

## زلزله‌های القایی در ساختگاه سدهای کرخه و کارون ۳

ناصر حافظی مقدس<sup>۱\*</sup>، پرویز امید<sup>۲</sup>، غلام جوان دولوئی<sup>۳</sup>، زهرا حسینی<sup>۴</sup>

پذیرش مقاله: ۹۲/۱۰/۱۲

دریافت مقاله: ۹۱/۱۱/۴

### چکیده

در این مقاله الگوی لرزه‌خیزی در پهنه ساختگاه دو سد مهم کرخه و کارون ۳ قبل و بعد از آبگیری مورد ارزیابی قرار گرفته است. دستاوردها نشان می‌دهد که بعد از آبگیری تغییر مشخصی در موقعیت کانون سطحی زمین‌لرزه‌ها، عمق کانونی و سایر پارامترهای لرزه‌خیزی در پیرامون دریاچه سدهای مورد مطالعه صورت گرفته است. همچنین همبستگی خوبی بین تراز آب دریاچه سد و فراوانی زمین‌لرزه‌ها در هر دو سد مشاهده گردید. تنها اختلاف موجود در الگوی زمین‌لرزه‌های القایی دو سد این است که پاسخ لرزه‌ای و تأخیر زمانی زمین‌لرزه‌ها نسبت به افزایش تراز آب در سد کارون کمی بیشتر از سد کرخه می‌باشد. این اختلاف به دلیل نفوذپذیری بیشتر سنگ کف در سد کارون ۳ است.

کلید واژه‌ها: زمین‌لرزه القایی دریاچه سد - سد کرخه - سد کارون ۳

۱. استاد گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه فردوسی مشهد h\_moghads@yahoo.com

۲. استادیار دانشکده علوم زمین، دانشگاه صنعتی شاهرود

۳. دانشیار پژوهشگاه زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله

۴. کارشناس ارشد زمین‌شناسی زیست‌محیطی دانشگاه صنعتی شاهرود

\* مسئول مکاتبات

## ۱. مقدمه

سدهایی که ارتفاع آن از پی بیش از ۱۵ متر یا بین ۵ تا ۱۵ متر ولی حجم مخزن بیش از ۳ میلیون مترمکعب باشد در ردیف سدهای بزرگ قرار می‌گیرند. بررسی‌ها نشان داده است که زمین‌لرزه‌های القائی بیشتر در پیرامون سدهای بزرگ رخ داده‌اند (Choudhury et al., 2013). بر مبنای این تعریف در ایران بیش از ۱۰۰ سد بزرگ احداث شده است و می‌تواند زمین‌لرزه‌های القائی در پی داشته باشد. مطالعات اثرات آبرگیری دریاچه سدها در تغییر خصوصیات لرزه‌خیزی در ایران برای اولین بار بر اساس لرزه‌نگاشت‌های ایستگاه لرزه‌نگاری سد سفیدرود در سال ۱۹۶۶ تا ۱۹۷۱ در سازمان آب و برق منطقه‌ای شمال صورت گرفت و پس از آن با نصب دستگاه‌های لرزه‌نگار پیرامون برخی سدهای دیگر امکان انجام این گونه پژوهش‌ها بر روی سایر سدها فراهم گردیده است.

با شناخت زمین‌لرزه‌های القائی به عنوان پیامدهای زیست‌محیطی از نوع ژئوفیزیکی و سایر تأثیرات زیست‌محیطی ناشی از احداث سدها می‌توان تصمیمات آگاهانه در راستای برنامه‌ریزی توسعه‌ای اخذ نمود. مطالعات مشابهی بر روی دو سد کرخه و کارون ۳ توسط هدهدی (۱۳۸۸) صورت پذیرفته است.

۱-۱. ویژگی‌های لرزه زمین‌ساختی و خصوصیات عمومی سدها  
هر دو سد در واحد زمین‌ساخت - رسوبی زاگرس واقع شده‌اند. زاگرس با مرزها و تقسیمات درونی به نسبت متفاوت توسط زمین‌شناسان معرفی شده است. (Berberian (1995 بر اساس توپوگرافی و عوارض ریخت زمین‌ساخت، نوع تغییر شکل، داده‌های زمین‌شناختی - زمین‌ساختی و لرزه‌خیزی ناحیه‌ای نوار چین‌خورده - رانده شده زاگرس را به ۵ واحد ریخت زمین‌ساختی تقسیم نموده است. سد کرخه در تقسیم‌بندی مزبور در نوار چین‌خورده ساده زاگرس و سد کارون ۳ در پیش ژرفای آن واقع شده است (شکل ۱). پیش ژرفای زاگرس از شمال خاور به گسل پیشانی کوهستان و از جنوب باختر به گسل پیش ژرفای زاگرس محدود است.

جنبش گسل‌ها و زمین‌لرزه‌های ناشی از آن که پیامد آبرگیری در دریاچه سدها می‌باشد لرزه‌خیزی القائی (Induced Seismicity) نامیده می‌شود. این نوع زمین‌لرزه‌ها توسط تنش‌های غیر زمین‌ساختی ایجاد می‌شوند و تنش‌های حاصل از آبرگیری دریاچه سدها می‌توانند باعث تحریک گسل‌هایی شوند که متأثر از تنش‌های زمین‌ساختی ناحیه‌ای در آستانه جنبش قرار دارند.

الگوی لرزه‌خیزی القائی در پیرامون دریاچه سدها توسط عواملی مانند ارتفاع تراز آب در مخزن سد، نحوه بارگذاری و باربرداری آب دریاچه، زمین‌شناسی محلی و تنش‌های زمین‌ساختی محلی و ناحیه‌ای کنترل می‌شود. تغییرات تنش ناشی از بارگذاری و باربرداری، در زیر و یا در نواحی پیرامون دریاچه سد و تغییرات فشار آب منفذی در لایه‌های زیرین بستر دریاچه از عوامل ایجاد کننده این نوع رویداد لرزه‌ای هستند (Simpson et al., 2008; Simpson 1976; Leblanc

et al., 1978; Wang et al., 1975)

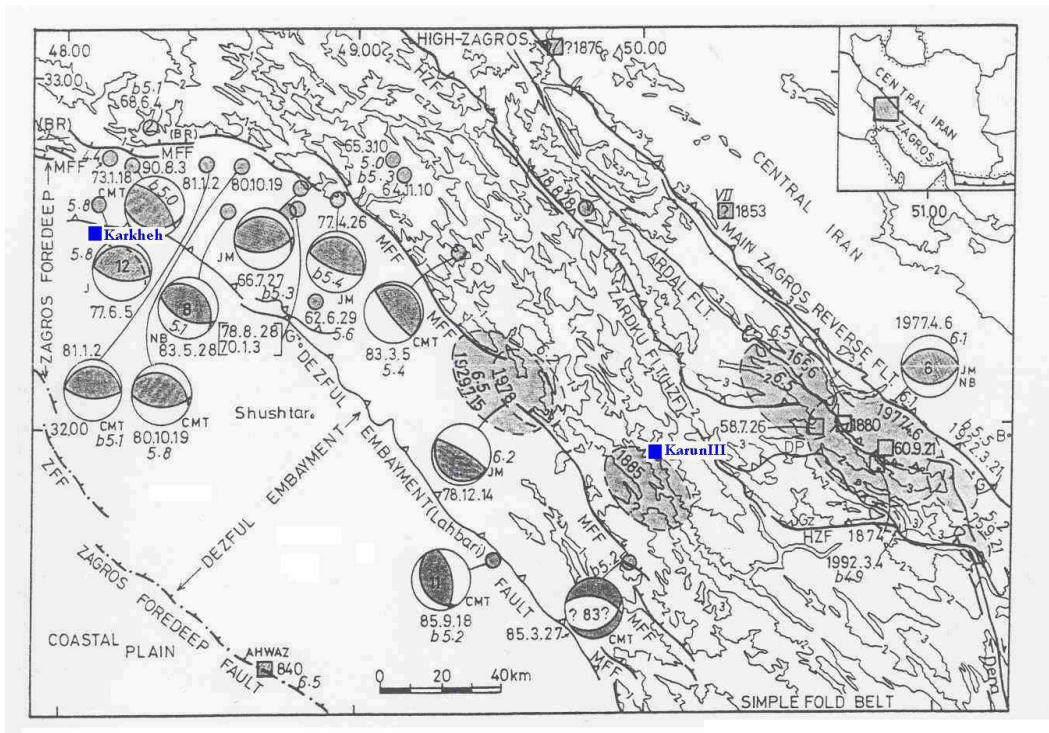
تحریک گسل‌ها با پر شدن سدها بیش از ۶۰ سال است که شناخته شده است. سدهای عظیم با اهداف تولید نیروی برق آبی، تولید غذا، تولید سیلاب‌های فصلی، مدیریت منابع آب و ... احداث می‌شوند. زمین‌لرزه‌های مرتبط با مخازن سد اولین بار توسط Carder (۱۹۴۵) در رابطه با دریاچه سد Lake mead در ایالات متحده آمریکا مطرح شد. سپس زمین‌لرزه‌های خسارت باری در ارتباط با بهره‌برداری از سدها در نقاط مختلف دنیا گزارش گردید که بزرگی ۳ مورد از آنها (زمین‌لرزه ۱۹۶۲ سد Hsinfengkiang چین، زمین‌لرزه ۱۹۶۳ سد Kariba مرز زامبیا - زیمبابوه و زمین‌لرزه ۱۹۶۷ سد Koyna در هند) بیش از ۶ ریشتر گزارش شده است (Gupta 1992; Cluff 1977; Gupta and Rastogi, 1976; Gough et al 1970; Simpson and Negmatullaev, 1978). بررسی‌های Beacher al. (1982) نشان داده است که از ۲۳۴ سد بزرگ دنیا با بلندی بیش از ۹۲ متر و حجم ذخیره بیش از یک میلیارد مترمکعب) در ۲۹ مخزن (۱۲/۴٪) زمین‌لرزه القائی رخ داده است. از دیدگاه کمیسیون بین‌المللی سدهای بزرگ،

محدود است (شکل ۱). با توجه به اینکه ساختگاه کارون ۳ بر روی فرادیواره گسل پیشانی کوهستان قرار گرفته است لرزه‌خیزی ساختگاه و پیرامون آن متأثر از جنبش‌های لرزه‌ای این گسل در ژرفا است (همان شکل). نزدیک‌ترین زمین‌لرزه‌هایی که فاصله‌ای بیشتر از ۴۰ کیلومتر نسبت به ساختگاه سد نداشته‌اند و بر روی فرادیواره و یا بر روی حریم این گسل واقع شده‌اند به ترتیب زمین‌لرزه‌های ۱۸۸۵، ۱۹۲۹/۷/۱۵ با بزرگی ۶/۲ و سازوکار راندگی و ۱۹۸۷/۱۲/۱۴ با بزرگی ۶/۵ و ۱۹۸۵/۳/۲۷ با بزرگی ۶/۲ و سازوکار نرمال است. واحدهای سنگی پیرامون سد کارون ۳ شامل شیل‌های هوازده و آهک سازند پابده به سن پالئوسن تا الیگوسن، مارن و آهک بسیار مقاوم و حفره‌دار سازند آسماری می‌باشد. دریاچه سد در بخش آهکی این دو سازند قرار گرفته است. سد کارون ۳ از نوع بتنی دو قوسی نازک و سد کرخه از نوع خاکی با هسته رسی است. سایر مشخصات عمومی این دو سد در جدول ۱ ارائه شده است (شرکت صدر سازه کوشا، ۱۳۸۰).

چین‌خوردگی در این نوار همچنان فعال و تاقدیس‌ها در حال رشد هستند (Falcon, 1961). فروافتادگی ساختاری به نام فروبار دزفول (Dezful Embayment) در بخش جنوب‌باختری این ناحیه قرار دارد. مرز شمالی فروبار دزفول گسلی معکوس به نام گسل فروبار دزفول (Dezful Embayment Fault) است سد کرخه در نزدیکی بخش شمال باختری این گسل ساخته شده است. (Berberian (۱۹۹۵ دو زمین‌لرزه دستگامی مورخ ۱۹۷۷/۶/۵ با  $M_s=5.8$  و ژرفای کانونی ۱۲ کیلومتر و ۱۹۸۵/۹/۱۸ با  $M_b=5.2$  را نتیجه جنبش مجدد این گسل در ژرفا دانسته است. واحدهای سنگی رسوبی در محدوده سد به ویژه در بالادست آن شامل رخنمون‌های سازند آغاجاری با تناوبی از ماسه‌سنگ و گل‌سنگ است که به سمت بالا به کنگلومرای دانه‌ریز می‌رسد. بخش فوقانی این سازند عضو لهبری نام گرفته که شرایط مناسبی را برای تشکیل سفره‌های تحت فشار دارد. نهشته‌های کواترنری در ناحیه دریاچه سد و ارتفاعات اطراف آن گسترش دارند. نوار چین‌خورده ساده زاگرس در شمال خاور به گسل زاگرس بلند و در جنوب باختر به گسل پیشانی کوهستان

جدول ۱. مشخصات عمومی سدهای کرخه و کارون ۳ (شرکت صدر سازه کوشا، ۱۳۸۰)

مشخصات	سد کارون ۳	سد کرخه
نوع سد	بتنی دو قوسی نازک	خاکی با هسته رسی
ارتفاع سد از پی (متر)	۲۰۵	۱۲۸
طول تاج (متر)	۴۶۲	۳۰۳۰
حجم مفید مخزن (مترمکعب)	۱۷۲۰	۴۸۷۰
مساحت دریاچه در حداکثر تراز بهره‌برداری (کیلومتر مربع)	۴۸	۱۶۲/۴۷
طول دریاچه در حداکثر تراز بهره‌برداری (کیلومتر)	۶۰	۶۰
سال بهره‌برداری	۱۳۸۳ ه.ش. (۲۰۰۴ م.)	۱۳۷۶ ه.ش. (۱۹۹۷ م.)

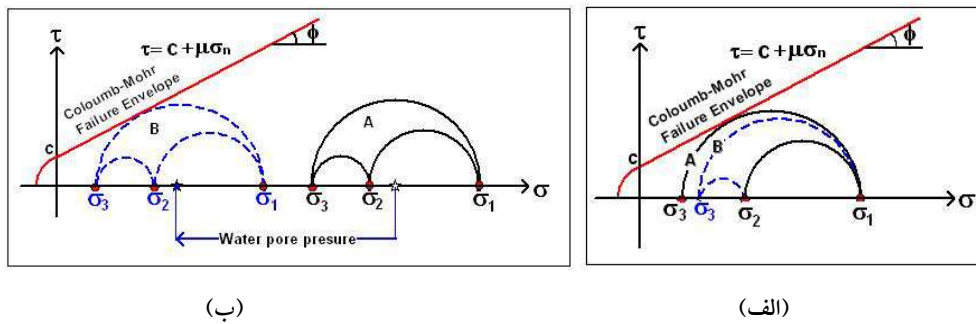


شکل ۱. نقشه ریخت زمین ساختی و لرزه زمین ساختی بخشی از زاگرس (برگرفته از Berberian, 1995) که موقعیت سد کرخه با علامت K1 و کارون ۳ با علامت K3 بر روی آن تعیین شده است

### ۳. میدان تنش

تحریک و تغییر در میدان تنش زمین ساختی می شود. در رژیم های زمین ساختی فشاری و گسل های معکوس وزن آب دریاچه باعث افزایش تنش قائم  $\sigma_3$  و تغییر شکل بیضوی تنش در سطوح  $\sigma_1 - \sigma_3$  و  $\sigma_2 - \sigma_3$  گشته و حالت تنش را از شرایط شکست سنگ و یا لغزش مجدد سطح شکستگی موجود دور می نماید. این در حالی است که فشار آب منفذی (p) باعث کاهش مقادیر تنش های اصلی  $\sigma_1$ ،  $\sigma_2$  و  $\sigma_3$  به اندازه p و در نهایت کاهش اختلاف تنش  $(\sigma_1 - \sigma_3)$  می شود. این کاهش در هر سه نوع گسل حالت تنش را به شرایط شکست نزدیک می نماید. در گسل های نرمال و امتداد لغز کاهش نسبت تنش ها سبب گسیختگی می گردد و در گسل های فشاری باربرداری از روی گسل سبب تحریک آن می گردد. چگونگی اثر بارگذاری و فشار آب منفذی بر میدان تنش با استفاده از دوایر مور تنش و پوش شکست در شکل ۲ نشان داده شده است.

رژیم زمین ساختی جاری (Neotectonics) در پهنه زاگرس از نوع فشاری است گرچه مولفه راستالغز در دگربرختی جوان آن دیده می شود. فعال بودن چین خوردگی، وجود گسل های فعال از نوع معکوس و یا راندگی نشانه های زمین شناسی این رژیم تکنونیک هستند. زمین لرزه های روی داده در پهنه زاگرس مؤلفه چیره معکوس دارند. زمین لرزه های دستگاهی ۱۹۷۷/۶/۵ با  $M_s = 5/8$  و ۱۹۸۵/۹/۱۸ با  $M_b = 5/2$  در نزدیکی ساختگاه سد کرخه و ۱۹۸۷/۱۲/۱۴ با بزرگی ۶/۲ در نزدیکی ساختگاه سد کارون ۳ نمونه هایی از زمین لرزه های با سازوکار کانونی چیره معکوس در پهنه مورد بحث هستند که تا سال ۱۹۹۵ میلادی به ثبت رسیده اند (Berberian, 1995). بدیهی است که در محیط های زمین ساختی فشاری، زمین لرزه ها نتیجه جنبش گسل های معکوس و یا راندگی هستند. آبیگری مخزن سدها به دو صورت بارگذاری وزن آب دریاچه و پیرو آن افزایش تنش قائم و فشار آب منفذی باعث

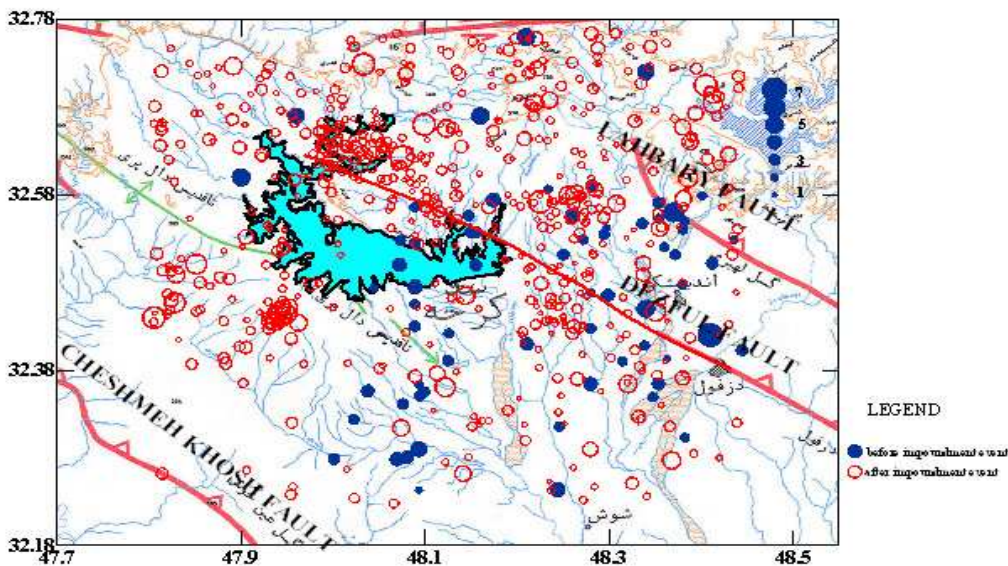


شکل ۲. نمایش تغییرات میدان تنش در گسل‌های فشاری (الف) و گسل‌های نرمال (ب) در اثر آبیگری مخزن. در هر دو شکل، A، شرایط تنش قبل از آبیگری و B شرایط تنش پس از آبیگری مخزن سد را نشان میدهد.

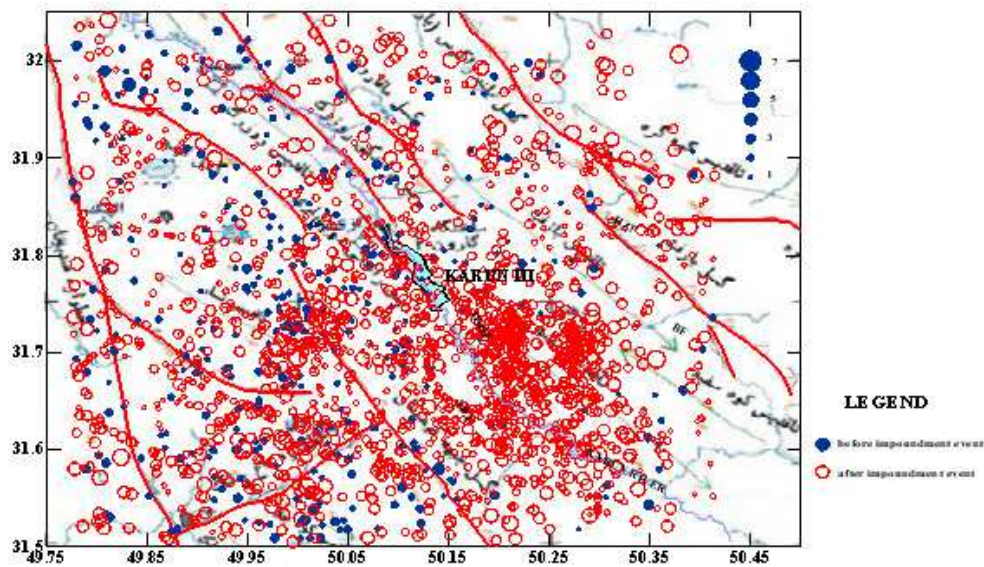
#### ۴. تغییرات لرزه‌خیزی در پهنه سدها

به منظور بررسی اثر احداث سدها به ویژه پس از آبیگری بر روی الگوی لرزه‌خیزی پهنه ساختگاه سدها، زمین‌لرزه‌های رخ داده در پهنه هر سد به شعاع تقریبی ۶۰ کیلومتر از بانک‌های اطلاعات زمین‌لرزه‌ای معتبر استخراج و مورد مطالعه قرار گرفته است. زمین‌لرزه‌های قبل از احداث و آبیگری از بانک زمین‌لرزه‌ای موسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران و پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و داده‌های لرزه‌ای پس از آبیگری از

شبکه مراکز قبلی بعلاوه داده‌های لرزه‌نگاری محلی نصب شده بر روی سد به دست آمده‌اند. توزیع مکانی زمین‌لرزه‌ها قبل و بعد از آبیگری برای پهنه سدهای کرخه و کارون ۳ به ترتیب در نقشه‌های شکل ۳ و ۴ دیده می‌شود. توزیع مکانی در این نقشه‌ها حاکی از آن است که رخدادهای لرزه‌ای در دوره بعد از آبیگری نسبت به بازه زمانی قبل از آبیگری تغییر موقعیت داده‌اند. همچنین از تمرکز رویدادها در فواصل نزدیکتر به سد حکایت دارد.

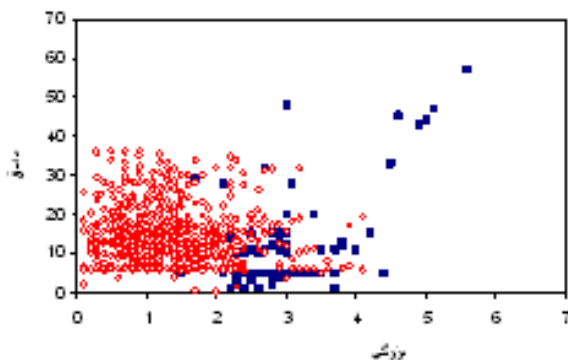


شکل ۳. توزیع مراکز سطحی رخدادهای لرزه‌ای در دوره قبل از آبیگری (دایره‌های توپر) و بعد از آبیگری در پهنه سد کرخه (دایره‌های توخالی).



شکل ۴. توزیع مراکز رخدادهای لرزه‌ای در دوره قبل از آبگیری (دایره‌های توپر) و بعد از آبگیری در پهنه سد کارون ۳ (دایره‌های توخالی).

کانونی این زمین‌لرزه‌ها تا فواصل مختلف از سد کاهش یافته است (شکل ۶).

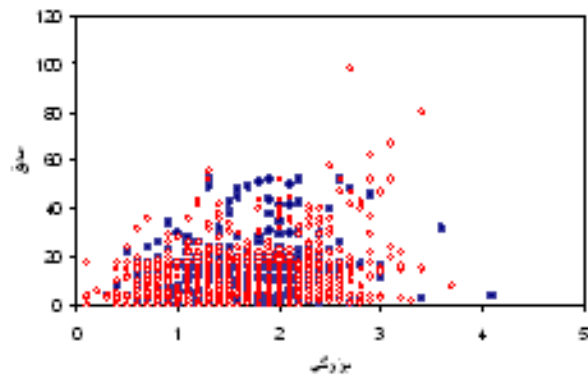


شکل ۵. نمودار عمق کانونی در برابر بزرگی رخدادهای لرزه‌ای در شعاع ۳۰ کیلومتری محور سد کرخه. کاهش بزرگی و ژرفای زمین‌لرزه‌ها در بعد از آبگیری مشهود است. \* (دوایر توپر قبل از آبگیری و دوایر توخالی بعد از آبگیری می‌باشد).

در منطقه کرخه بعد از آبگیری سد در سال ۱۳۷۶ زمین‌لرزه‌ها در شمال و شمال‌غرب محور سد که محل عبور گسل دزفول از محدوده مخزن سد می‌باشد تجمع بیشتری دارند. همچنین تجمعی از زمین‌لرزه‌ها در بخش شرقی ساختگاه مشاهده می‌شود که منطبق بر گسل دزفول می‌باشد که نزدیک‌ترین گسل به محور سد است. در منطقه کارون ۳ تا قبل از آبگیری سد، زمین‌لرزه‌ها در غرب و جنوب‌غرب محور سد که حریم گسل جبهه کوهستان و خطواره باغ‌ملک و روند ایزه را شامل می‌شوند، متمرکز شده‌اند و بعد از آبگیری مخزن سد زمین‌لرزه‌ها تغییر مکان داده و در محدوده جنوب شرقی محور و در مجاورت مخزن متمرکز شده‌اند.

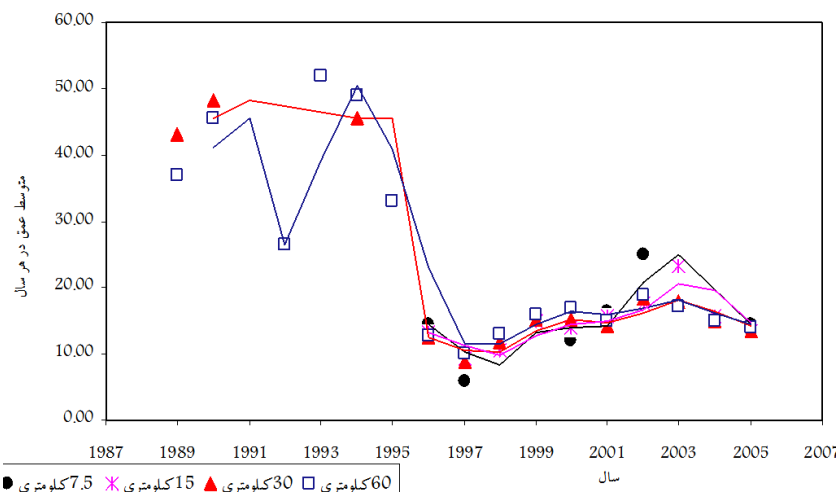
با آبگیری سد کرخه بزرگی زمین‌لرزه‌ها در فواصل نزدیک کاهش یافته است که این نشان دهنده رابطه خرد لرزه‌ها با حضور دریاچه سد در منطقه می‌باشد. عمق کانونی زمین‌لرزه‌ها نیز کاهش یافته است (شکل ۵). اما در مورد سد کارون ۳ با آبگیری سد در فواصل نزدیک به محور سد فراوانی زمین‌لرزه‌ها تقریباً ۲ برابر شده ولی تفاوت چندانی در بازه بزرگی رخدادهای لرزه‌ای به وجود نیامده است. عمق

حاکمی از کاهش عمق کانونی زمین‌لرزه‌ها بعد از آبگیری سد در سال ۱۹۹۷ میلادی می‌باشد (شکل ۷). بعد از آبگیری سد در سال ۱۹۹۷ تا مدت کوتاهی عمق زمین‌لرزه‌ها در حدود ۱۰ کیلومتری سطح زمین قرار داشته که با گذشت زمان مقدار آن به تدریج افزایش یافته و تا ۲۰ کیلومتری نیز رسیده و مجدداً رو به کاهش گذاشته است، که این افزایش عمق با زمان می‌تواند به علت تأخیر زمانی حاصل از نفوذ آب در لایه‌های زیرین و افزایش فشار منفذی آب در این لایه‌ها باشد. در این بازه نوساناتی هم مشاهده می‌شود که متأثر از عوامل زیادی می‌تواند باشد که نوسانات فصلی سطح آب دریاچه سد و تغییرات زمین‌شناسی پی سد و بستر دریاچه از جمله مهمترین آنها به شمار می‌آید. در مورد سد کارون ۳ نیز مقایسه عمق کانونی رخدادهای لرزه‌ای در دو بازه زمانی ۲ ساله قبل و بعد از آبگیری در فواصل مختلف از محور سد حاکمی از کاهش عمق کانونی زمین‌لرزه‌ها بعد از آبگیری سد در سال ۲۰۰۴ میلادی در فواصل مختلف از ساختگاه سد می‌باشد (شکل ۸).

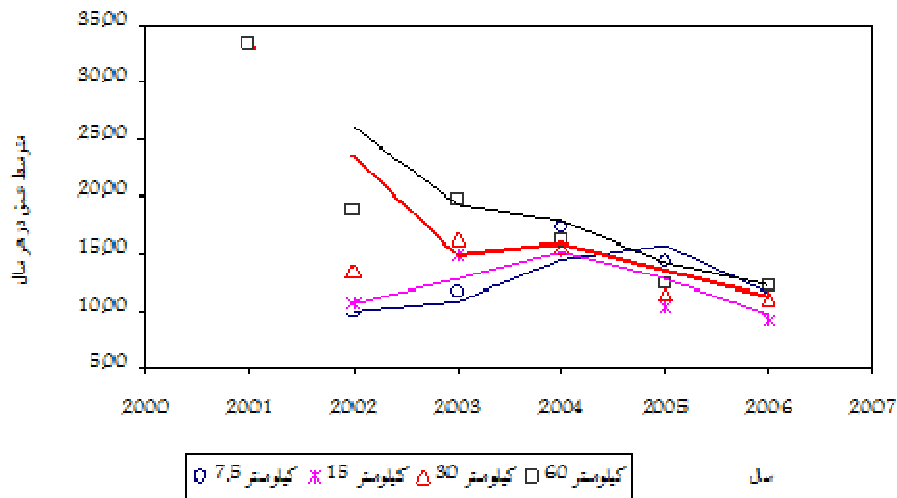


شکل ۶. نمودار عمق کانونی در برابر بزرگی رخدادهای لرزه‌ای در شعاع ۳۰ کیلومتری محور سد کارون ۳. کاهش ژرفای کانونی در بعد از آبگیری و بازه بزرگی یکسان در قبل و بعد از آبگیری مشهود است.  
\*(دوایر توپر قبل از آبگیری و دوایر توخالی بعد از آبگیری می‌باشد).

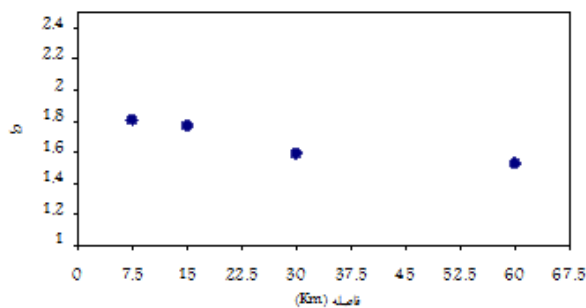
مقایسه عمق کانونی رخدادهای لرزه‌ای در دو بازه ۵ و ۸ ساله قبل و بعد از آبگیری در فواصل مختلف از محور سد کرخه



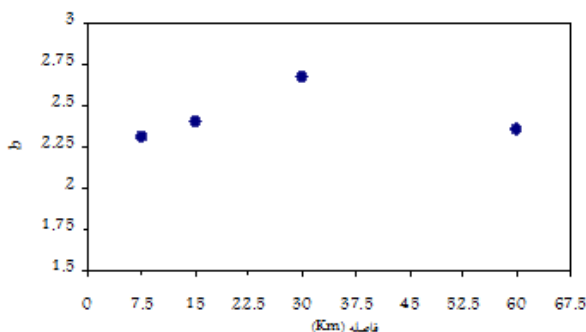
شکل ۷. نمودار سال رویداد- عمق کانونی رخدادهای لرزه‌ای در پهنه سد کرخه که کاهش عمق کانونی با فاصله‌گیری زمانی از آبگیری را نشان می‌دهد.



شکل ۸. مهاجرت عمق کانونی رخدادهای لرزه‌ای در فواصل مختلف از سد کارون ۳ که کاهش عمق کانونی با فاصله‌گیری زمانی از آبگیری را نشان می‌دهد.



شکل ۹. مقایسه ضریب  $b$  در فواصل مختلف از محور سد کرخه.



شکل ۱۰. مقایسه ضریب  $b$  در فواصل مختلف از محور سد کارون ۳.

پارامترهای لرزه‌خیزی که اساس آن بر توزیع فراوانی زمین‌لرزه‌ها در دامنه مشخصی از بزرگی در ناحیه‌ای خاص استوار است، به صورت رابطه ساده (۱) که به نام رابطه گوتنبرگ - ریشتر موسوم است نشان داده می‌شود:

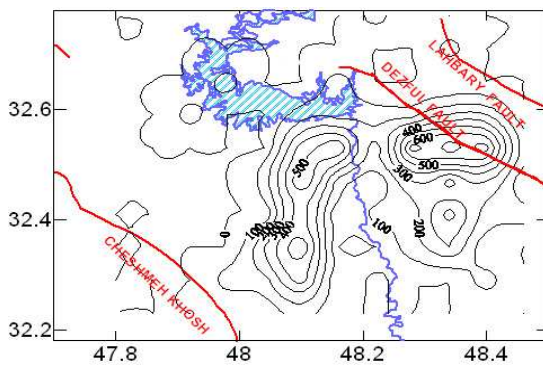
$$\log N = \alpha - \beta M \quad (1)$$

در رابطه (۱)،  $N$  تعداد زمین‌لرزه‌های با بزرگی بیش از  $M$  و  $\alpha$  و  $\beta$  ضرایب ثابت هستند. با مقایسه مقادیر  $\beta$  برای فاصله‌های ۷/۵، ۱۵، ۳۰ و ۶۰ کیلومتر مشخص شد، که در منطقه کرخه مقدار  $b$  با دور شدن از محل سد کاهش می‌یابد (شکل ۹) که این امر دلیل بر متمرکز شدن زمین‌لرزه‌های با بزرگی کوچک‌تر در اطراف سد است. در کارون ۳ هم مقدار  $\beta$  با دور شدن از محل سد تا فاصله ۳۰ کیلومتری افزایش نشان می‌دهد (شکل ۱۰)، بدین معنی که در فاصله‌های نزدیک‌تر تعداد زمین‌لرزه‌های کوچک‌تر نسبتاً کم‌تر است. این موضوع نشان‌دهنده پاسخ‌های متفاوت ایجاد شده در دو منطقه یاد شده است.

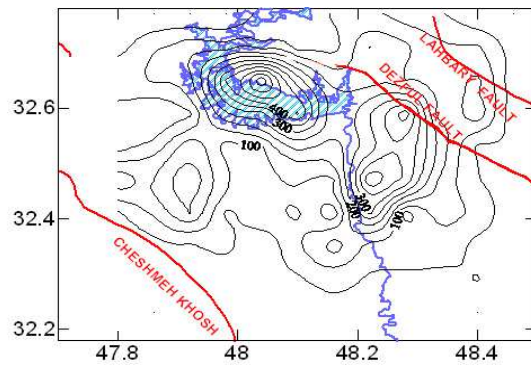


واقع شده است. در کارون ۳ نیز منحنی‌های تجمع لرزه‌ای تغییر الگوی لرزه‌خیزی را اثبات می‌نمایند. همان طور که در شکل ۱۲ مشاهده می‌گردد تا قبل از آبرگیری سد زمین‌لرزه‌ها در موقعیت غربی دریاچه سد کارون ۳ متمرکز شده‌اند که با آبرگیری سد تغییر مکان داده و در ناحیه جنوب شرقی این دریاچه قرار می‌گیرند.

منحنی‌های تجمع زمین‌لرزه‌ها در دوره‌های قبل و بعد از آبرگیری سد نیز همین موضوع را به اثبات می‌رساند. با رسم این منحنی‌ها (شکل ۱۱) برای رخدادهای سد کرخه مشخص شده که بیشترین تجمع رخدادهای در جنوب شرقی محور سد در رابطه با گسل دزفول متمرکز شده بودند که بعد از آبرگیری تجمع کانون سطحی زمین‌لرزه‌ها عمدتاً در نزدیکی مخزن سد

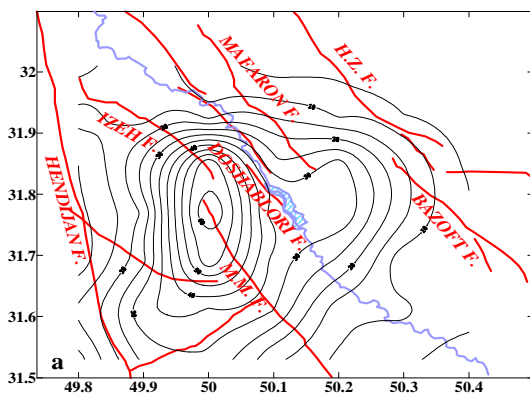


الف

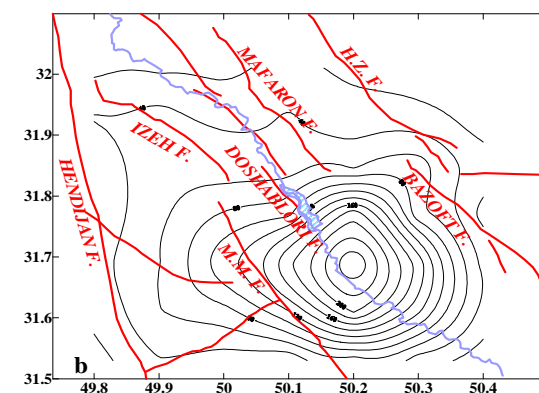


ب

شکل ۱۱. منحنی تجمع کانون سطحی رخدادهای لرزه‌ای واقع شده در بازه‌های زمانی قبل از آبرگیری (الف) و بعد از آبرگیری (ب) در فاصله ۳۰ کیلومتری سد کرخه.



الف



ب

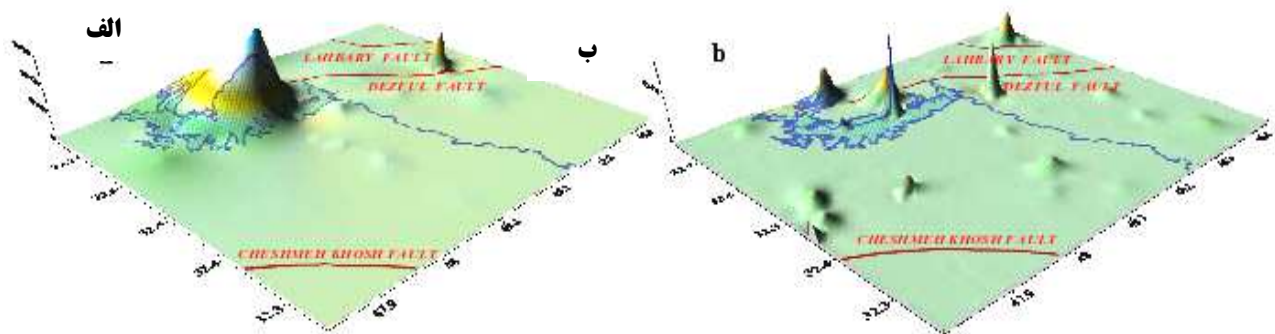
شکل ۱۲. منحنی تجمعی زمین‌لرزه‌های واقع شده قبل از آبرگیری (الف) و بعد از آبرگیری (ب) در فاصله ۳۰ کیلومتری سد کارون ۳.

شمال شرقی ساختگاه سد قرار دارند میزان بیشتری انرژی آزاد گردیده است که به علت رخدادهایی است که در این منطقه در رابطه با فعالیت انتهای شمال غربی گسل دزفول به وقوع پیوسته‌اند و در مجموع نسبت به سایر زمین‌لرزه‌ها که در قسمت‌های دیگر رخ داده است، انرژی بیشتری داشته‌اند

در شکل‌های ۱۳ و ۱۴ نمودار توزیع تخلیه انرژی در مناطق پیرامون هر دو سد آورده شده است. این نمودارها بیانگر میزان انرژی آزاد شده در منطقه بر اثر زمین‌لرزه‌های ثبت شده می‌باشد. همان طور که از شکل ۱۳ مشخص است، در دوره قبل از آبرگیری سد کرخه در دو منطقه که در موقعیت شمال و

قبل از آبیگری در کل منطقه عمده انرژی تخلیه شده در دو ناحیه در شمال غرب و جنوب محور سد و در ارتباط با گسل جبهه کوهستان و روند ایذه قرار گرفته است (شکل ۱۴-الف). ولی بعد از آبیگری وضعیت تخلیه انرژی در منطقه تغییر یافته و انرژی تخلیه شده نیز در مناطق مختلف پیرامون سد متمرکز شده‌اند (شکل ۱۴-ب).

(شکل ۱۳-الف). بر اساس همین بررسی مشخص گردید که بعد از آبیگری سد کرخه انرژی آزاد شده از زمین لرزه‌ها در تمام گسل‌های نزدیک به دریاچه سد کرخه بسته به فاصله گسل تا محل دریاچه متمرکز شده است (شکل ۱۳-ب)، که می‌تواند به علت نفوذ آب در سطح گسل و لغزندگی ناشی از آن باشد و در نتیجه رها شدن انرژی جمع شده در محل قفل شدگی‌های گسلی را به دنبال بیاورد. در مورد کارون ۳ هم تا



شکل ۱۳. نمودار توزیع انرژی رخدادهای لرزه‌ای واقع شده قبل از آبیگری (a) و بعد از آبیگری (b) در شعاع ۳۰ کیلومتری از محور سد کرخه.

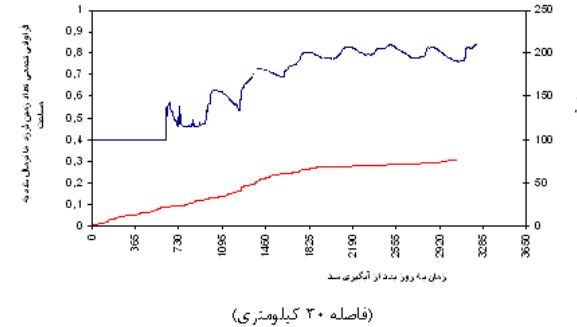
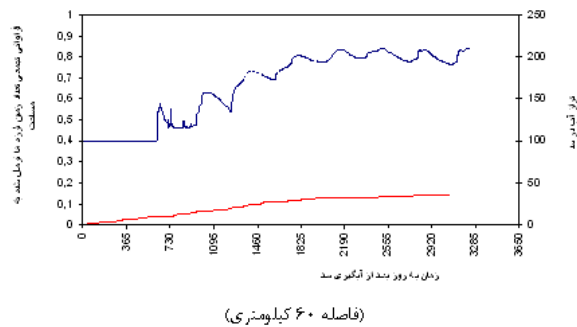
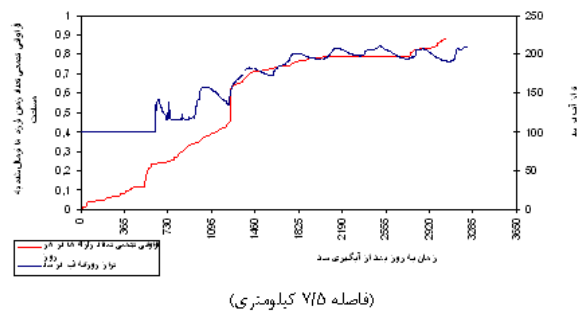
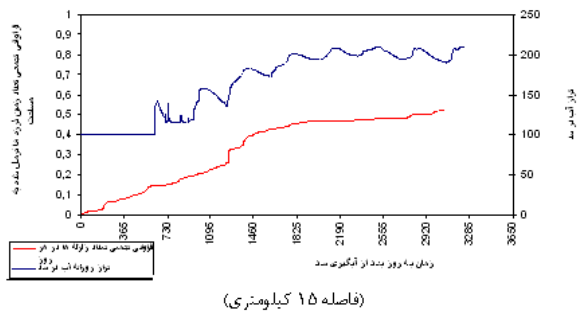


شکل ۱۴. نمودار توزیع انرژی رخدادهای لرزه‌ای واقع شده قبل از آبیگری (a) و بعد از آبیگری (b) در شعاع ۳۰ کیلومتری از محور سد کارون ۳.

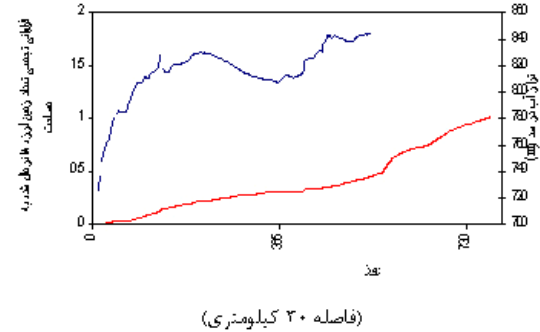
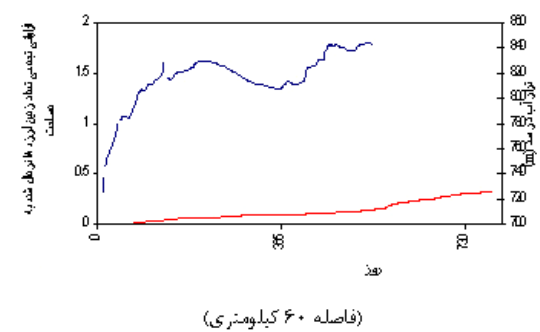
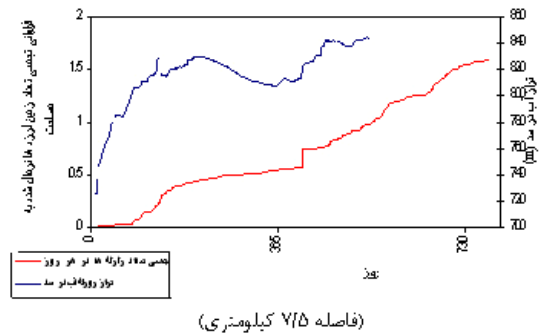
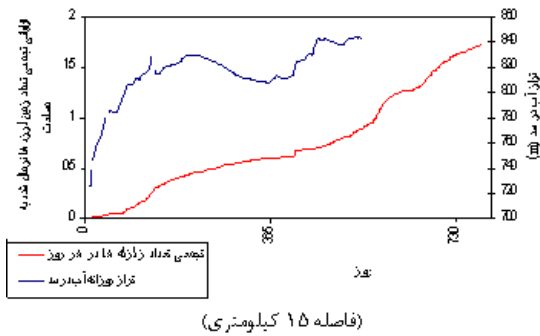
دورتر از مخزن منتقل می‌گردد. در مورد سد کارون ۳ نیز سطح تراز روزانه آب درسد و فراوانی تجمعی زمین‌لرزه‌ها با هم مورد مقایسه قرار گرفتند. بر اساس این مقایسه ملاحظه می‌گردد که هم‌خوانی مناسبی بین تراز آب و تعداد وقوع زمین‌لرزه‌ها در فواصل ۷/۵، ۱۵، ۳۰ و ۶۰ کیلومتری از محور سد وجود دارد. البته تا شعاع ۳۰ کیلومتر از محور سد هم‌خوانی مناسب‌تر است. با توجه به شکل ۱۶ مشاهده می‌گردد که، در فاصله‌های نزدیک تر با کاهش تراز آب تعداد زمین‌لرزه‌ها افزایش ناگهانی را تجربه می‌نماید.

در شکل ۱۵ منحنی فراوانی تجمعی تعداد زمین‌لرزه‌ها و تراز آب مخزن در روزهای بعد از آبیگیری سد باهم مقایسه شده است. ملاحظه می‌گردد که هم‌خوانی مناسبی بین تراز آب و تعداد وقوع زمین‌لرزه‌ها برای همه فواصل ۷/۵، ۱۵، ۳۰ و ۶۰ کیلومتری وجود دارد. البته تا شعاع ۳۰ کیلومتر از محور سد هم‌خوانی مناسب‌تر است.

با توجه به این مقایسه مشاهده می‌گردد که، مدت زمان لازم برای مسطح شدن منحنی فراوانی تجمعی زمین‌لرزه‌ها برای فواصل نزدیک‌تر کوتاه‌تر و برای فواصل دور بلندتر است. به عبارت دیگر با افزایش ارتفاع آب لرزه‌خیزی القائی، به فواصل



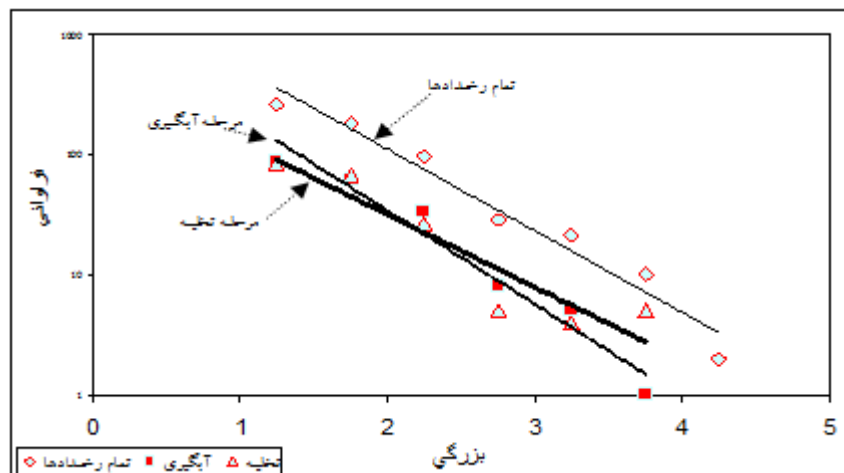
شکل ۱۵. مقایسه تراز روزانه سطح آب با فراوانی تجمعی تعداد رخدادهای لرزه‌ای در هر روز در فواصل ۷/۵، ۱۵، ۳۰ و ۶۰ کیلومتری از ساختگاه سد کرخه.



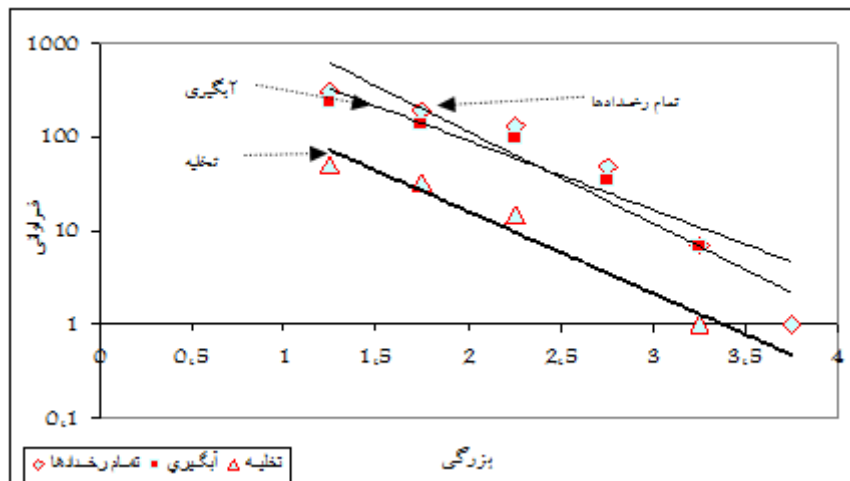
شکل ۱۶. مقایسه تراز روزانه سطح آب با فراوانی تجمعی تعداد رخدادهای لرزه‌ای در هر روز در از ساختگاه سد کارون ۳.

تخلیه می‌باشد (شکل ۱۷) اما در کارون ۳ بر خلاف کرخه فراوانی زمین‌لرزه‌های کوچک در زمان تخلیه بیشتر از زمان آبگیری می‌باشد (شکل ۱۸). البته در مورد کارون ۳ به دلیل کوتاه بودن بازه زمانی داده‌های استفاده شده برای تراز آب این موضوع را با قطعیت نمی‌توان مطرح نمود.

مقایسه فراوانی وقوع زمین‌لرزه‌های با بزرگی مختلف در بازه‌های زمانی آبگیری و تخلیه در دو سد کرخه و کارون ۳ بخوبی پدیده لرزه‌خیزی القایی را در این دو سد در هر دو حالت آبگیری و تخلیه نشان می‌دهد. در خصوص سد کرخه فراوانی زمین‌لرزه‌های کوچک در زمان آبگیری بیشتر از زمان



شکل ۱۷. فراوانی وقوع زمین‌لرزه‌ها در حالت آبگیری و تخلیه آب سد کرخه.



شکل ۱۸. فراوانی وقوع زمین‌لرزه‌ها در حالت آبگیری و تخلیه آب سد کارون ۳.

##### ۵. نتیجه‌گیری

خردلرزه‌ها بیشتر در ارتباط با دریاچه سد گسترش یافته‌اند. ولی در کارون ۳ خردلرزه‌ها بیشتر به نفوذ آب در درز و شکاف‌های موجود در آهک‌ها مربوط می‌شوند و به همین علت با فاصله گرفتن از دریاچه سد تعداد و انرژی این رخدادها زیادتر می‌گردد. با توجه به جنس واحدهای زمین‌شناسی در منطقه کرخه (کنگلومرای بختیاری و رسوبات نرم واحد لهبری) و کارون ۳ (آهک سازندهای پابده و آسماری) و با در نظر گرفتن گسل‌های منطقه می‌توان این مسئله را توجیه نمود.

نتایج تحقیق حاضر نشان می‌دهد که لرزه‌خیزی القایی در هر دو سد مشاهده می‌گردد و مشخصات رخدادهای لرزه‌ای القایی در دو منطقه از نظر کاهش عمق کانونی و رابطه وقوع زمین‌لرزه‌ها با آبگیری مخزن سد یکسان می‌باشد. ولی نوع پاسخ منطقه در برابر این زمین‌لرزه‌ها متفاوت می‌باشند. در مورد سد کرخه تجمع زمین‌لرزه‌ها بعد از آبگیری سد در سمت مخزن بیشتر شده است و با دور شدن از محور سد تعداد و میزان انرژی زمین‌لرزه‌ها کاهش یافته است. یعنی

##### منابع

- شرکت صدر سازه کوشا، ۱۳۸۰. خلاصه گزارشات مرحله اول طرح کرخه (مستندسازی طرح کرخه). شرکت توسعه منابع آب و نیروی ایران. هدهدی، م. ۱۳۸۸. زمین‌لرزه‌های القایی سدهای کرخه و کارون ۳. رساله دکتری موسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران.
- Beacher, B.G., Keeney, R.L., 1982. Statistical examination of reservoir induced seismicity. Bulletin of . Seismological Society of America, 72: 553-369.
- Berberian M., 1995. Master Blind thrust faults hidden under the Zagros folds: active basement tectonics and surface morphotectonics. Tectonophysics, 241(3-4): 199-224.
- Carder, D.S., 1945. Seismic Investigation in the Boulder Dam Area, 1940-1944, and the influence of reservoir loading on earthquake activity. Bulletin of . Seismology Society of America, 35: 175- 192.
- Choudhury S., Gautam, P.K., Paul, A., 2013. Seismicity and reservoir induced crustal motion study around the Tehri Dam, India. Acta Geophtsica, 61(4): 923-934.
- Cluff, L. S., 1977. Notes of visit to Koyna Dam, India, Unpublished report to U. S. Bureau of Reclamation, 13 p.
- Falcon, N.L. 1961. Major Earth-Flexuring in the Zagros Mountains of South-West Iran. Quarterly Journal of Geolical Society of London, 117: 367-376.

- Gough, D.I. and Gough, W.I., 1970. Load-induced earthquakes at Lake Kariba-II. *Geophysical Journal*, 21: 79-101.
- Gupta, H.K., Rastogi, B.K., 1976. *Dams and earthquakes*: New York, Elsevier.
- Huber H. 1977. *Geological Map of Iran*, scale 1:000000 with explanatory notes. Tehran: National Iranian Oil Company, 229 p
- Gupta, H.K. 1992. *Reservoir-Induced Earthquakes*, Elsevier, Amsterdam.
- Simpson, D.W. 1976. Seismicity changes associated with reservoir loading, *Engineering Geology*. 10(2-4): 123-150.
- Leblanc, G. and Anglin, F., 1978. Induced seismicity at the Manic 3 Reservoir, Quebec. *Bulletin of . Seismological Society of America*, 68: 1469-1485.
- Simpson, D.W., Negmatullaev, S.K., 1978. Induced seismicity studies in Soviet central Asia. *Earthquake Information Bulletin*, 10: 208-213
- Simpson, D.W., Leith, W.S. and C.H. Scholz 1988, Two types of reservoir induced seismicity, *Bulletin of Seismological Society of America*, 78(6): 2025-2040.
- Wang, M.Y., Hu, Y. L., Chen, Y.T., Yang, M.Y., Li, T.C., Chin, Y., Feng, J., 1975. Mechanism of reservoir impounding earthquakes at Hsinfengkiang and a preliminary Endeavour to discuss their cause. Peking, 21p.