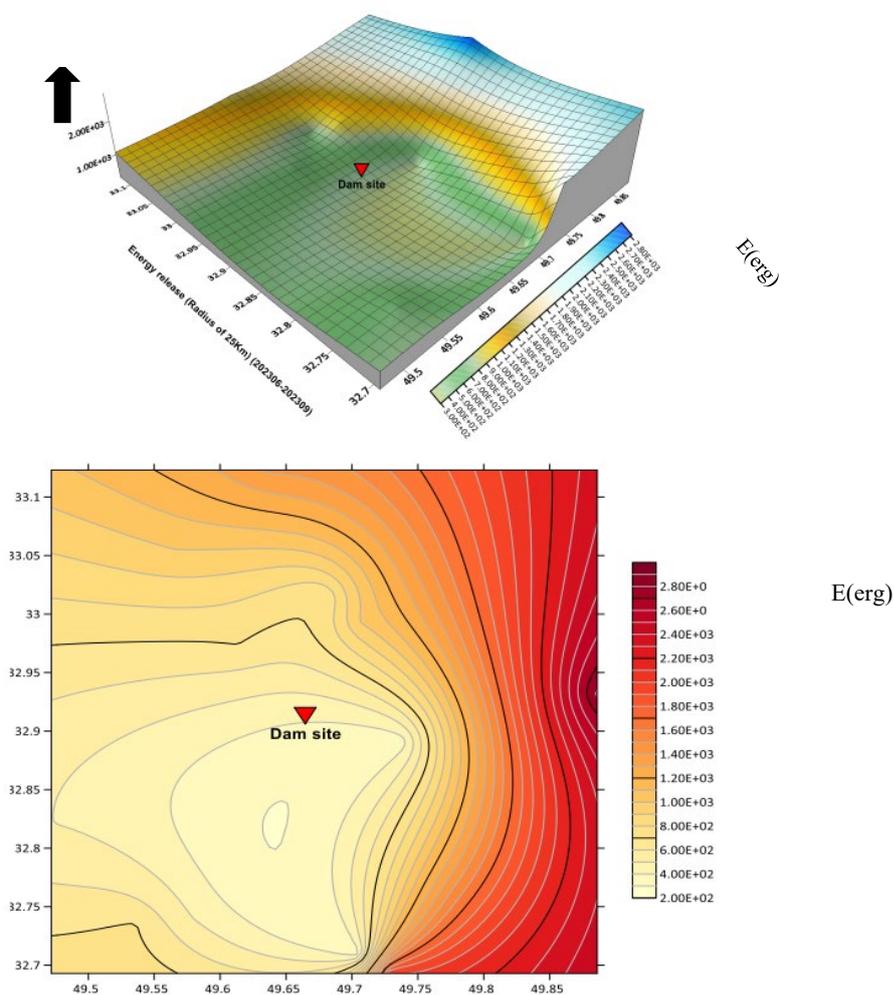
برای هر رویداد، انرژی آزاد شده محاسبه و نقشه شبکه تهیه می گردد. نقشه ها در مجاورت سد رودبار به فاصله های کمتر از ۲۵ کیلومتری، بین ۲۵ تا ۵۰ کیلومتری و بیش از ۵۰ تا ۱۰۰ کیلومتری رسم گردید. در فاصله کمتر از ۲۵ کیلومتری مطابق شکل ۱۳، دو بیک مربوط به رویدادهای

بر اساس بزرگی زلزله و متوسط فرکانس گوشه که به طور سیستماتیک با ممان تغییر می کند، تقریب زد. انرژی موج لرزه ای (E)، ممان (Mo) و بزرگی ممان (MW) در رابطه ۵ مورد استفاده قرار گرفته اند، (کاناموری، ۱۹۷۷):

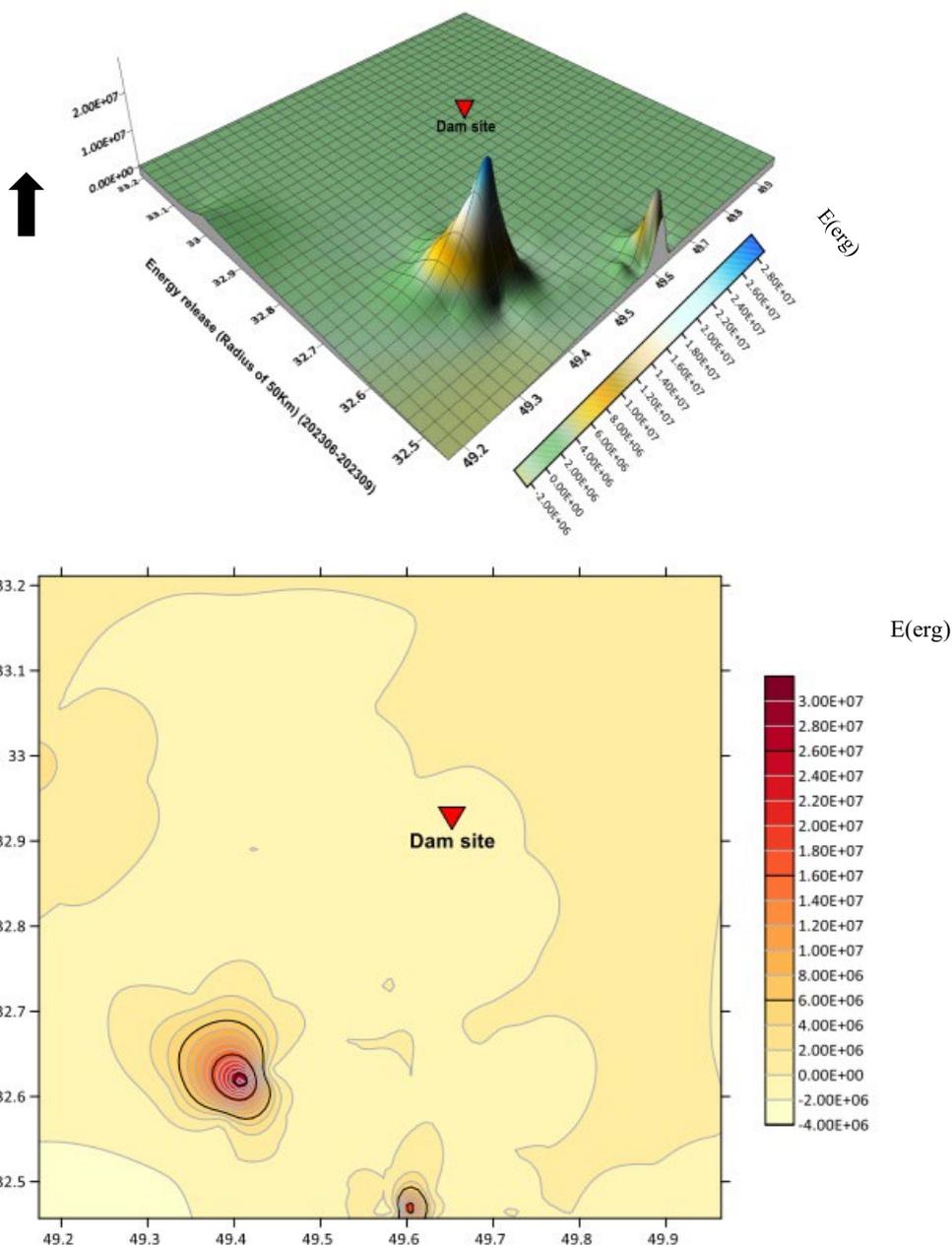
$$E = Mo / (2 \times 10^4) \text{ erg} \quad (5)$$

سد در آزمون ۲۲۵ درجه به وقوع پیوسته است. رویداد دوم با  $MI=3/7$  در فاصله ۴۹ کیلومتری از محل سد در آزمون ۱۸۸ درجه رخ داده است. در محدوده بیشتر از ۵۰ تا ۱۰۰ کیلومتری، تعداد رخ دادها بیشتر از ۱۰ رویداد در آزمون‌های مختلف به وقوع پیوسته است که در شکل ۱۵ مشخص شده است.

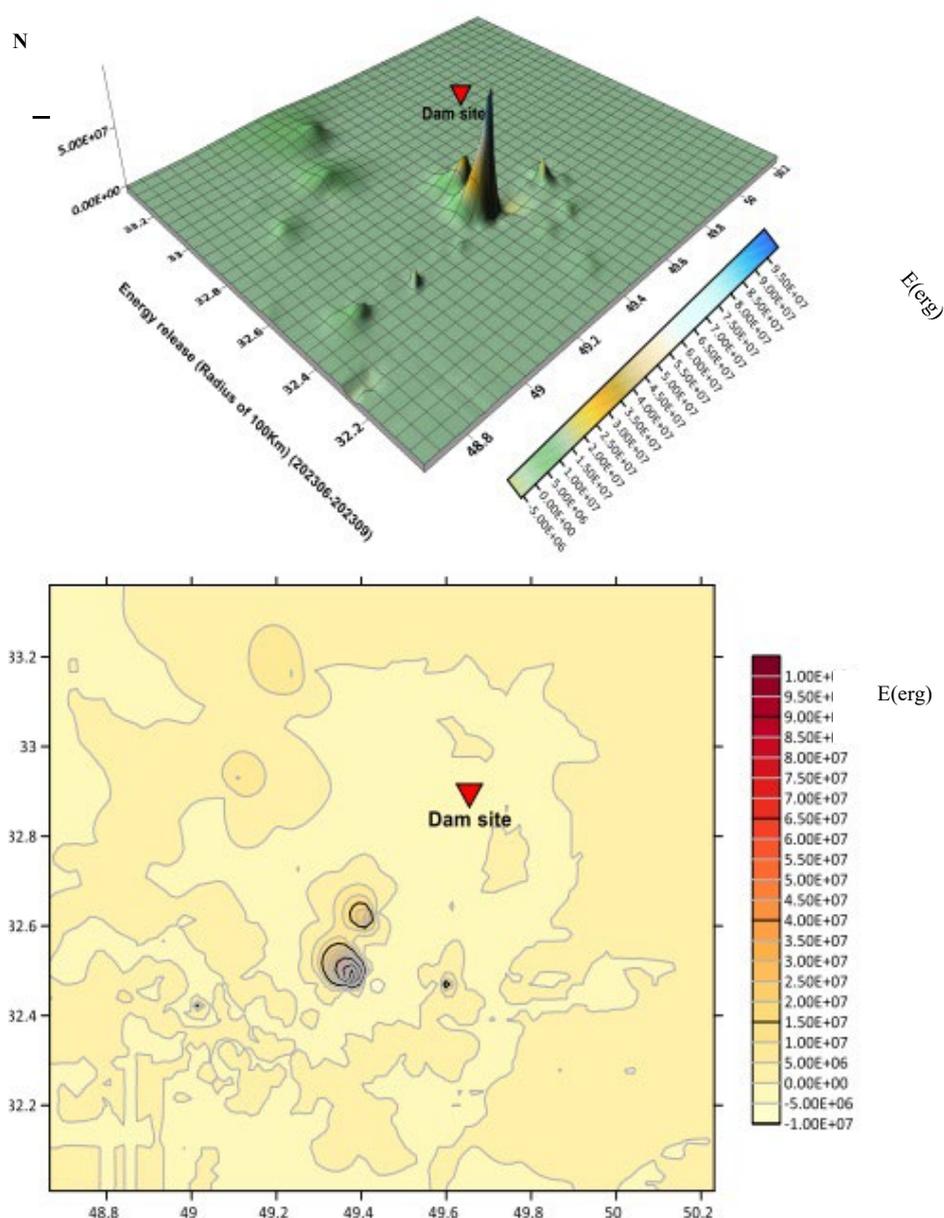
$MI=1$  و  $MI=1/1$  می‌باشد که در فواصل به ترتیب ۱۹ و ۲۳ کیلومتری از محل سد به ترتیب در آزمون‌های ۸۴ و ۱۵۶ درجه به وقوع پیوسته‌اند. در فواصل کمتر از ۵۰ کیلومتر (شکل ۱۴) می‌توان دو قله قابل توجه را مشاهده کرد که به هم مرتبط هستند. یکی از این دو رویداد در جنوب غربی با  $MI=3/8$  در فاصله ۴۰ کیلومتری از محل



شکل ۱۳. انرژی آزاد شده در محدوده کمتر از ۲۵ کیلومتری از محل سد رودبار لرستان.



شکل ۱۴. انتشار انرژی در محدوده بین ۲۵ تا ۵۰ کیلومتری از محل سد رودبار لرستان.



شکل ۱۵. انرژی آزاد شده در محدوده ۵۰ تا ۱۰۰ کیلومتری از محل سد رودبار لرستان.

## ۲-۴ خطای بیضی فرآیند پردازش و داده‌ها

مکان‌یابی رویدادها با در نظر گرفتن پارامترهای بیضی خطا انجام شده است که توسط نرم افزار سایزان پردازش می‌شوند و به عنوان خطای اندازه‌گیری  $Y, X$  محور کوچک و اصلی بیضی، مرکز و زاویه جهت محاسبه می‌گردد. در این مطالعه، نتایج محاسبه خطای بیضی در

شکل ۱۶ نشان داده شده است. مقادیر RMS و خطای بیضی نشان دهنده این است که مکان‌های رویدادهای نشان داده شده قابل اعتمادند. خطای بیضی محاسبه شده برای رویدادها در مرکز بیضی‌ها همان مرکز هر رویداد و شعاع بیضی است به معنای فاصله در مقایسه با مختصات طولانی نیست. پردازش داده‌های فوق نشان دهنده کاهش سرعت

شکل (۱۶) نشان می‌دهد که چگونه بیضی‌ها در حالی که از مرکز زمین‌لرزه دور می‌شوند بزرگتر می‌شوند و مرزهای شبکه تا فواصل بیش از ۳۰ کیلومتر می‌باشد. این شکل به سادگی نشان می‌دهد که کیفیت، هنگام کار روی رویدادهای خارج از شبکه، مکان مرکزی و رومرکزی کاهش می‌یابد. توجه به این نکته ضروری است که شرایط ذکر شده فقط به دقت مورد ۱ اشاره دارد. محل وقوع زلزله معمولاً بیضی بودن خطا معیاری است که عملکرد شبکه را نشان می‌دهد. هندسه و ناهماهنگی رسیدن فاز که با کمیت ایستگاه‌ها و مراحل ورود متغیر می‌شود در موارد ۲ و ۳ باید اجرایی شود. مقدار RMS به دقت، قرائت فاز و سرعت، بستگی دارد. مدل ساختاری پردازش داده‌ها و مقادیر بدست آمده از مقادیر قابل قبول در این مرحله در شکل ۱۷ نشان داده شده است. بنابراین کار خواندن پشت فاز که بالاترین دقت انجام می‌شود، می‌تواند مدل سرعت را با قابلیت اطمینان رویدادها نشان می‌دهد. این مدل، مدل نهایی سرعت برای این منطقه نیست زیرا بهترین مدل که با داده‌های محلی بهبود می‌یابد، در به ما امکان می‌دهد مدل جدیدی را ارزیابی کنیم. بر اساس داده‌های ثبت شده توسط تمامی این ایستگاه‌ها رویدادها در سه دسته ارائه شده است. دسته اول از فاصله ۰-۲۵ کیلومتری جایی که شبکه بیشترین دقت را در پردازش دارد. تا این فاصله ۲۳ رویداد با بزرگای بالای ۲ وجود داشت. فاصله بعدی ۲۵-۵۰ کیلومتر است که با دقت ارزیابی شد و ۴۹ رویداد با بزرگای بالای ۲ وجود داشت. در آخرین فاصله ۵۰-۱۰۰ کیلومتر تعداد ۶۶۵ رویداد ثبت گردیده است که می‌توان تصویری از رفتار منطقه مشخص کرد. اگرچه دقت کاهش می‌یابد اگر این فاصله را با دو فاصله قبلی مقایسه کنیم، افزایش شدید در حدود بیش از ۱/۲ برابری در آن مشاهده می‌شود.

موج رویدادها در منطقه است. بنابراین می‌توان یک ساختار مدل، برای رویدادهای به وقوع پیوسته با خطای کم نشان داد. برای نشان دادن اینکه مکان‌های زمین‌لرزه‌ها از خطای کمتری برخوردار است با استفاده از هندسه ایستگاه‌هایی که زلزله را ثبت نموده‌اند یا برازش داده‌ها، مکان‌یابی زلزله را به روش مستقیم مدل‌سازی گردیده است. در این مدل‌سازی ۴ عدد را به صورت زیر نسبت داده شده است:

1 = nobs: تعداد مشاهدات (زمان رسیدن موج P و S).

2 = GAP: بزرگترین زاویه ازیموتال بدون مشاهده.

3 = DIST: فاصله تا نزدیک‌ترین ایستگاه؛

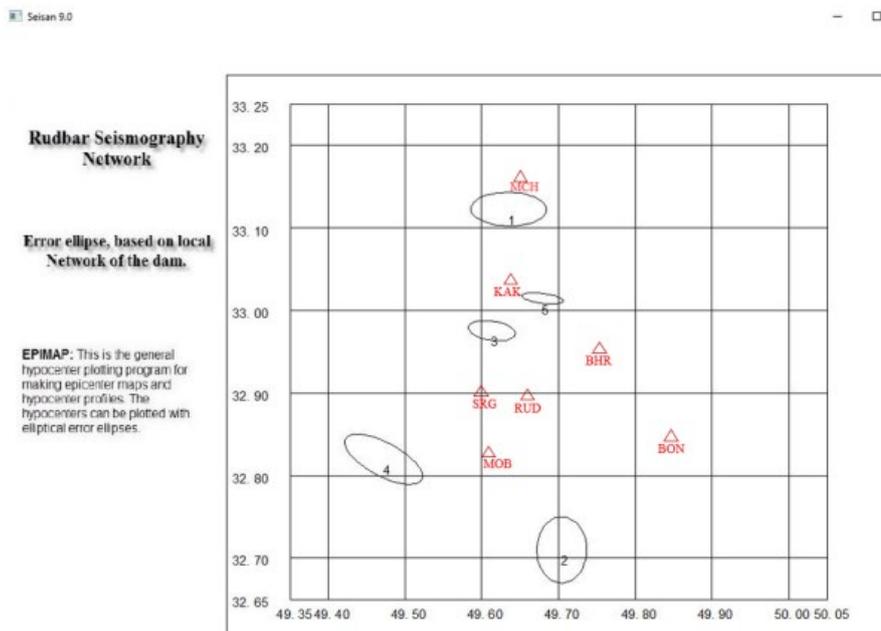
4 = RMS: ریشه میانگین مربع باقیمانده زمان عبور برای مکان زلزله نهایی.

در انجام این روش با یک شبکه محلی، در سد رودبار که با کمترین رویداد در طول سال مواجه است، بسیار مشکل می‌باشد. بنابراین باید رویدادهایی وجود داشته باشد تا بهترین شرایط فوق را برآورده کنند. معیارها گرفتن بهترین مکان رومرکز برخی از بهترین شرایط عبارتند از:

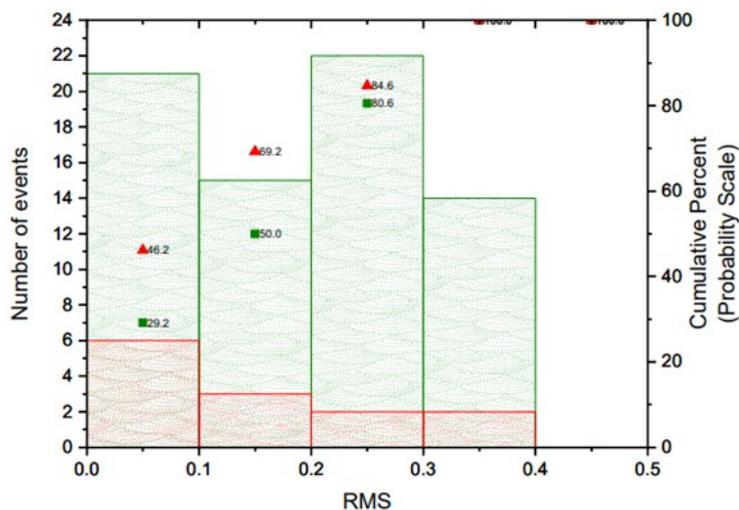
۱- یک گپ کمتر از ۱۸۰ درجه برای یک مکان زلزله به خوبی تعیین شده باشد، (کیسلینگر، ۱۹۸۸).

۲- سابقه حداقل هشت ورودی در زمان عبور که حداقل یکی از آنها ورودی موج S است و در حداقل یک مورد زلزله از ایستگاهی در فاصله کانونی (ایستگاه دقیقاً واقع شده) گزارش شده باشد. رومرکز مشخص شده رویداد، از محل وقوع کانون زمین‌لرزه برای یک رومرکز به خوبی تعیین شده باشد (چاتلین، ۱۹۸۰).

۳- رسیدن موج S با زمان‌بندی صحیح که در فاصله ۱/۴ عمق کانونی از کانون زلزله ثبت شده است. (به معنای شبکه‌های بسیار متراکم) یک محدودیت منحصر به فرد در عمق کانونی ایجاد می‌کند (مزکورا و رودا، ۱۹۹۴).



شکل ۱۶. خطای بیضی رویدادها در قاب مجاورت نزدیک شبکه. مثلث‌های قرمز نشان دادن ایستگاه‌های شبکه و بیضی نشان‌دهنده خطای E-lat، E-long است. اعداد نشان می‌دهد که مشخصه رویدادها در پایگاه داده حداکثر شعاع ۶ کیلومتر است.



شکل ۱۷. مقدار RMS محاسبه شده از تفاوت بین زمان رسیدن مشاهده شده فازها و فازهای پیش بینی شده توسط مدل سرعت. (شعاع ۵۰ کیلومتری از محل سد به صورت سبز و شعاع ۲۵ کیلومتری از محل سد به رنگ قرمز).

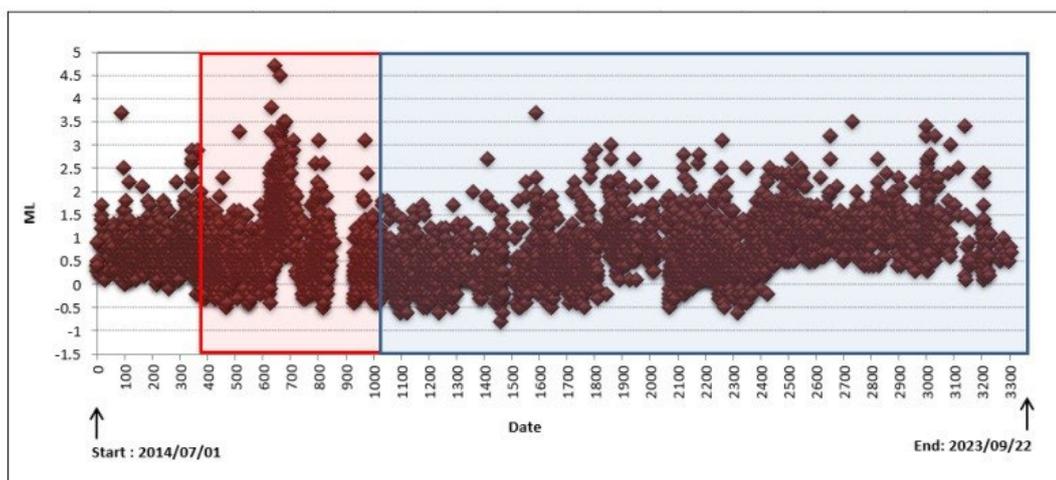
نقشه‌های مختلفی برای نشان دادن رفتار لرزه‌ای مجاور سد و منطقه اطراف برای مسافت ۲۵، ۵۰ و ۱۰۰ کیلومتر ارائه گردید. در فرآیند مکان‌یابی و پردازش داده‌ها، برای افزایش دقت فرآیندها از ایستگاه‌های شبکه ریز لرزه‌ای سد

۳-۴ زلزله‌های القایی به وقوع پیوسته در سد رودبار لرستان کلیه رویدادهای ثبت شده شبکه ریز لرزه‌ای سد رودبار لرستان با هفت ایستگاه، با نرم افزار سایزان پردازش و

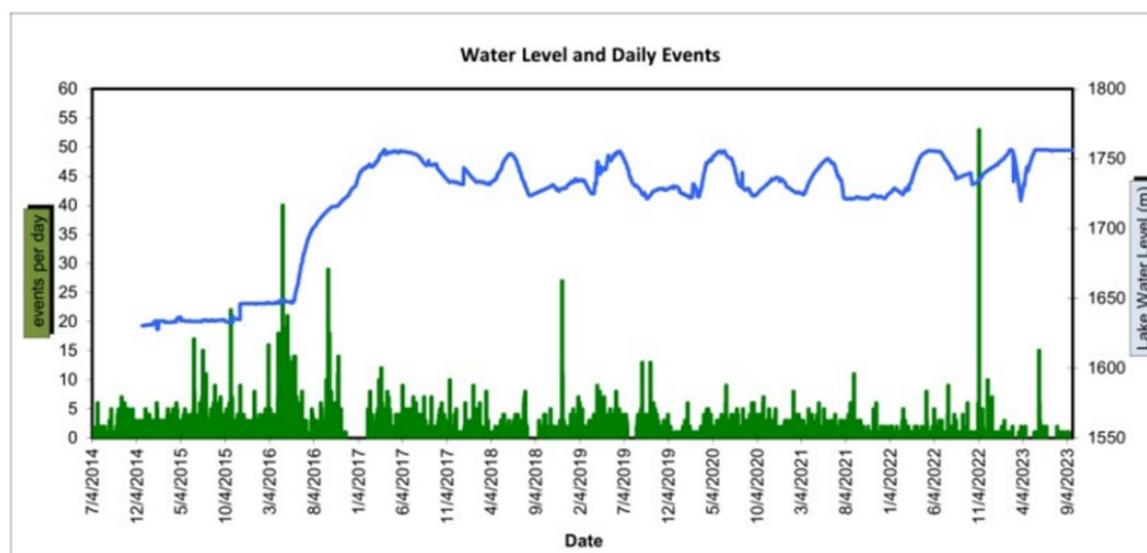
لرزه‌خیزی در هر روز چقدر است. پس از آنگیزی تغییر روزانه سطح آب بر رفتار روزانه لرزه‌خیزی تأثیر می‌گذارد. همانطور که شکل نشان می‌دهد، تعداد رویدادها در روزهای اولیه آنگیزی سد در سال ۲۰۱۴ نسبت به روزهای ۲۰۲۳ کم است و هرچه از عمر سد می‌گذرد به دلیل بالا رفتن سطح آب تعداد رویدادها بیشتر شده است. بیشترین رویدادها در سال ۲۰۲۲ و بیشترین سطح آب در سال ۲۰۱۷ ثبت شده است. با پایش این اثر، سطح آب با تعداد رویدادها در روز تلاقی داده می‌شود که نشان‌دهنده میزان این تأثیر است. مشخص است که به حجم قابل توجهی از آب تأثیرگذار بر منطقه نیاز داریم. همانطور که گفته شد، در ۳ ماه گذشته از تاریخ ۲۰۲۲، هیچ اوجی در این نمودار وجود ندارد، زیرا نرخ تغییرات سطح آب مخزن بسیار پایین بوده است و این نشان‌دهنده همبستگی کامل تغییرات نرخ سطح آب با لرزه‌خیزی منطقه نزدیک به مجاورت سد است. بر پایه ارزیابی در ساختگاه سد تعداد زمینلرزه‌ها در بازه زمانی ده ساله بعد از آنگیزی ۶ برابر تعداد زمینلرزه‌ها در بازه زمانی ده ساله قبل از آنگیزی مخزن سد است. علاوه بر این آنگیزی مخزن رفتار لرزه‌ای محل سد را تغییر داده است به طوری که در منطقه زمینلرزه‌های بیشتر با بزرگی کمتر مشاهده می‌شود. بین نوسانات سطح آب مخزن و تعداد زمینلرزه‌ها نیز همبستگی مشاهده شده است. در این سد ۱۲ مرحله آنگیزی و تخلیه در مخزن در بازه زمانی ۲۰۱۴ تا ۲۰۲۳ اتفاق افتاده است که افزایش و کاهش مدت روز هر چرخه (یک دوره آنگیزی و تخلیه) بر تعداد زمینلرزه‌ها تأثیر داشته است. پارامترهای لرزه‌خیزی محاسبه شده در منطقه نیز به عنوان یک پارامتر مهم است. در زمانی که سد در حال آنگیزی است و از آنجا که سطح آب به تدریج افزایش یا تغییر می‌کند تغییرات آن ممکن است رویدادهای محرک مخزن را نشان دهد.

گتوند علیا که در جنوب غربی این شبکه قرار داشت، استفاده شد که با داده‌های ایستگاه‌های رودبار لرستان پردازش و مدل‌سازی انجام شد. در اوایل احداث سد، حدود ۳۱/۹٪ از رویدادها در کمتر از ۳۰ کیلومتری از مرکز سد به وقوع پیوسته‌اند در حالی که فعالیت لرزه‌ای در ۳۰ کیلومتر از مرکز سد بعد از احداث سد ۵۸/۱٪ می‌باشد. بر اساس آنگیزی مخزن سد رودبار و تغییرات روزانه سطح آب آنگیزی شده، روزانه رویدادهایی که به وقوع می‌پیوندد متفاوت می‌باشد. به طور متوسط این مقدار بین ۸ تا ۹ رویداد در فاصله ۲۵ کیلومتری از سد می‌باشد. با پایش و بررسی این رویدادها، سطح آب با تعداد لرزه‌های روزانه مورد بررسی قرار گرفت. برای اینکه نتیجه‌ی خوبی گرفته شود، به حجم قابل توجهی آب تأثیرگذار بر محدوده سد، مورد نیاز است. بنابراین در هر ۳ ماه بعد از آنگیزی کامل سد، تغییرات سطح آب مخزن مورد بررسی قرار گرفت که در شکل ۱۸ نشان داده شده است. بیشترین لرزه‌های ثبت شده در ۳ ماهه چهارم ۲۰۲۲ است. همانطور که در شکل ۱۸ مشخص است، در ۳ ماهه گذشته تاریخ فوق برخلاف این دوره، هیچ پیکی در این نمودار وجود ندارد که می‌توان آن را به نرخ تغییرات سطح آب مخزن نسبت داد که نشان‌دهنده پایین بودن آن است. این موضوع نشان‌دهنده همبستگی کامل تغییرات نرخ سطح آب با لرزه‌خیزی منطقه در مجاورت سد است. در کل زمان مورد مطالعه بیشترین رویداد ثبت شده که در شکل ۱۸ با یک مستطیل نشان داده شده است در زمان ۴۰۰ تا ۱۰۰۰ روز از تاریخ آنگیزی کامل اولیه سد می‌باشد. بیشترین زمینلرزه‌های القایی به وقوع افتاده در این سد در این دوره می‌باشند.

به طور متوسط تعداد ۸-۱۰ رویداد روزانه در هر ۳ ماه برحسب بزرگی و تعداد در محل سد به وقوع می‌پیوندد که در شکل ۱۹ نشان داده شده است. این شکل نشان می‌دهد که چه بزرگی‌هایی بیشتر در منطقه اتفاق می‌افتد و نرخ



شکل ۱۸. بزرگی رویدادهای روزانه در طول بازه زمانی ۲۰۱۴ تا ۲۰۲۳ در شعاع ۲۵ کیلومتری از محل سد.



شکل ۱۹. رویدادهای روزانه و سطح آب روزانه مخزن سد رودبار لرستان. شکل بر اساس پایش روزانه مقدار سطح آب و رویدادهای ثبت شده در مجاورت نزدیک شبکه لرزه‌ای رسم شده است.

## ۵ نتیجه‌گیری

این رویدادها بین هندوچان و سراوند-بزنوید به وقوع پیوسته است که مشخص می‌کند گسل‌ها و ناحیه غربی ایستگاه MHC در یک سال گذشته فعال بوده است و فعالیت ریزلرزه‌ای بسیار بالایی در این ناحیه مشاهده می‌شود. در قسمت جنوب غربی سد، رویدادهای ثبت شده مربوط به گسل لهبری است. بسیاری از رویدادها با بزرگی کمتر از ۰.۵ در مقیاس امواج محلی توسط ایستگاه‌های گنوند علیا

شبکه ریزلرزه‌ای سد رودبار لرستان در آخرین سال برداشت داده در این مطالعه (۱۴۰۲) ۱۰۸۰ رویداد توسط شبکه ثبت کرده است. تعداد ۱۱۷ رویداد نزدیک‌تر از ۵۰ کیلومتر بودند. در ابتدای نصب شبکه (۱۳۹۶) از تعداد ۷۳۷ رویداد ثبت شده، تعداد ۷۲ رویداد نزدیک‌تر از ۵۰ کیلومتر بودند که نشان دهنده روند افزایشی کل رویدادها می‌باشد. بیشتر

محدوده ۰.۵ تا ۱.۰ بیشتر از دوره استراحت است. به طور کلی، حدود ۶۰ درصد رویدادها دارای بزرگی کمتر از ۱.۰ در شعاع ۵۰ کیلومتری از محل سد هستند و در شعاع ۲۵ کیلومتری از محل سد حدود ۸۵ درصد است که نشان دهنده، تغییرات سطح آب با زمین‌لرزه‌های اطراف سد می‌باشد.

### قدردانی و تشکر

نویسندگان از مؤسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران، پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله و مجری سد رودبار لرستان به خاطر در اختیار قرار گذاشتن داده‌ها، تشکر و قدرانی می‌نمایند.

### منابع

- ابراهیمی، محمدرضا و تاتار، محمد. (۱۳۹۷). مدل‌سازی تنش القایی ناشی از وزن دریاچه گتوند علیا بر روی گسل گلستان. فصلنامه علوم زمین، ۱۰۷(۲۷)، ۱۹۳-۲۰۲.
- ابراهیمی، محمدرضا و تاتار، محمد. (۱۳۹۱). مقاله توزیع برخالی (فرکتالی) لرزه خیزی القایی در مخزن سد مسجد سلیمان، مجله فیزیک زمین و فضا، ۳۸ (۲)، ۲۷-۱۵.
- پاسه، حمیدرضا و علیائی، محمد. (۱۳۹۳). ارزیابی مبتنی بر عملکرد رفتار سدهای خاکی تحت بارگذاری زلزله. مجله عمران مدرس، ۱۴(۲)، ۳۹-۵۳.
- تاتار، محمد، ابراهیمی، محمدرضا و یمینی فرد، فرزاد. (۱۳۹۰). مقاله لرزه خیزی القایی در مخزن سد مسجد سلیمان (جنوب باختر ایران)، فصلنامه علوم زمین، ۸۰ (۲۰)، ۹۵-۱۰۲.
- حافظی مقدس، ناصر، امیدی، پرویز، جوان دولوئی، غلام و حسینی، زهرا. (۱۳۹۳). مقاله زلزله‌های القایی در ساختگاه سدهای کرخه و کارون ۳. فصلنامه زمین‌شناسی مهندسی، ۷(۳-۴)، ۷۱-۸۴.

ثبت شده است که می‌توان تجمع لرزه‌ای در نزدیکی این گسل را مشاهده کرد. گسل لهبری در این مدت زمین‌لرزه‌هایی متعددی با بزرگی ۰-۲ را ثبت کرده است. همچنین یک فعالیت لرزه‌ای بین مافارون و گسل‌های لهبری در سال ۲۰۲۲ قابل مشاهده است. بر اساس نمودار فاصله رویدادهای ثبت شده و نقشه‌های توزیع، مشخص گردید که در داخل شبکه و نواحی مجاور، خط‌هایی، وجود دارد. روند کانونی رویدادها با روند گسل‌ها و خطواره‌ها طبق مطالعه علی‌پور و همکاران (۱۳۹۰) مطابقت دارد. روند منطقه به طور کلی شمال غرب به جنوب شرق است که بسیاری از رویدادها در این راستا توزیع شده‌اند. بیشتر رویدادها در آزمون ۱۸۰-۲۱۰ درجه در فاصله کمتر از ۲۵ کیلومتر ثبت شده‌اند. رویدادهای منطقه در آزمون‌های ۱۵۰ تا ۱۸۰ درجه در فاصله ۳۰ کیلومتری و فواصل بیشتر در آزمون‌های ۳۰۰-۳۳۰ درجه نسبت به سد رودبار لرستان به وقوع پیوسته‌اند. ثبت رویدادها در این آزمون‌ها نشان دهنده این است که فعال‌ترین بخش منطقه، جنوب غربی شبکه است که تغییرات سطح آب بسیار اندک و سپس روند افزایشی را نشان می‌دهد. بنابراین به وضوح، تغییرات سطح آب و فعالیت لرزه‌ای مجاور مرکز سد، نشان می‌دهد که اهمیت پایش دقیق لرزه‌ای در انسداد یا تخلیه سریع مخزن همبستگی وجود دارد. در فاصله کمتر از ۱۰۰ کیلومتر مقدار b-value حدود ۰.۵۴ و a-value حدود ۲.۸۳۶ محاسبه شده است. آزاد شدن انرژی توسط رویدادهای منطقه نیز در فواصل کمتر از ۵۰ کیلومتر دو قله قابل توجه را که مربوط به ۲ رویداد در این منطقه است را نشان می‌دهد. خطای بیضی مقادیر، یک خطای مکان معقول را نشان می‌دهد. بنابراین گسل سراوند-بزنوید، تقاطع در امتداد شبکه و نزدیک به ایستگاه مرکزی و مرکز سد کاملاً فعال است و بیشتر رویدادها و زمین‌لرزه‌های القایی ناشی از احداث این سد، در امتداد این گسل می‌باشد. در هر دو فواصل (۲۵ و ۵۰) کیلومتری، ریزلرزه‌خیزی در

- درگاه کمیته بین المللی سدهای بزرگ، بولتن ها (ICOLD)، ۱۱۲، ۱۴۰۰، <https://ircold.ir/>
- درگاه ملی پژوهشکده حفاظت و مرمت آثار تاریخی- فرهنگی، ۱۳۸۳، <https://richt.ir/>
- درگاه ملی کاتالوگ و مجموعه داده‌های باز و کاربردی سازمان زمین شناسی، نقشه های زمین شناسی، ۱۴۰۳، <https://data.gov.ir/dataset/1c3044ae08f08e933718eb069ff812b51a9d2316>
- درگاه ملی نگاره‌های ماهواره‌ای LANDSAT 7، <https://girs.ir/landsat7-stripping/>
- رضاپور، مهدی و پیرس، رابرت. (۱۳۸۶). ارتباط بین ممان لرزه‌ای M0 و بزرگی امواج سطحی MS. مجله علوم جمهوری اسلامی ایران، ۱۸(۲)، ۱۵۱-۱۵۷.
- زارعی، سعید، مهدیپور، صدیقه و منصور، سیدرضا. (۱۴۰۰). ارزیابی پویایی لرزه‌زمین‌ساختی در کمربند چین‌خورده و رانده زاگرس به کمک نسبت نرخ گشتاور لرزه‌ای به نرخ گشتاور ژئودتیک. مجله ژئوفیزیک ایران، ۱۵(۲)، ۱۶۷-۱۸۴.
- سازمان هواشناسی کشور، ۱۳۹۷. شرکت مدیریت منابع آب ایران، معاونت طرح و توسعه، <https://www.irimo.ir/far>.
- سعیدیان، مهدی، حافظی مقدس، ناصر، رضانی اومالی، رمضان و حسامی آذر، خالد. (۱۳۹۱). ارزیابی خطر گسلش، زمینلرزه و لرزه خیزی القایی در محدوده سد شهید رجائی ساری پایان نامه کارشناسی ارشد دانشکده علوم زمین دانشگاه صنعتی شاهرود.
- شاهوردی طرخورانی، لیلیا و میرمحمدحسینی، سید مجدالدین. (۱۳۹۸). مقاله ارزیابی و تحلیل تغییرشکل های سد گتوند علیا به هنگام وقوع زلزله. نشریه مهندسی عمران شریف، ۳۵۰۰۰۲ (۳۰۰۱).
- شب‌خانه، آراز نامی و میرقاسمی، علی اصغر. (۱۴۰۰). تأثیر فشار هیدرودینامیکی مخزن سد ناشی از زلزله در نتایج تحلیل دینامیکی سه بعدی سدهای سنگ ریزه ای با
- رویه بتنی. نشریه علمی سد و نیروگاه برق آبی، ۸(۳۰)، ۱-۱۳.
- شرکت آب منطقه ای فارس، ۱۳۹۷. اطلاعات سدهای مخزنی کشور، [ir.frrw://http](http://ir.frrw.ir).
- شرکت توسعه منابع آب و نیروی ایران، ۱۳۹۲. <https://www.iwpcو.ir/>
- صحرائی، حمیده، علوی، سید احمد و احتشامی معین آبادی، محسن. (۱۳۹۹). ارزیابی لرزه‌خیزی القایی در سد سلمان فارسی (قیر) ایران. مجله فیزیک زمین و فضا، ۴۶(۳)، ۴۰۹-۴۲۶.
- علی‌پور، رضا، پورکرمانی، محسن و زارع، مهدی. (۱۳۹۰). تکتونیک فعال مرتبط با گسل جوان اصلی زاگرس در محدوده سد رودبار لرستان. نشریه علوم دانشگاه تربیت معلم، ۹(۲)، ۴۱۷-۴۳۶.
- محمدنیا، ستوده، عباسی، محمدرضا، جوان دولئی، غلام و ازقندی، محسن. (۱۳۹۶). سازوکار گسله پیشانی کوهستان (MFF) زاگرس در طول جغرافیایی 46 تا 5/48 درجه شرقی. مجله ژئوفیزیک ایران، ۱۱(۴)، ۹۳-۱۰۶.
- منابع آب ایران، معاونت طرح و توسعه، ۱۴۰۰. <http://daminfo.wrm.ir>
- ملک‌زاده، زمان و رکنی، زینب. (۱۴۰۰). زمین لرزه القایی بعد از آبگیری سد البرز: دلالت هایی بر زمین ساخت فعال شمال البرز. فیزیک زمین و فضا، ۳(۳)، ۴۳۳-۴۵۱.
- Alavi, M. (1994) Tectonics of the zagros orogenic belt of iran: new data and interpretations Author links open overlay panel. Tectonophysics, 229(3-4), 211-238.
- Ambraseys, N. N. and Melville, C. P. (1982) A history of Persian Earthquakes, Cambridge Earth Science Series, Cambridge University Press, London.
- Bell, M. Lee., and Nur, A. (1978). Strength changes due to reservoir-induced pore pressure and stresses and application to

- Lake Oroville, *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 83(B9), 4469-4483.
- Berberian, M. (1976). Generalized Fault Map of Iran. Geological Survey of Iran.
- Berberian, M. (1983) Structural Evolution of the Iranian Plateau; Contribution to the Seismotectonics of Iran, Part IV: Continental Deformation in the Iranian Plateau. Geological Survey of Iran, Report 52, 19-68.
- Berberian, M. (2014). Earthquakes and coseismic surface faulting on the Iranian Plateau a historical, social and physical approach. Elsevier, Oxford.
- Berberian, M. and King, G. (1981) Towards a Paleogeography and Tectonic Evolution of Iran. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 18, 210-265.
- Braja M. Das. (2019). Book Advanced Soil Mechanics DOI:10.1201/9781351215183 ISBN: 9781351215183
- Carder, D. S. (1970). Reservoir loading and local earthquakes in engineering seismology the works of man. In: W.M. Adams (Editor) *Engineering Geology Case Histories*. Geological Society of America, Denver, Colo, (8) 51-61.
- Carey-Gailhardis, E., and Mercier, J. L. (1992). Regional state of stress, fault kinematics and adjustments of blocks in a fractured body of rocks: application to the micro seismicity of the Rhine graben: *Journal of Structural Geology*, 14(8/9), 1007-1017.
- Carey-Gailhardis, E., and Mercier, J. L. (1987) A numerical method for determining the state of stress using focal mechanisms of earthquake populations, Application to Tibetan teleseismics and microseismicity of southern Peru: *Earth Planetary Science Letter*, 82, 165-179.
- Chatelain, J.L., Roecker, S.W., and Hatzfeld, D. (1980) Microearthquake seismicity and fault-plane solutions in the Hindu Kush region and their tectonic interpretation. *Geophysical Research Atmospheres* 85(B3), 1365-1387.
- Chander, R. and Kalpna, L. (2000) On categorising induced and natural tectonic earthquakes near new reservoirs. *Eng. Geol.* 46, 81-92.
- Chen, L. and Talwani, P. (2001). Mechanism of Initial Seismicity following Impoundment of the Monticello Reservoir, South Carolina. *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 91, 1582-1594.
- Demets, C., Gordon G, R., Donald F, A., and Stein, S. (1990). Current Plate Motions, *Geophysical Journal International*, 101(2), 425 - 478.
- Ghassemi, M.R. (2016). Surface ruptures of the Iranian earthquakes 1900-2014: Insights for earthquake fault rupture hazards and empirical relationships. *Earth-Science Reviews*, 156, 1-13.
- Grasso, J. R. and Sornette, D. (1998) Testing self-organized criticality by induced seismicity. *J. Geophys. Res.* 103, 29965-29987.
- Gupta, H. K. (2002). A review of recent studies of triggered earthquakes by artificial water reservoirs with special emphasis on earthquake in Koyna. India. *Earth-Sci. Reviews*, 58, 279-310.
- Gupta, H. K. (2005). Artificial water reservoir-triggered earthquakes with special emphasis at Koyna. *Curr. Sci.* 88(10), 1628-1631.
- Guan, Y. Li, Y. Yan A. (2005). study on the tectonic stress variation caused by Xinfengjiang MS 6.1 reservoir induced earthquake occurred on March 19, 1962 South China. *Journal of Seismology* 25 (3), 83-86.
- Hussain, A.I.H., and Ibraheem, I.I. (2021). Evaluation of Suitability of Red Clay from Selected Areas of Gercus Formation, Sulaimaniyah, North Iraq, for the Construction of Embankment Dams, *Iraqi Journal of Science*, 62(9) 3417-3427.
- Improta, S. Bagh, P. De Gori, L. Valoroso, M. Pastori, D. Piccinini, C. Chiarabba, M. Anselmi, M. Buttinelli. (2017). Reservoir structure and wastewater-induced seismicity at the Val d'Agri oilfield (Italy) shown by three-dimensional Vp and Vp/Vs local earthquake tomography *Journal of Geophysics Research Solid Earth*, 122 (11) 9050-9082.

- Jackson, J. and McKenzie, D. (1984). Active Tectonics of the Alpine-Himalayan Belt between Western Turkey and Pakistan. *Geophysical Journal International*, 77, 185-264.
- Jaeger, J. C. and Cook, N. G. (1969) *Fundamentals of Rock Mechanics*. 515, CRC, Boca Raton, Fla.
- Kanamori, H., 1977, Aseismic and Seismic slip along subduction zones and their tectonic implications Island Arcs, Deep Sea Trench and Back Arc Basins, 163-174.
- Karimnejad Lalami, H.R., Hajjalibeigi, H., Sherhati, Sh., Adabi, M.H. (2020) Tectonic evolution of the Zagros foreland basin since Early Cretaceous, SW Iran: Regional tectonic implications from subsidence analysis, *Journal of Asian Earth Sciences*, 204, 104550.
- King, G. C. P., Stein, R. S. and Lin, J. (1994). Static stress changes and the triggering of earthquakes. *Bull. Seism. Soc. Am.*, 84, 935-953.
- Kissling, E. (1988) Geotomography with local earthquake data. *Reviews of Geophysics*, 26(4), 659-698.
- McGarr, A. and Simpson, D. (1997). Keynote lecture: A broad look at induced and triggered seismicity, Rockbursts and seismicity in mines. In: S.J. Gibowicz and S. Lasocki eds., *Proc. of 4th Int. Symp. On Rockbursts and Seismicity in Mines*, Poland. A.A. Balkema, Rotterdam, 385-396.
- Mercier, J. L., Carey-Gailhardis, E., and Sébrier, M. (1991). Palaeostress determinations from fault kinematics, application to the neotectonics of the Himalayas-Tibet and the Central Andes: Royal society publication, 337(1645).
- Mezcua, J. and Rueda, J. (1994). Earthquake relative location based on waveform similarity. *Tectonophysics*, 233(3-4), 253-263.
- Nadal-Romero, E., Vicente-Serrano, S., Lana-Renault, N., Lopez-Moreno, J.I., Regües, D., Lasanta, T., and García-Ruiz, J. (2025). Plant cover determines runoff generation in response to dry and wet conditions. *Journal of Hydrology*, 660, 133495.
- Othman, A.T., and Amir Omar, A. (2023). Evaluation of relative active tectonics by using geomorphic indices of the Bamo anticline, Zagros Fold-Thrust Belt, Kurdistan Region of Iraq. *Heliyon*, 9(7), e17970.
- Rastogi, B. K. (2003) Studies on Koyna and other reservoir induced earthquakes. In: *Proc. National Workshop on Current Practices and Future Trends in Earthquake Geotechnical Engineering*.
- Roeloffs, E. A. (1988). Fault stability changes induced beneath a reservoir with cyclic variations in water level. *J. Geophys. Res.* 93(B3), 2107-2124.
- Roeloffs, E. A., Wang, H. F., Cheung, L. S. and Haimson, B. C. (1979). Monotonic and cyclic pore pressure loading of sawcut sandstone. 20th U. S. Symposium on Rock Mechanics.
- Selim, M. M., Imoto, M., and Hurokawa, N. (2002) Statistical investigation of reservoir-induced seismicity in Aswan area, Egypt. *Earth Planets Space*. 54, 349-356.
- Sembroni, A., Reitano, R., Faccenna, C. and Callieri, P. (2024). Mediterranean Geoscience Reviews Article The geologic configuration of the Zagros Fold and Thrust Belt. *Mediterranean Geoscience Reviews*, 6, 61-86.
- Shapiro, S. A., Kummerow, J., Dinske, C., Asch, G., Rothert, E., Erziner, J. (2006). Fluid induced seismicity guided by a continental fault: Injection experiment of 2004/2005 at the German Deep Drilling Site (KTB). *Geophys. Res. Lett.* 33, L01309.
- Simpson, D. W., Leith, W. S. and Scholz, C. H. (1988) Two types of reservoir-induced seismicity. *Bull. Seismol. Soc. Am.* 78(6), 2025-2040.
- Talwani, P., and Acree, S. (1985) Pore pressure diffusion and the mechanism of reservoir-induced seismicity. *PAGEOPH*, 122. 947-965.

- Talwani, P. (1997) On the nature of reservoir-induced seismicity. *PAGEOPH*, 150, 473-492.
- Talwani, P. (2000) Seismogenic properties of the crust inferred from recent studies of reservoir-induced seismicity – Application to Koyna. *Curr. Sci.*, 79(9), 1327-1333.
- Talwani, P., Cobb, J. S. and Schaeffer, M. F. (1999) In situ measurements of hydraulic properties of a shear zone in northwestern South Carolina. *J. Geophys. Res.* 104, 14993–15003.
- Talwani, P., Chen, L., and Gahalaut, K. (2007). Seismogenic permeability,  $K_s$ , Solid Earth, 112(B7), B07309.
- Trigo, R.M., John, T., and Real, J.C. (2002). The North Atlantic Oscillation influence on Europe: Climate impacts and associated physical mechanisms, *Climate Research* 20(1), 9-17.
- Wells, D.L., and Coppersmith, K.J. (1994). New Empirical Relationships among Magnitude, Rupture Length, Rupture Width, Rupture Area, and Surface Displacement. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 84(4), 974-1002.
- Xuefei, H., Zefeng, Li., Feng., L., Junlun, Li., Huajian, Y. (2025). Real-Time Local Shear-Wave Splitting Measurement: Application to the Vicinity of the Baihetan Hydropower Plant, *Bulletin of the Seismological Society of America*, 115(2), 505-515.
- Zhou, S. Xue, Z. Deng, F. Sun, H. Jiang, X. Zhang, X. Lu. (2010). Relationship between the evolution of reservoir-induced seismicity in space-time and the process of reservoir water body load-unloading and water infiltration—a case study of Zipingpu reservoir China. *Journal of Geophysics*, 53 (11), 2651-2670.

## Investigation of stress and induced earthquakes by the Rudbar dam in Lorestan

Hamid Reza Sharifi<sup>1</sup> and Zohreh Sadat Riazi Rad<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup> Ph.D. Student, Department of Petroleum, Material and Mining Engineering, CT.C., Islamic Azad University, Tehran, Iran

<sup>2</sup> Associate Professor, Department of Geology, Chalus Branch, Islamic Azad University, Chalus, Iran

(Received: 25 May 2025, Accepted: 03 October 2025)

### Summary

The reservoir can cause the leakage of regional faults and the occurrence of induced earthquakes. This study was conducted in the Rudbar Dam of the west of Iran, part of the Zagros seismic zone. where the occurrence of earthquakes with different magnitudes is a characteristic of this seismic state. By considering cyclic loading and orientation, the location and depth of faults can be modeled relative to the reservoir. Reservoir-induced earthquakes occur as a result of a shear failure along a fault plane. In this study, it is assumed that the events follow the Gutenberg-Richter distribution law. With this assumption, the distribution of stress due to the weight of Lake Rudbar on the nearest faults of the Rudbar Dam in Lorestan was modeled. Different stress variables due to the dam reservoir at different sections and the values of stress changes at different distances and depths were calculated. The reservoir site is bounded by two active faults upstream of F1 and downstream of F10. Earthquakes after the impoundment of the Rudbar Dam, show a 70% increase. The dam impoundment was carried out an early 2017, and until the largest earthquake recorded, exceeding 5 on a local scale in December 2019, two periods of loading or lowering of the reservoir water level have occurred in the dam. This event has caused an increase in earthquakes at the dam construction site. After the second period of loading, which was greater than the first period, several earthquakes of  $M_L = 3.5$  have occurred. The diffusion of pore water pressure with a coefficient called  $c$  is one of the reasons for the activation of the faults in the region. The Rudbar Dam local network in Lorestan recorded 1080 events in the last year of data collection in this study (2024). 117 events were closer than 50 km. At the beginning of the network installation (2015), out of 737 recorded events, 72 events were closer than 50 km. As can be seen, the total number of events shows an increase. Most of these events occurred between Hendijan and Saravand-Beznovid, which indicates that the faults and the western area of the MHC station have been active in the past year and very high microseismic activity is observed in that area. In the southwestern part of the dam, the recorded events are related to the Lehbari fault. However, many events with a magnitude of less than 0.5 on the local wave scale were recorded by the Gotvand-Olia stations, which can be observed as a seismic accumulation near this fault. Also, a seismic activity between the Mapharon and Lehbari faults is visible in this study. Therefore, there is a delay in the occurrence of earthquakes between the impoundment of the dam and the increase in pore pressure. This phenomenon has caused earthquakes to occur at greater depths and distances from the dam. The involvement of a greater length and surface area of the fractures has resulted in a smaller stress difference based on the Columbus rupture criterion.

**Keywords:** Induced stress, Rudbar dam, water pressure, induced earthquake, Coulomb criterion

---

\*Corresponding author:

zohrehriazirad@iau.ac.ir