تابستان ۹۰، سال بیستم، شماره ۸۰، صفحه ۹۵ تا ۱۰۲

لرزه‌خیزی القایی در مخزن سد مسجد سلیمان (جنوب باختر ایران)

محمد تاتار[1*]، محمدرضا ابراهیمی[1] و فرزام یمینی‌فرد[1]

[1]پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله، تهران، ایران

تاریخ دریافت: ۱۳۸۸/۰۴/۰۳ تاریخ پذیرش: ۱۳۸۸/۱۱/۱۸

چکیده

قرار گرفتن سد مسجد سلیمان در زون لرزه زمین‌ساختی زاگرس که یکی از فعال‌ترین زون‌های لرزه‌زمین‌ساختی ایران است، ضرورت انجام مطالعات گسترده و بویژه بررسی اثر دریاچه سد آن (ارتفاع ۱۷۷ متر و حجم ۲۶۱ میلیون متر مکعب) بر تغییرات آهنگ لرزه‌خیزی منطقه را بیش از پیش آشکار می‌سازد. به دنبال اتمام آبگیری مخزن (۲۰۰۲/۰۶/۲۵) و با توجه به داده‌های شبکه‌های ملی و جهانی چون کاتالوگ پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله (IIEES) و کاتالوگ (EHB)، افزایش لرزه‌خیزی در گستره مخزن سد دیده می‌شود و ۹۰ روز پس از اتمام آبگیری در تاریخ ۲۰۰۲/۰۹/۲۵، زمین‌لرزه‌ای با بزرگی M_w =۵/۶ در منطقه سد مسجد سلیمان رخ می‌دهد. شبکه لرزه‌نگاری محلی در منطقه سد از ماه ژوئن سال ۲۰۰۶ نصب شد و اطلاعات لرزه‌ای در فاصله زمانی ۱۵ ماهه تا ماه آگوست سال ۲۰۰۷ مورد بررسی قرار گرفت. بزرگ‌ترین زمین‌لرزه‌های رخ داده در بازه زمانی نصب شبکه لرزه‌نگاری محلی بزرگاهایی معادل M_L =۳/۶ و M_L =۳/۹ داشتند. مطالعات آماری صورت گرفته همگی دلالت بر القایی بودن زمین‌لرزه‌های رخ داده در منطقه سد دارند. به رغم نداشتن یک شبکه محلی در هنگام رخداد زمین‌لرزه ۲۰۰۲/۰۹/۲۵ (M_w =۵/۶) به روشنی می‌توان القایی بودن این زمین‌لرزه را با استفاده از نتایج حاصل از محاسبات آماری انجام شده و به لطف داشتن منحنی تغییرات سطح تراز آب از ابتدای آبگیری مخزن و نیز پس‌لرزه‌های مکان‌یابی شده این زمین‌لرزه توسط تک ایستگاه نصب شده در محل مخزن، اثبات کرد. زمین‌لرزه ۲۰۰۲/۰۹/۲۵ مسجد سلیمان با بزرگی M_w =۵/۶ در واقع نخستین و بزرگ‌ترین زمین‌لرزه القایی است که در ایران شناسایی و روی داده است.

کلیدواژه‌ها: پس‌لرزه، پیش‌لرزه، سد مسجد سلیمان، زمین‌لرزه القایی، لرزه‌خیزی

***نویسنده مسئول:** محمد تاتار

E-mail: mtatar@iiees.ac.ir

۱ – مقدمه

در سال‌های اخیر، رخداد زمین‌لرزه‌های بی‌شماری که منشأ آنها پدیده‌های طبیعی همچون آتشفشان، زمین‌ساخت صفحه‌ای و یا مانند آن نبوده‌اند، توجه زلزله‌شناسان و دیگر پژوهشگران علوم زمین را به خود جلب کرده است. در واقع فعالیت بشر و عملکرد آن به‌صورت‌های مختلف که باعث به‌هم‌خوردگی تنش‌های منطقه‌ای و تغییر شکل پوسته شده است، عامل رخداد چنین رویدادهایی بوده‌اند. بزرگی این زمین‌لرزه‌ها اغلب متوسط بوده اما در چند مورد حتی از ۶ درجه در مقیاس امواج محلی نیز فراتر رفته، که صدمات مالی و جانی فراوانی را به همراه داشته است. اصولاً زمین‌لرزه‌های القایی را زمین‌لرزه‌های تحریک شده می‌نامند که ناشی از عوامل طبیعی نبوده و در دهه‌های اخیر به‌دلیل عملکردهای بشر روی پوسته زمین رخ داده‌اند. زمین‌لرزه‌های القایی را می‌توان به چهار دسته کلی تقسیم کرد:

۱) زمین‌لرزه‌های القایی معدن‌کاری

۲) زمین‌لرزه‌های القایی ناشی از انفجارات هسته‌ای

۳) زمین‌لرزه‌های القایی مربوط به هیدروکربورها

۴) زمین‌لرزه‌های القایی مخزن

در هر یک از موارد یاد شده سطح لرزه‌خیزی ناحیه‌ای که در مجاورت عملیات یاد شده واقع است، با تحریک در اثر نفوذ آب یا مایعات نفتی، و یا تحریک در اثر انفجارهای معدن‌کاری و یا انفجارهای هسته‌ای، افزایش می‌یابد. در همه این موارد با توجه به جمع شدن انرژی درگسل‌های منطقه، عملیات انسانی موجب تحریک گسل‌ها می‌شود و به صورت تسریع کننده رویدادهای لرزه‌ای عمل می‌کند.

با توجه به این که در نوشتار حاضر سعی بر این است تا به بررسی زمین‌لرزه‌های القایی مخزن در مخزن سد مسجد سلیمان پرداخته شود، بنابراین توجه ما بیشتر بر این دسته از انواع زمین‌لرزه‌های القایی معطوف می‌شود.

سد مسجد سلیمان با ارتفاع از پی ۱۷۷ متر، عرض تاج ۱۵ متر، طول تاج ۴۹۷ متر و با دریاچه‌ای به حجم ۲۶۱ میلیون متر مکعب در سطح تراز عادی، یکی از بلندترین سدهای سنگریزه‌ای با هسته رسی قائم کشور به‌شمار می‌رود. طرح سد و نیروگاه مسجد سلیمان در زون لرزه‌زمین‌ساختی زاگرس و در ۲۵ کیلومتری شمال خاور مسجد سلیمان قرار دارد. به دنبال پایان آبگیری مخزن (۲۰۰۲/۰۶/۲۵) با توجه به داده‌های شبکه‌های ملی و جهانی همچون کاتالوگ پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله (IIEES) و کاتالوگ (EHB)، یک افزایش قابل توجه در لرزه‌خیزی گستره مخزن سد دیده می‌شود. به دنبال افزایش لرزه‌خیزی مشاهده‌ای عنوان شده و درست ۹۰ روز پس از پایان آبگیری، زمین‌لرزه‌ای با بزرگی M_w =۵/۶ در تاریخ ۲۰۰۲/۹/۲۵ در مجاورت سد یاد شده اتفاق افتاد. اگرچه رویداد زمین‌لرزه‌هایی با بزرگی مشابه رویداد ۲۰۰۲/۹/۲۵ مسجد سلیمان در زون لرزه‌خیزی چون زاگرس خیلی دور از انتظار نیست، اما نزدیکی زیاد موقعیت مکانی این زمین‌لرزه به سد و مخزن سد مسجد سلیمان و بویژه رخداد آن در فاصله زمانی اندکی پس از پایان آبگیری، فرضیه احتمال القایی بودن این زمین‌لرزه و ارتباط آن با احداث سد یاد شده را تقویت کرد.

به همین دلیل و برای بررسی نقش سد احداث شده و اثر آبگیری مخزن در تغییر آهنگ لرزه‌خیزی منطقه مجاور سد، یک شبکه لرزه‌نگاری متشکل از ۵ ایستگاه کوتاه دوره در پیرامون گستره سد یاد شده نصب شد. همزمانی نصب شبکه یاد شده با راه‌اندازی ۶ ایستگاه لرزه‌نگاری سد و نیروگاه گتوند علیا و نزدیکی یکی از ایستگاه‌های شبکه لرزه‌نگاری باند پهن پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله به منطقه مورد بررسی موجب شد تا در تحلیل زمین‌لرزه‌های روی داده در گستره سد مسجد سلیمان در مجموع از ۱۲ ایستگاه لرزه‌نگاری استفاده شود.

در این نوشتار، بررسی‌های آماری در منطقه سد به روش‌هایی چون مطالعه الگوی پیش‌لرزه‌ها و پس‌لرزه‌ها، آهنگ زوال پس‌لرزه‌ها و مطالعه ارتباط تغییرات تراز آب با لرزه‌خیزی، برای شناسایی و جدایش زمین‌لرزه‌های القایی از رویدادهای زمین‌ساختی انجام شده است.

۲ – وضعیت لرزه‌خیزی و لرزه‌زمین‌ساخت منطقه مسجد سلیمان

منطقه سد مسجد سلیمان به‌عنوان بخشی از زون لرزه‌زمین‌ساختی زاگرس، پتانسیل لرزه‌خیزی بالایی دارد. رخداد زمین‌لرزه‌های دستگاهی بسیار در سده بیستم،

Archive of SID
www.SID.ir

منطقه گستره سد را به‌عنوان منطقه‌ای لرزه‌خیز معرفی می‌کند.

از نظر تاریخی، زمین‌لرزه مهمی در شعاع ۱۰۰ کیلومتری ساختگاه روی نداده است. از مهم‌ترین رویدادهای تاریخی اتفاق افتاده در مناطق همجوار می‌توان به زمین‌لرزه سال ۸۴۰ اهواز، ۱۰۵۲ باغ ملک با بزرگی ۶/۸ و ۱۶۶۶ زاگرس با بزرگی ۶/۵ اشاره کرد که به‌دلیل فاصله دور از گستره مورد نظر اهمیت کمی دارند.

رخداد زمین‌لرزه‌های بسیار، با بزرگی متوسط، از ویژگی‌های منطقه مورد مطالعه به‌عنوان بخشی از زون فعال زاگرس است. به دلیل ویژگی خاص گسل‌های زاگرس که غالباً طولی کمتر از ۱۰۰ کیلومتر دارند (Jackson & Fitch, 1981)، بزرگی زمین‌لرزه‌های روی داده در این زون، به ندرت بیشتر از ۷ هستند(Ambraseys & Melville, 1982).

پراکندگی مکانی رومرکز زمین‌لرزه‌های روی‌داده در منطقه مورد مطالعه براساس کاتالوگ زمین‌لرزه‌های پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی از سال ۱۹۱۳ تا ۲۰۰۷ میلادی در شکل۱ نشان داده شده است. همان‌گونه که در شکل ۱ دیده می‌شود و با توجه به پراکندگی گسل‌های مهم منطقه، احتمال فعالیت گسل‌هایی چون لهبری، پیراحمد و مسجد سلیمان بیشتر از دیگر گسل‌هاست. اما در هر حال پراکندگی زمین‌لرزه‌ها و تعداد کم آنها، مانع نسبت دادن لرزه‌خیزی موجود به گسلی خاص است. تنها نکته با اهمیت در این شکل، دلالت آشکار آن بر لرزه‌خیزی بالای گستره مورد مطالعه است. از مهم‌ترین زمین‌لرزه‌های دستگاهی روی داده در گستره سد و نیروگاه مسجد سلیمان می‌توان به زمین‌لرزه ۱۹۲۹/۰۷/۱۵ ایذه- اندیکا و زمین‌لرزه ۲۰۰۲/۰۹/۲۵ مسجد سلیمان اشاره کرد.

پژوهشگران زیادی ژرفای زمین‌لرزه‌ها در زون زاگرس را با استفاده از امواج P دورلرزه‌ای مطالعه کرده‌اند. این مطالعات نشان می‌دهد که ژرفای کانونی زمین‌لرزه‌ها در محدوده ۱۴-۸ کیلومتر قرار می‌گیرد. Maggi et al. (2000) نشان دادند که لرزه‌خیزی در زون زاگرس محدود به ۲۰ کیلومتر اول پوسته می‌شود.

جدیدترین مطالعات انجام شده در زاگرس، براساس بررسی دقیق خردزمین‌لرزه‌های ثبت شده در یک شبکه متراکم محلی (Tatar et al., 2004; Yamini-Fard et al., 2006) نشان می‌دهد که ژرفای کانونی چیره زمین‌لرزه‌ها در این زون، در ژرفای ۱۶-۸ کیلومتر واقع می‌شوند. مطالعات انجام شده همگی دلالت بر پی سنگی بودن زمین‌لرزه‌های بزرگ در زون زاگرس دارند.

سازوکار حاکم بر زمین‌لرزه‌های منطقه مسجد سلیمان (شکل۱)، از نوع وارون با شیب زیاد است که این خود ناشی از سازوکار فشاری حاکم بر منطقه در اثر همگرایی دو صفحه عربی و اوراسیاست. بنابر جدیدترین مطالعات انجام شده (Walpersdorf et al., 2006 ; Tatar et al., 2004) دست کم ۴۰٪ این نیروی فشاری در زاگرس تعدیل می‌شود که موجب کوتاه‌شدگی این زون در راستای شمال خاور- جنوب باختر می‌شود. این کوتاه‌شدگی در سطح به‌صورت چین‌خوردگی رسوبات و در بخش بالایی پوسته بلورین به شکل گسلش‌های وارون خود را نشان می‌دهد.

۳ – چگونگی ایجاد زمین‌لرزه‌های القایی

عامل‌های زیادی مثل تغییرات سطح آب، وجود گسل‌های فعال، نوع سنگ‌های موجود در منطقه و شرایط هیدروژئولوژیکی حاکم بر منطقه در وقوع زمین‌لرزه‌های القایی مخزن مؤثر هستند. اما افزون بر این عامل‌ها، میدان تنش زمین‌ساختی اولیه در منطقه سد نیز اهمیت ویژه‌ای در رخداد این نوع زمین‌لرزه‌ها دارد.

ویژگی‌های کلی زمین‌لرزه‌های القایی مخزن که آنها را از زمین‌لرزه‌های معمولی متمایز می‌کند توسط Gupta et al. (1972) مورد بررسی قرار گرفته است. ایشان نشان دادند که به‌دنبال آبگیری دریاچه‌ها، لرزش‌ها شروع می‌شوند، یا بسامد رخدادشان افزایش می‌یابد. رومرکز چنین زمین‌لرزه‌هایی بیشتر در فاصله‌ای در حدود ۲۵ کیلومتری از دریاچه‌ها قرار می‌گیرند و ژرفای کانونی آنها در حدود صفر تا ۲۰-۱۰ کیلومتر است.

بررسی‌ها نشان می‌دهند که نسبت زمین‌لرزه‌های القایی مخزن با افزایش ژرفا و حجم مخزن افزایش می‌یابد. برای سدهای بزرگ با ارتفاع سد بیش از ۱۰۰ متر و یا حجم مخزن بیش از۱۰۰ میلیون‌متر مکعب، احتمال رخداد این نوع زمین‌لرزه‌ها افزایش می‌یابد.

آهنگ افزایش سطح آب دریاچه، مدت بارگذاری، بالاترین سطحی که آب به آن رسیده است و مدت زمانی که در آن سطح آب در بالاترین وضع خود قرار داشته است از عامل‌های مؤثر بر بسامد رخداد زمین‌لرزه‌های القایی هستند.

وقوع زمین‌لرزه‌های القایی مخزن، یک احتمال تصادفی دارد و کمتر تحت‌تأثیر درجه فعالیت لرزه‌خیزی منطقه قرار می‌گیرد و بیشتر وابسته به ساختار زمین‌شناسی در محل مخزن و عامل هیدروژئولوژی آن است. در همه مخازنی که زمین‌لرزه‌های القایی داشته‌اند، به رغم وجود ساختارهای زمین‌شناسی متفاوت، یک ویژگی در همه آنها مشترک بوده است و آن داشتن قابلیت نفوذپذیری بالای آب است. موارد گوناگون زمین‌لرزه‌های القایی در دنیا نشان می‌دهند که در مخازن با زمین‌لرزه‌های القایی قوی، به طور معمول گسل‌هایی فعال از زیر یا حاشیه مخزن عبور می‌کنند (Ma et al., 1976).

۴– روش‌های شناسایی زمین‌لرزه‌های القایی

۴–۱. مطالعه ارتباط تغییرات سطح آب و لرزه‌خیزی منطقه

زمین‌لرزه‌های القایی را می‌توان به‌عنوان پاسخ پوسته زیر مخزن در نتیجه اعمال یک بارگذاری بیرونی روی آن در نظر گرفت. تابع نیروی این بارگذاری تغییرات سطح آب در مخزن است که سبب تغییر در لرزه‌خیزی منطقه می‌شود و این تغییر در نتیجه افزایش تنش الاستیک و افزایش فشار منفذی است که شرایط تنش منطقه را تغییر می‌دهد(Snow, 1982; Simpson et al., 1976). لرزه‌خیزی به‌صورت مطلق وابسته به سطح تراز آب است چرا که همه افزایش‌ها در لرزه‌خیزی زمانی رخ می‌دهند که تراز آب نزدیک یا بالای سطح بیشینه خود باشد.

۴–۲. الگوی پیش‌لرزه‌ها و پس‌لرزه‌ها

Mogi (1963) الگوی پیش‌لرزه‌ها و پس‌لرزه‌ها را به سه دسته مطابق شکل ۲ طبقه‌بندی کرد و این الگوها را با زمین‌لرزه‌های طبیعی مقایسه کرد. اختلاف میان این سه مدل در وضعیت ساختاری مواد و پراکندگی فضایی تنش‌ها به‌صورت زیر است:

نوع ۱- در حالتی که مواد همگن بوده و تنش‌ها به صورت یکنواخت اثر می‌کنند، زمین‌لرزه اصلی بدون هیچ پیش‌لرزه‌ای رخ می‌دهد و با تعداد زیادی پس‌لرزه الاستیک همراه است.

نوع ۲- زمانی که مواد، ساختاری به نسبت ناهمگن باشند و یا تنش‌های اعمال شده یکنواخت نباشند، لرزه‌های الاستیکی کوچکی پیش از زمین‌لرزه اصلی رخ می‌دهد و پس از آن تعداد زیادی پس‌لرزه رخ خواهد داد.

نوع ۳- در حالتی که ساختار مواد به‌طور کامل ناهمگن بوده و یا تنش‌های اعمال شده در مناطق مشخصی تمرکز داشته و یکنواخت نباشند، بزرگای زمین‌لرزه اصلی در ابتدا زیاد شده و پس از گذشت مدت زمانی کاهش می‌یابد.

در سال‌های زیادی، مطالعات مختلف انجام گرفته بر روی الگوی پیش‌لرزه‌ها و پس‌لرزه‌های زمین‌لرزه‌های القایی، بویژه در سدها (Gupta et al., 1972) مشخص کرد که این زمین‌لرزه‌ها از الگوی نوع ۲ (1963) Mogi پیروی می‌کنند.

۴–۳. زوال پس‌لرزه‌ها

بر مبنای مطالعات(1965) Utsu، پراکندگی پس‌لرزه‌ها در زمان را می‌توان با رابطه زیر بیان کرد:

Archive of SID

www.SID.ir

$$n(t) = ct^{-h} \quad (1)$$

که در آن $n(t)$ فراوانی پس‌لرزه‌ها در واحد زمان، c و h ضرایب ثابت و t زمان سپری شده از زمین‌لرزه اصلی است. ضریب h بیانگر نرخ زوال فراوانی پس‌لرزه‌ها است و می‌توان از آن برای موقعیت فیزیکی و وضعیت تنش ناحیه تحت‌تأثیر استفاده کرد(Mogi, 1963). بر مبنای مطالعات Utsu (1965)، بخش آغازین نمودار فراوانی پس‌لرزه‌ها به‌طور قابل قبولی تا زمان‌هایی حدود ۱۰۰ روز از رابطه (۱) پیروی می‌کند. پس از این زمان می‌توان از رابطه زیر استفاده کرد:

$$n(t) = c_1 e^{-pt} \quad (2)$$

که در آن c_1 و p ضرایب ثابت هستند.

Gupta et al. (1972) اشاره کردند که پراکندگی زمانی پس‌لرزه‌ها در کاریبا، کرماستا و کوینا را می‌توان با رابطه (۱) بیان کرد. همچنین آنها متوجه شدند که مقادیر h برای زمین‌لرزه‌های القایی ناشی از آبگیری مخازن سدها در مقایسه با زمین‌لرزه‌های طبیعی کوچک‌تر هستند. جدول۱ توسط Gupta & Rastogi (1976) تهیه شده است که در آن روابط زوال پس‌لرزه‌ها برای زمین‌لرزه‌های القایی متفاوتی ارائه شده است.

۵- زمین‌لرزه‌های القایی در گستره سد مسجد سلیمان

۵-۱. روش پژوهش

تعداد کل زمین‌لرزه‌های تعیین محل شده با دقت مطلوب در منطقه سد مسجد سلیمان در فاصله زمانی ۱۵ ماه از ژوئن ۲۰۰۶ تا آگوست ۲۰۰۷، ۳۶۰۹ زمین‌لرزه است که توسط ۵ ایستگاه محلی نصب شده در محدوده سد و نیروگاه مسجد سلیمان و نیز با بهره‌گیری از ۶ ایستگاه سد و نیروگاه گتوند و یک ایستگاه لرزه‌نگاری باند پهن پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله، جمعاً ۱۲ ایستگاه ثبت شده‌اند.

برای انجام بررسی‌های دقیق‌تر روی زمین‌لرزه‌های القایی، از آن‌جایی که رومرکز چنین زمین‌لرزه‌هایی بیشتر تا فاصله ۳۰ کیلوتری از محل تاج سد قرار می‌گیرند و ژرفای کانونی آنها نیز میان ۰ تا ۲۰ کیلومتر است (Gupta et al.,1972)، زمین‌لرزه‌های خارج از محدوده ۳۰ کیلومتری تاج سد و زمین‌لرزه‌های بیشتر از ژرفای ۲۰ کیلومتر نیز حذف شدند و تعداد رویدادهای باقی‌مانده به ۱۹۲۴ زمین‌لرزه کاهش یافت (شکل۴).

پس از اعمال تصحیحات لازم، مطالعات آماری بر روی داده‌های اصلاح شده، مطابق روش‌های عنوان شده در بخش چهارم، اعمال شد که در ادامه نتایج به تفصیل مورد بحث و بررسی قرار خواهند گرفت.

۵-۲. مطالعه ارتباط تغییرات سطح آب و لرزه‌خیزی منطقه

از آن‌جایی که هیچ شبکه لرزه‌نگاری محلی پیش از آبگیری و به هنگام آن در اطراف سد مسجد سلیمان و در منطقه سد وجود نداشته است، اطلاعات لرزه‌ای پیش از این تاریخ محدود است. با این وجود و به لطف در اختیار داشتن منحنی تغییرات سطح آب از زمان شروع آبگیری، تلاش شد تا تنها با استفاده از زمین‌لرزه‌های دستگاهی گزارش شده در کاتالوگ‌های داخلی و جهانی چون کاتالوگ پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله (IIEES) و کاتالوگ اصلاح شده ISC (EHB، Engdahl et al.,2006) به بررسی ارتباط میان تکمیل آبگیری سد و تغییر آهنگ لرزه‌خیزی منطقه پرداخته شود (شکل ۵).

همان‌گونه که در شکل ۵ دیده می‌شود، به دنبال افزایش سطح تراز آب، شاهد افزایش لرزه‌خیزی بویژه در مورد کاتالوگ EHB بوده و در تاریخ ۲۰۰۲/۰۹/۲۵ و درست ۹۰ روز پس از رسیدن سطح آب دریاچه به حد بیشینه خود، شاهد وقوع زمین‌لرزه‌ای با بزرگی M_w =۵/۶ در مجاورت سد مسجد سلیمان هستیم. اگر چه به‌دلیل وجود خطای زیاد در مکان‌یابی این زمین‌لرزه در کاتالوگ EHB، موقعیت دقیق آن مشخص نیست، اما پس‌لرزه‌های زمین‌لرزه ۲۰۰۲/۰۹/۲۵ مسجد سلیمان که توسط تک ایستگاه نصب شده در منطقه مکان‌یابی شده‌اند، با در نظر گرفتن بیشترین خطای ±۵ کیلومتر، درست در بخش جنوبی دریاچه سد مسجد سلیمان قرار می‌گیرند(شکل ۶). بنابراین انتظار می‌رود که کانون سطحی زمین‌لرزه اصلی نیز در موقعیتی مشابه پس‌لرزه‌های روی داده و در زیر دریاچه سد مسجد سلیمان مکان‌یابی شود.

با توجه به مجاورت محل رخداد زمین‌لرزه ۲۰۰۲/۰۹/۲۵ مسجد سلیمان با دریاچه سد یاد شده، ارتباط بسیار نزدیک زمان رخداد این زمین‌لرزه با تکمیل آبگیری سد و رسیدن سطح آب دریاچه به بیشترین مقدار خود، افزایش آشکار لرزه‌خیزی‌ها در هنگام آبگیری مخزن در منطقه سد، احتمال القایی بودن زمین‌لرزه ۲۰۰۲/۰۹/۲۵ با بزرگی M_w =۵/۶ خیلی بالاست.

مقایسه تغییرات سطح آب و لرزه‌خیزی منطقه (بر اساس داده‌های محلی پژوهش حاضر)، به روشنی میزان افزایش لرزه‌خیزی‌ها و ارتباطش با سطح تراز آب را نمایش می‌دهد(شکل ۷).

در این شکل، ۴ تغییر آشکار در سطح تراز آب که منجر به افزایش فعالیت لرزه‌خیزی شده، مشخص شده است. هر یک از افزایش‌های دیده شده در تعداد رویدادها، با رخداد یک زمین‌لرزه بزرگ همراه است که ویژگی‌های این رویدادها در جدول ۲ و موقعیت مکانی آنها در شکل ۶ آورده شده است.

اولین افزایش قابل توجه در تعداد زمین‌لرزه‌های روی داده در یک روز، در تاریخ ۲۰۰۶/۱۰/۱۳ دیده می‌شود. با توجه به پراکنده بودن زمین‌لرزه‌های روی داده در این روز و با در نظر گرفتن بیشینه بزرگای ثبت شده برابر با M_L=۱/۷، بعید به نظر می‌رسد که رویداد یاد شده از نوع القایی باشد اگر چه پس از یک افزایش ناگهانی در سطح تراز آب دریاچه رخ داده است.

همان‌گونه که دیده می‌شود افزایش لرزه‌خیزی به‌شدت به تغییرات سطح تراز آب وابسته است و زمانی که سطح تراز آب نزدیک یا بالای بیشترین مقدار خود است، لرزه‌خیزی‌ها نیز افزایش شدیدی نشان می‌دهند.

همان‌گونه در شکل ۷ دیده می‌شود لرزه‌خیزی‌ها در هر سه مورد با افزایش سطح تراز آب افزایش یافته و پس از رسیدن به نقطه اوج سطح تراز آب بسامد رخداد زمین‌لرزه‌ها نیز افزایش می‌یابد. در زمین‌لرزه ۲۰۰۶/۱۱/۲۳ با افزایش سطح تراز آب، از ۳۶۸ متر تا ۳۷۰/۵ متر، ۳۴ فوج لرزه در نقطه اوج سطح تراز آب در یک روز روی می‌دهد. در مورد زمین‌لرزه ۲۰۰۶/۰۶/۰۴ نیز تغییر سطح تراز آب از ۳۶۸/۵ متر تا ۳۷۲ متر باعث رخداد ۳۰ فوج لرزه می‌شود و در مورد آخر برای زمین‌لرزه ۲۰۰۶/۰۸/۰۱ نیز افزایش سطح تراز آب از ۳۶۷ متر تا ۳۷۰ متر، سبب رخداد ۵۵ فوج لرزه در این روز می‌شود. بنابراین با توجه به این مشاهدات می‌توان ارتباط روشنی را میان افزایش سطح تراز آب و افزایش تعداد رخداد زمین‌لرزه‌ها تصور کرد.

۵-۳. الگوی پیش‌لرزه‌ها و پس‌لرزه‌ها

همان‌گونه پیش‌تر توضیح داده شد، زمین‌لرزه‌های القایی مخزن الگوی پیش‌لرزه‌ها و پس‌لرزه‌ها از الگوی نوع ۲ Mogi (1963) پیروی می‌کند. در شکل ۷ تعداد کل زمین‌لرزه‌های رخ داده از تاریخ ۲۰۰۶/۰۹/۲۲ تا تاریخ ۲۰۰۷/۰۸/۳۱ به‌صورت روزانه نمایش داده شده است.

همان گونه که از شکل۷ پیداست، ۴ افزایش شدید در فراوانی زمین‌لرزه‌ها دیده می‌شود که از الگوی نوع ۲ Mogi (1963) پیروی می‌کنند. البته افزایش اول همان‌طور که پیش‌تر نیز عنوان شد به‌دلیل پراکندگی رویدادها و دارا بودن بیشینه بزرگی کوچک (M_L= ۱/۷)، دور از ذهن به نظر می‌رسد که مرتبط با تغییرات سطح تراز آب و از نوع القایی باشد. اما ۳ تغییر دیگر در فراوانی زمین‌لرزه‌ها به روشنی همخوانی خوبی را با الگوی نوع ۲ Mogi (1963) نشان می‌دهند. به‌عنوان

Archive of SID

www.SID.ir

مثال الگوی پیش‌لرزه‌ها و پس‌لرزه‌ها برای رویداد زمین‌لرزه ۲۰۰۶/۱۱/۲۳ با بزرگی M_L= ۳/۹ در شکل ۸ نشان داده شده است. همان‌گونه که در شکل دیده می‌شود، پراکندگی فراوانی پیش‌لرزه‌ها و روند کاهشی پس‌لرزه‌ها به خوبی از الگوی ۲ Mogi (1963) پیروی می‌کند که دلالت بر القایی بودن زمین‌لرزه یاد شده دارد. نمودارهای مشابه رسم شده برای دو زمین‌لرزه دیگر نیز تأییدکننده پیروی آنها از الگوی نوع۲ Mogi (1963) بوده است و نشان می‌دهند که رویدادهای یاد شده نیز القایی هستند.

۵-۴. زوال پس‌لرزه‌ها

برای محاسبه نرخ زوال پس‌لرزه‌ها در منطقه از آن‌جایی که میزان این پس‌لرزه‌ها در فواصل زمانی کمتر از ۱۰۰ روز هستند از رابطه (۱) که توسط Utsu (1965) ارائه شده است، استفاده شد.

نتایج به‌دست آمده توسط این رابطه که بر روی پس‌لرزه‌های زمین‌لرزه‌های القایی برگزیده (جدول۲) اعمال شده، در جدول۳ آمده است.

مقادیر h برای زمین‌لرزه‌های القایی ناشی از آبگیری مخازن سدها در مقایسه با زمین‌لرزه‌های طبیعی کوچک‌تر است و این مقادیر در روزهای ابتدایی با ضریبی در حدود $t^{-3/4}$ (h≈۰/۷۵) کاهش می‌یابد و هر چه تعداد روزهای طولانی‌تری از زمین‌لرزه اصلی را سپری کنیم به سوی t^{-1} (h=1) میل می‌کند. برای ۳ زمین‌لرزه برگزیده نیز همان‌گونه که در جدول۳ دیده می‌شود، مقدار h برای زمین‌لرزه‌های شماره ۱ و ۲، به‌ترتیب ۰/۷ و ۰/۸ با زمان کل ۱۶ و ۲۶ روز است و این مقدار برای زمین‌لرزه شماره ۳ به ۰/۹ با زمان کل ۳۱ روز افزایش می‌یابد. همان‌گونه که دیده می‌شود میزان ضریب h برای هر ۳ رویداد کمتر از ۱ است و با افزایش تعداد روزهای گذشته از رویداد اصلی، شاهد نزدیک‌تر شدن ضریب h به مقدار ۱ هستیم. نتایج به‌دست آمده بر روی این ۳ رویداد برگزیده با نتایج ارائه شده در جدول۱ برای نمونه‌های مختلف از زمین‌لرزه‌های القایی، همخوانی خوبی دارند.

۶ – بحث و نتیجه‌گیری

در نوشتار حاضر، روش‌های مختلفی چون بررسی تغییرات سطح تراز آب با لرزه‌خیزی منطقه، مطالعه الگوی پیش‌لرزه‌ها و پس‌لرزه‌ها و تعیین آهنگ زوال پس‌لرزه‌ها برای شناسایی زمین‌لرزه‌های القایی مخزن از زمین‌لرزه‌های زمین‌ساختی ارائه شدند.

بررسی پراکندگی فراوانی زمین‌لرزه‌های روی داده در گستره سد مسجد سلیمان نسبت به تغییرات سطح تراز آب دریاچه نشان می‌دهد هر زمان که سطح تراز آب افزایش قابل توجهی یافته است، فراوانی زمین‌لرزه‌ها نیز افزایش چشمگیری از خود نشان می‌دهند. یک وابستگی به طورکامل مشخص میان این دو، دست‌کم برای بزرگ‌ترین زمین‌لرزه‌های روی داده در گستره مخزن مسجد سلیمان دیده می‌شود. چنین گمان می‌شود که مهم‌ترین عامل افزایش لرزه‌خیزی در گستره مورد مطالعه، فشار وزنی مخزن بر روی پوسته و افزایش فشار آب منفذی باشد که باعث ایجاد تنش‌های ناهمگن در منطقه سد و رخداد فوج لرزه‌ها می‌شود. ارتباط مشخصی میان رخداد زمین‌لرزه‌های متعدد و تغییرات سطح تراز آب دیده می‌شود. فراوانی زمین‌لرزه‌های دستگاهی، گزارش شده در کاتالوگ IIEES و EHB در گستره سد مسجد سلیمان، افزایش قابل توجهی را متناسب با افزایش سطح تراز آب دریاچه این سد نشان می‌دهد. افزون بر این، ۹۰ روز پس از پایان آبگیری مخزن، زمین‌لرزه ۲۰۰۲/۹/۲۵ با بزرگی M_w =۵/۶ در مجاورت این سد اتفاق افتاده است. بر اساس شکل۶، پس‌لرزه‌های این زمین‌لرزه در پیرامون گسل باغ ملک واقع می‌شوند. افزایش آشکار لرزه‌خیزی‌ها در هنگام آبگیری مخزن در منطقه سد، و ارتباط بسیار نزدیک زمان رخداد زمین‌لرزه یاد شده با تکمیل آبگیری سد و رسیدن سطح آب دریاچه به بیشترین مقدار خود، دلالت بر القایی بودن زمین‌لرزه ۲۰۰۲/۰۹/۲۵ با بزرگی M_w =۵/۶ دارد.

مقایسه تغییرات سطح آب و لرزه‌خیزی منطقه پس از نصب شبکه لرزه‌نگاری محلی نیز به روشنی میزان افزایش لرزه‌خیزی‌ها و ارتباطش با سطح تراز آب را نمایش می‌دهد. این ارتباط نزدیک، دست‌کم برای ۴ تغییر مشخص در سطح تراز آب که سبب افزایش فعالیت لرزه‌خیزی شده‌اند، قابل مشاهده است. در تمامی موارد بالا، زمانی که سطح تراز آب به نزدیک یا بالای بیشترین مقدار پیشین خود رسیده، لرزه‌خیزی نیز با افزایش شدیدی همراه بوده است. بنابراین می‌توان ارتباط روشنی را میان افزایش سطح تراز آب و افزایش بسامد رخداد زمین‌لرزه‌ها در این موارد گمان کرد.

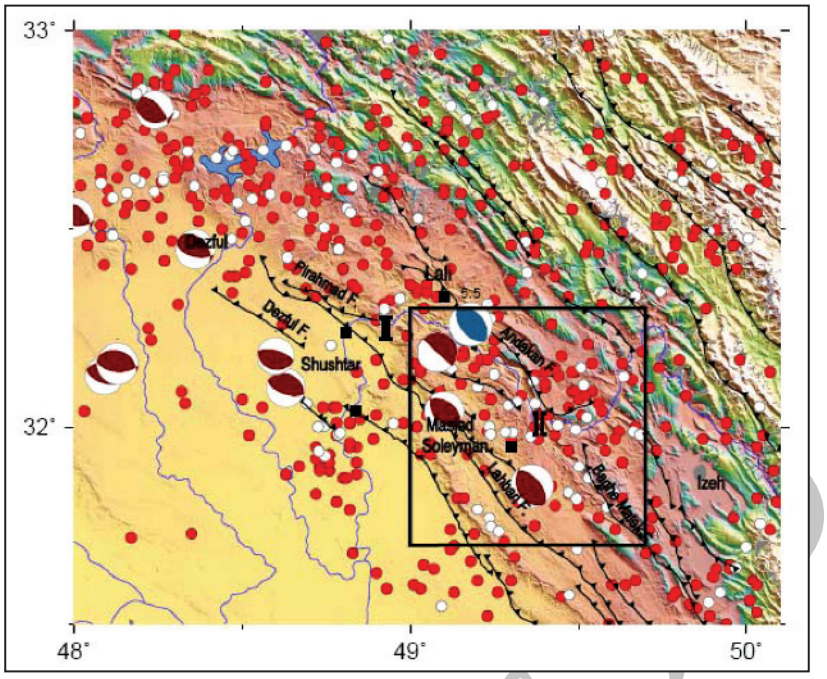
الگوی پیش‌لرزه‌ها و پس‌لرزه‌ها برای ۳ زمین‌لرزه محلی بزرگ روی داده در گستره سد مسجد سلیمان به‌خوبی با الگوی ۲ Mogi (1963) برای زمین‌لرزه‌های القایی همخوانی دارد و آهنگ زوال پس‌لرزه‌های به‌دست آمده برای آنها (جدول ۳) نیز همخوانی خوبی با آهنگ زوال پس‌لرزه‌های زمین‌لرزه‌های القایی نشان می‌دهد(h<1). موارد عنوان شده به‌همراه فاصله مناسب رخداد این زمین‌لرزه‌ها از مخزن سد، بویژه دو زمین‌لرزه با بزرگای M_L= ۳/۹ و ML= ۳/۶ که در حوالی گسل باغ ملک رخ داده‌اند به‌طور حتم نشان‌دهنده القایی بودن این زمین‌لرزه‌ها است. مجاورت محل رخداد دو زمین‌لرزه یادشده و پس‌لرزه‌های رویداد ۲۰۰۲/۹/۲۵ مسجد سلیمان (M_w= ۵/۶) که همگی در بخش پایانی گسل باغ‌ملک واقع می‌شوند، حکایت از پتانسیل بالای مخزن سد مسجدسلیمان در ایجاد زمین‌لرزه‌های القائی دارد.

سپاسگزاری

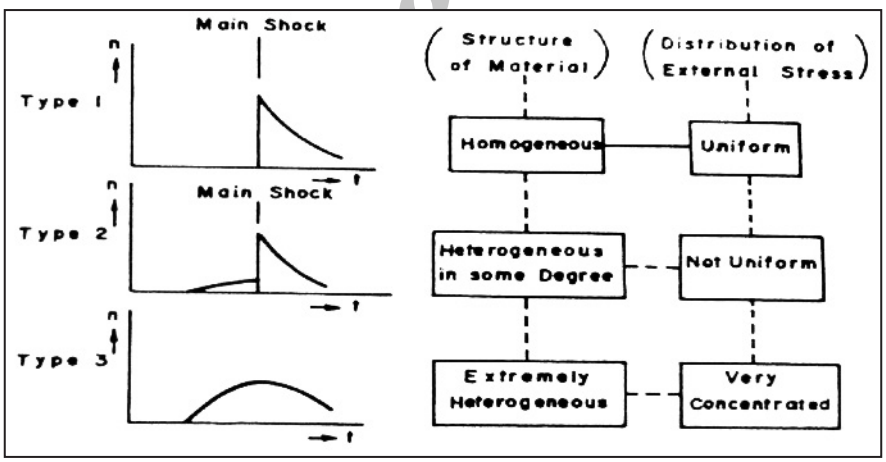
این پژوهش نتیجه قرارداد پژوهشی بسته شده میان پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله به‌عنوان مشاور و شرکت آب نیرو طرح سد و نیروگاه مسجد سلیمان، و سازمان آب و برق خوزستان، معاونت بهره‌برداری سد و نیروگاه به‌عنوان کارفرما است. بدین‌وسیله از همه مسئولینی که امکان انجام پژوهش حاضر را فراهم کردند صمیمانه سپاسگزاری می‌شود. از آقای مهندس محسن دزواره که با دقت فراوان زحمت خواندن فاز و تعیین محل اولیه رویدادهای ثبت شده در شبکه لرزه‌نگاری سد و نیروگاه مسجد سلیمان را به عهده داشتند و از آقای مهندس حمیدرضا محمد یوسف که در همه مراحل نوفه‌سنجی، نصب ایستگاه‌ها و جمع‌آوری داده‌ها مشتاقانه ما را یاری کردند نیز تشکر می‌شود.

Archive of SID

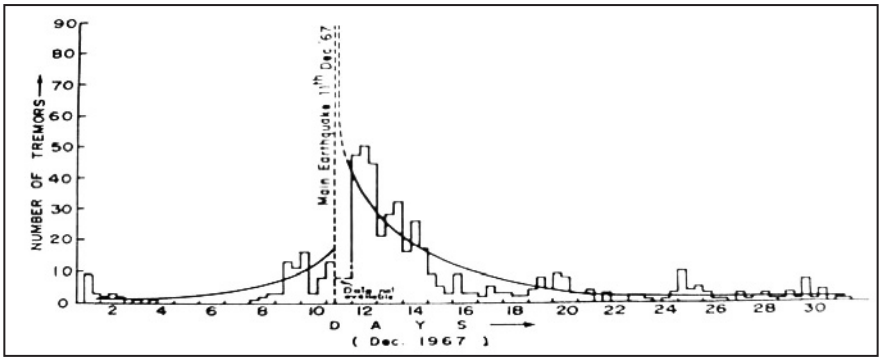
www.SID.ir



شکل۱- زمین‌لرزه‌های دستگاهی در منطقه سد مسجد سلیمان بر اساس کاتالوگ زمین‌لرزه‌های پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله (دایره‌های سرخ) و کاتالوگ EHB (Engdahl et al., 2006) (دایره‌های سفید)، به‌همراه سازوکارهای کانونی گزارش شده در منطقه سد و نیروگاه مسجد سلیمان براساس حل‌های ارائه شده توسط مرکز لرزه‌نگاری دانشگاه هاروارد.

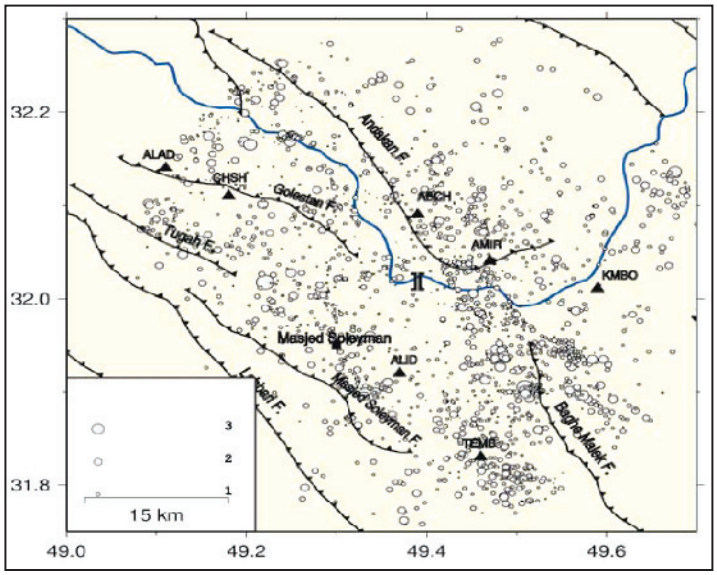


شکل۲- الگوهای مختلف پراکندگی پیش‌لرزه‌ها و پس‌لرزه‌ها همراه با زمان و رابطه آنها با نوع ساختار مواد تشکیل‌دهنده محیط و نحوه پراکندگی تنش‌های خارجی اعمالی (Mogi, 1963).

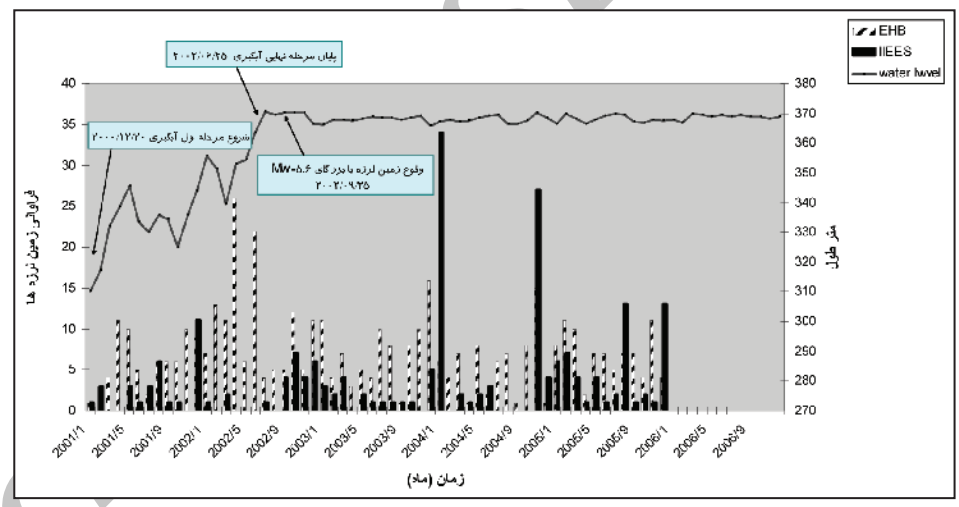


شکل ۳- الگوی پیش‌لرزه‌ها و پس‌لرزه‌های زمین‌لرزه ۱۱ دسامبر سال ۱۹۶۷ کوینا (Guha et al.,1968).

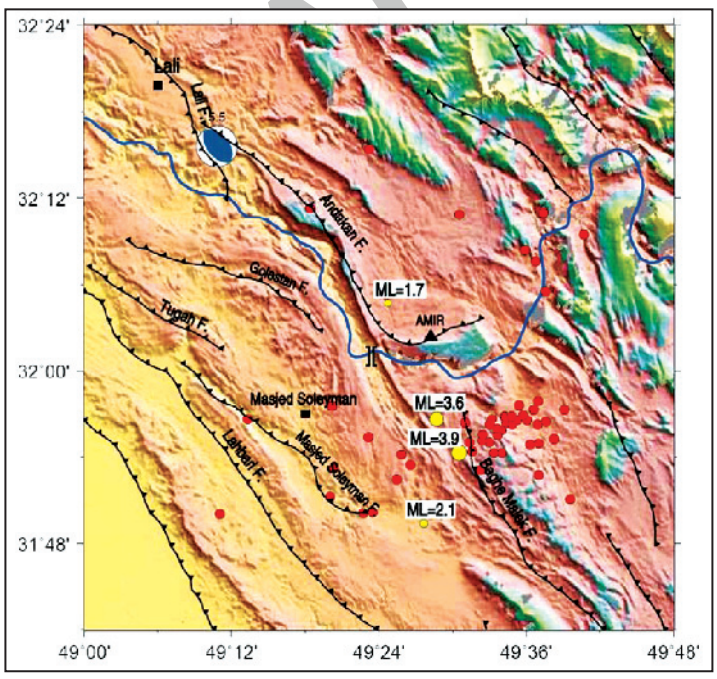
www.SID.ir



شکل۴- ۱۹۲۴ زمین‌لرزه ثبت شده در منطقه سد مسجد سلیمان تا شعاع ۳۰ کیلومتری تاج سد و تا ژرفای ۲۰ کیلومتر به‌همراه موقعیت ایستگاه‌ها و گسل‌های منطقه.

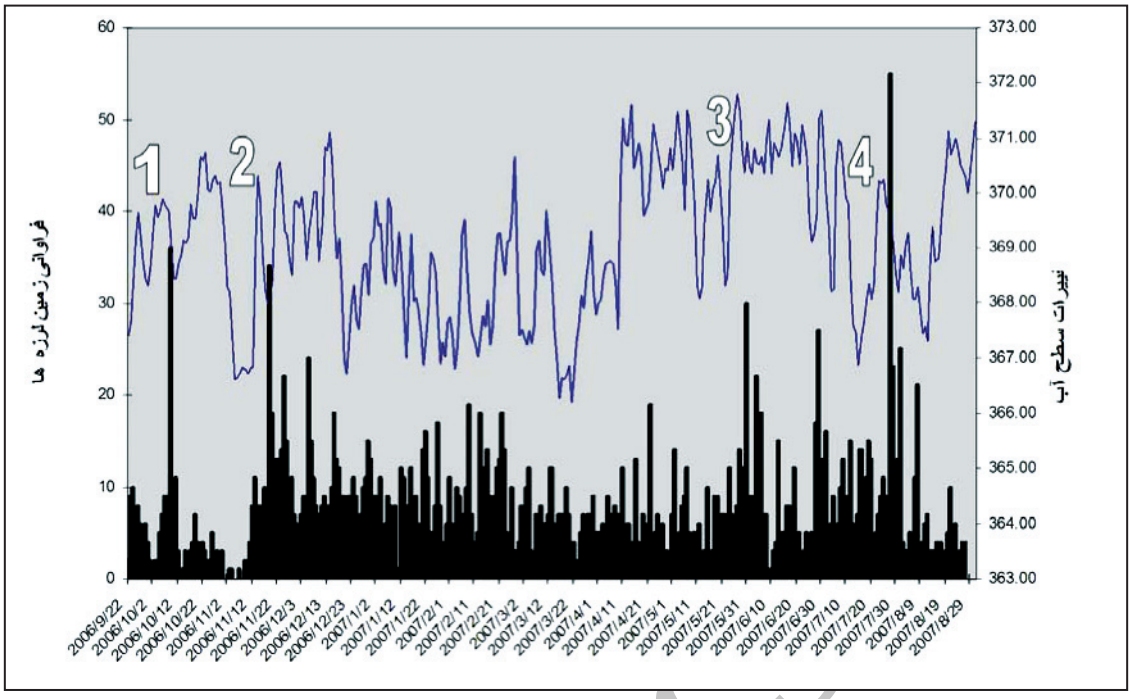


شکل۵- نمایش کلی تغییرات سطح تراز آب و لرزه‌خیزی دستگاهی ثبت شده توسط کاتالوگ پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله (IIEES) و کاتالوگ اصلاح شده ISC (EHB) در گستره سد مسجد سلیمان

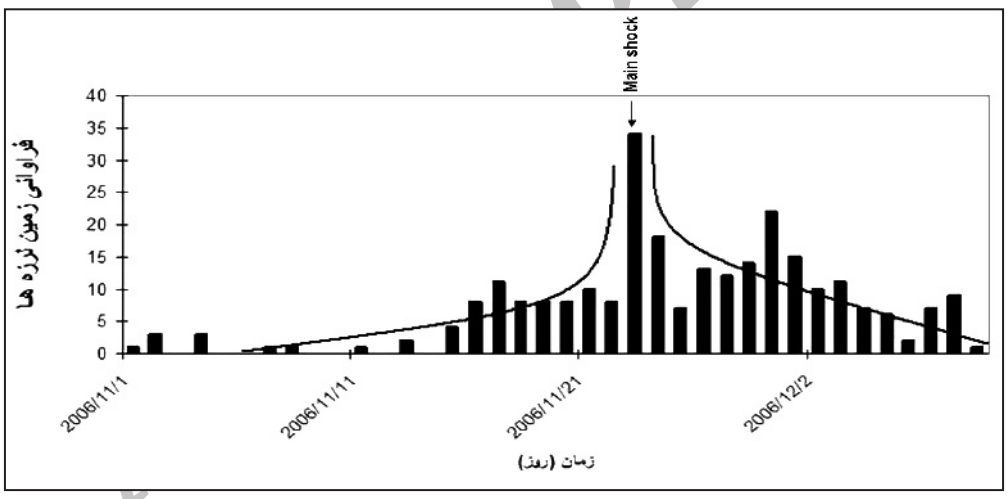


شکل۶- موقعیت مکانی و بزرگای زمین‌لرزه‌های القایی برگزیده (دایره‌های زرد) به‌همراه پس‌لرزه‌های مکان‌یابی شده زمین‌لرزه ۲۰۰۲/۰۹/۲۵ با بزرگی M_w=۵/۶، توسط تک ایستگاه مستقر در روستای امیرالمؤمنین (دایره‌های سرخ). محل و سازوکار کانونی ارائه شده برای این زمین‌لرزه توسط CMT نیز در شکل دیده می‌شودکه البته موقعیت مکانی آن با خطای قابل توجهی همراه است.

www.SID.ir



شکل ۷- نمایش کلی تغییرات سطح تراز آب و لرزه‌خیزی در منطقه سد مسجد سلیمان.



شکل ۸- نمونه‌ای از الگوی پیش‌لرزه‌ها و پس‌لرزه‌ها برای زمین‌لرزه ۲۰۰۶/۱۱/۲۳ با بزرگی M_L = ۳/۹.

جدول ۱- روابط ارائه شده برای زوال فعالیت پس‌لرزه‌ها (Gupta & Rastogi, 1976).

Region	$n(t) = Ct^{-h}$	Unit of time	Total time
Kariba	$130t^{-1.0}$	1 day	60 days
Kremasta	$134t^{-0.78}$	1 day	200 days
Koyna	$180t^{-1.0}$	1 day	110 days
Koyna	$1{,}342t^{-0.77}$	15 days	Dec. 1967 to Dec. 1971
Kurobe	$Ct^{-0.67}$	cumulative	Nov. 16, 1968 to April 1970
Hsinfengkiang	$Ct^{-0.90}$	cumulative	96 days
Oroville	$Ct^{-0.70}$	hours	10 days
Oroville	$112t^{-0.78}$	1 day	100 days
Aswan	$20t^{-1.0}$	1 day	100 days
Bhatsa	$300t^{-1.0}$	1 day	500 days

www.SID.ir

جدول ۲- زمان، موقعیت مکانی، بزرگا و ژرفای زمین‌لرزه‌های القایی برگزیده.

	زمان	طول جغرافیایی(درجه)	عرض جغرافیایی(درجه)	بزرگا(ML)	ژرفا(متر)
۱	۲۰۰۶/۱۰/۱۳	۴۹/۴۱۲	۳۲/۰۷۹	۱/۷	۱۲/۹
۲	۲۰۰۶/۱۱/۲۳	۴۹/۵۰۹	۳۱/۹۰۵	۳/۹	۱۵/۲
۳	۲۰۰۷/۰۶/۰۴	۴۹/۴۶۱	۳۱/۸۲۳	۲/۱	۹
۴	۲۰۰۷/۰۸/۰۱	۴۹/۴۷۸	۳۱/۹۴۴	۳/۶	۱۵/۷

جدول ۳- روابط به‌دست آمده برای زوال فعالیت پس‌لرزه‌ها.

	تاریخ رخداد	$n(t)=ct^{-h}$	واحد زمانی	زمان کل
۱	۲۰۰۶/۱۱/۲۳	$n(t)=34t^{-0.7}$	۱ روز	۱۶ روز
۲	۲۰۰۷/۰۶/۰۴	$n(t)=30t^{-0.8}$	۱ روز	۲۶ روز
۳	۲۰۰۷/۰۸/۰۱	$n(t)=55t^{-0.9}$	۱ روز	۳۱ روز

References

Ambraseys, N. N. & Melville, C. P., 1982- A history of Persian Earthquakes, Cambridge Earth Science Series, Cambridge University Press, London.

Engdahl, E. R., Jackson, J. A., Myers, S. C., Bergman, E. A. & Priestley, K., 2006- Relocation and assessment of seismicity in the Iran region, Geophys. J. Int. 167, 761-779.

Guha, S. K., Gosavi, P. D., Varma, M. M., Agarwal, B. N. P., Padale, J. G. & Marwadi, S. C., 1968- Recent seismic disturbances in the Koyna hydroelectric project, Maharashtra, India, Report, Central Water and Power Research Station, India.

Gupta, H. K. & Rastogi, B. K. & Narain, H., 1972- Common features of the reservoir associated seismic activities , Bull.Seis.Soc.Am.62 ,No2 ,pp.481- 492 .

Gupta, H. K. & Rastogi, B. K., 1976- Dams and earthquakes , Elsevier , the Netherlands , 229pp.

Jackson, J. & Fitch, T., 1981- Basement faulting and the focal depths of the larger earthquakes in the Zagros mountains (Iran), Geophys. J. R. Astr. Soc. London, 64, 561-586.

Ma, J., Zehua, Q. & Guoxi, L., 1976- A newly discovered major fault of the 1976 Tangshan earthquake in China, in Housner, G.W. and He, D., eds., 2002, The Great Tangshan Earthquake of, Vol. 1, Chpt. 1: 48-57

Maggi, A., Jackson, J. A., Priestley, K. & Baker, C., 2000- A re-assessment of focal depth distributions in southern Iran, Tien Shan and northern India:do earthquakes really occur in the continental mantle?, Geophys. J. Int.,143, 629-661.

Mogi, K., 1963- Some discussions on aftershock , foreshocks and earthquake swarms – the fracture of semi-infinite body caused by an inner stress origin and its relation to the earthquake phenomena (third paper), Bull. Earthquake Res. Inst., 41 , 615-658.

Nur, A. & Booker, J. R., 1972- Aftershocks caused by pore fluid flow? ,Science, 175, 885-887.

Simpson, D., Negmatullaev, W. & Kh, S., 1976- Induced Seismicity at Nurek Reservoir, 78 Bull. Seis. Soc. Am., 2025 (1988).

Snow, D. T., 1982- Hydrogeology of induced seismicity and tectonism ; case histories of Kariba and Koyna , Geol. Sco. Am. Spec. Pap. No. 168, 317-60.

Tatar, M., Hatzfeld, D. & Ghafory-Ashtiany, M., 2004- Tectonics of the Central Zagros (Iran) deduced from microearthquake seismicity, Geophys. J. Int., 156, 255-266.

Tatar, M., Hatzfeld, D., Martinod, J., Walpersdorf, A., Ghafori-Ashtiany, M. & Chéry, J., 2002- The present-day deformation of the central Zagros (Iran) from GPS measurements, Geoph. Res. Lett., Vol. 29, No. 19, pp. 1927-1930.

Utsu, T., 1965- A method for determining the value of b in the formula logN=a-bM , showing the frequency-magnitude relation for earthquakes , Geophy. Bull. , Hokkaido Uni.13 , 99-103.

Walpersdorf, A., Hatzfeld, D., Nankali, H., Tavakoli, F., Nilforoushan, F., Tatar, M., Vernant, P., Chéry, J. and Masson, F., 2006- Difference in the GPS deformation pattern of North and Central Zagros (Iran), Geophys. J. Int.

Yamini-Fard, F., Hatzfeld, D., Tatar, M. & Mokhtari, M., 2006- Microseismicity on the Kazerun fault system (Iran): evidence of a strike-slip shear zone and a thick crust, Geophys J. Int., 166, 186-196.

Archive of SID

www.SID.ir