لرزه خیزی القایی در مخزن سد مسجد سلیمان (جنوب باختر ایران) محمد تاتارانه محمدرضا ابراهیمی و فرزام یمینی فرد^۱

پژوهشگاه بینالمللی زلزلهشناسی و مهندسی زلزله، تهران، ایران تاریخ دریافت: ۱۳۸۸/۱۴/۱۳ تاریخ پذیرش: ۱۳۸۸/۱۱/۱۸

چکیدہ

المعاوية ال

قرار گرفتن سد مسجد سلیمان در زون لرزه زمین ساختی زاگرس که یکی از فعال ترین زون های لرزه زمین ساختی ایران است، ضرورت انجام مطالعات گسترده و بویژه بررسی اثر در یاچه سد آن (ارتفاع ۱۷۷ متر و حجم ۲۹۱ میلیون متر مکعب) بر تغییرات آهنگ لرزه خیزی منطقه را بیش از پیش آشکار می سازد. به دنبال اتمام آبگیری مخزن (۲۰۰۲/۹/۱۵) در یا توجه به داده های شبکه های ملی و جهانی چون کاتالوگ پژوه شگاه بین المللی زلز له شناسی و مهندسی زلزله (IEES) و کاتالوگ پژوه شگاه بین المللی زلز له شناسی و مهندسی زلزله (IEES) و کاتالوگ (EHB)، افزایش لرزه خیزی در گستره مخزن محدی محدی معنی محدی شده می شود و ۹۰ روز پس از اتمام آبگیری در تاریخ ۲۰۰۲/۱۹/۱۵ بین المللی زلزله شناسی و مهندسی زلزله (IEES) و کاتالوگ (EHB)، افزایش لرزه خیزی در گستره مخزن مع د دیده می شود و ۹۰ روز پس از اتمام آبگیری در تاریخ ۲۰۰۲/۱۹/۱۵ بین لرزه ای از گر ۹/۵ سای و مهندسی زلزله (Zee به در می قرار گرفت. بزرگ ته ۶/۵ سای محلی در منطقه سد در منطقه سد مسجد سلیمان رخ می دهد. شبکه لرزه نگاری محلی در معلقه سد از ماه ژوئن سال ۲۰۰۶ نصب شد و اطلاعات لرزه ای دا فاصل زمان ۵ معلی در فاصله زلز دامی ۱۵ معنی دا ماه آگوست سال ۲۰۰۷ مورد بررسی قرار گرفت. بزرگ ترین زمین لرزه های رخ داده در بازه زمانی ناصب شبکه لرزه نگاری محلی در فاصله زمانی ۱۵ ماه تا ماه آگوست سال ۲۰۰۷ مورد بررسی قرار گرفت. بزرگ الهایی بودن زمین لرزه های رخ داده در منطقه سد داز د. به رغم نداشتن یک شبکه محلی در هنگام رخداد زمین لرزه ۲۰۹/۹/۱۳ (۶/۵ سی) به روشنی می توان القایی بودن این زمین لرزه را با استفاده از نتایج حاصل از مطلقه سد دارند. به رغم نداشتن یک شبکه محلی در هنگام رخداد زمین لرزه ۲۰۱/۹/۹ (۶/۵ سی) به روشنی می توان القایی بودن این زمین لرزه را با استفاده از نتایج حاصل از محلی انجام شده و به لطف داشتن منحنی تغییرات سطح تراز آب از ایندای آبگیری مخزن و نیز پس لرزه همای مکان یایی شده این زمین لرزه را با استفاده از نتایج حاصل از محلی مازی انجام شده و به لطف داشتن منحنی تغیرات مرفزه اله تر گرگیری مخزن و نیز پس لرزه های مکان یایی شره و باز رون نرزه در این المایی و روی داد است. در محل مخزن، اثبات کرد. زمین لرزه ۲۰۱/۹/۵ می سی سی مرفزه و نور های مردن ای المایی مردن المای این مای می مده می نر ور مردن ای از مرزه می مردن ای از مری مردی مرزه ان

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 زمین لرزههای بی شماری که منشأ آنها پدیدههای طبیعی همچون آتشفشان، زمین ساخت صفحهای و یا مانند آن نبوده اند، توجه زلزله شناسان و دیگر پژوه شگران علوم زمین را به خود جلب کرده است. در واقع فعالیت بشر و عملکرد آن به صورت های مختلف که باعث به هم خور دگی تنش های منطقه ای و تغییر شکل پوسته شده است، عامل رخداد چنین رویدادهایی بوده اند. بزرگی این زمین لرزه ها اغلب متوسط بوده اما در چند مورد حتی از ۶ درجه در مقیاس امواج زمین لرزه های اغلب متوسط بوده اما در چند مورد حتی از ۶ درجه در مقیاس امواج زمین لرزه های القایی را زمین لرزه های تحریک شده می نامند که ناشی از عوامل طبیعی نبوده و در دهه های اخیر به دلیل عملکردهای بشر روی پوسته زمین رخ داده اند. زمین لرزه های القایی را می توان به چهار دسته کلی تقسیم کرد:

- ۱) زمینلرزههای القایی معدن کاری
- ۲) زمینلرزههای القایی ناشی از انفجارات هستهای
- ۳) زمینلرزههای القایی مربوط به هیدرو کربورها
 - 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 معدن کاری 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 می شود.

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 میدهای سنگر بزرای بارجسته رسی قائم کشور به شمار می رود. طرح سد و نیروگاه مسجد سلیمان در زون لرزهزمین ساختی زاگرس و در ۲۵ کیلومتری شمال خاور

مسجد سلیمان قرار دارد. به دنبال پایان آبگیری مخزن (۲۰۰۲/۰۶/۱۷) با توجه به دادههای شبکههای ملی و جهانی همچون کاتالوگ پژوهشگاه بین المللی زلزله شناسی و مهندسی زلزله (IIEES) و کاتالوگ (EHB)، یک افزایش قابل توجه در لرزه خیزی گستره مخزن سد دیده می شود. به دنبال افزایش لرزه خیزی مشاهدهای عنوان شده و درست ۹۰ روز پس از پایان آبگیری، زمین لرزه ای با بزرگی ۶ /۵= ۲۰ در تاریخ ۲۰۰۲/۹/۲۵ در مجاورت سد یاد شده اتفاق افتاد. اگرچه رویداد زمین لرزه هایی با بزرگی مشابه رویداد ۲۰۰۲/۹/۲۵ مسجد سلیمان در زون لرزه خیزی چون زاگرس خیلی دور از انتظار نیست، اما نزدیکی زیاد موقعیت مکانی این زمین لرزه به سد و مخزن سد مسجد سلیمان و بویژه رخداد آن در فاصله زمانی اندکی پس از پایان آبگیری، فرضیه احتمال القایی بودن این زمین لرزه 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 لرزه خیزی منطقه مجاور سد، یک شبکه لرزه نگاری متشکل از ۵ ایستگاه کوتاه دوره در پیرامون گستره سد یاد شده نصب شد. همزمانی نصب شبکه یاد شده با راهاندازی ۶ ایستگاه لرزه نگاری سد و نیروگاه گتوند علیا و نزدیکی یکی از ایستگاههای شبکه لرزه نگاری باند پهن پژوهشگاه بین المللی زلزله شناسی و مهندسی زلزله به منطقه مورد بررسی موجب شد تا در تحلیل زمین لرزههای روی داده در گستره سد مسجد سلیمان در مجموع از ۱۲ ایستگاه لرزه نگاری 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 زمین ساختی انجام شده است.

۲ - وضعیت لرزهخیزی و لرزهزمینساخت منطقه مسجد سلیمان

منطقه سد مسجد سلیمان به عنوان بخشی از زون لرزهزمین ساختی زاگرس، پتانسیل لرزه خیزی بالایی دارد. رخداد زمین لرزه های دستگاهی بسیار در سده بیستم، ۹۵

منطقه گستره سد را بهعنوان منطقهای لرزهخیز معرفی می کند.

از نظر تاریخی، زمین لرزه مهمی در شعاع ۱۰۰ کیلومتری ساختگاه روی نداده است. از مهمترین رویدادهای تاریخی اتفاق افتاده در مناطق همجوار میتوان به زمین لرزه 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 زمین لرزههای 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 زمین لرزههای روی داده در این زون، به ندرت بیشتر از ۷ هستند(Ambraseys & Melville, 1982).

پراکندگی مکانی رومر کز زمین لرزه های روی داده در منطقه مورد مطالعه براساس کاتالوگ زمین لرزه های پژوهشگاه بین المللی زلزله شناسی از سال ۱۹۱۳ تا ۲۰۰۷ میلادی در شکل ۱ نشان داده شده است. همان گونه که در شکل ۱ دیده می شود و با توجه به پراکندگی گسل های مهم منطقه، احتمال فعالیت گسل هایی چون لهبری، پیراحمد و مسجد سلیمان بیشتر از دیگر گسل هاست. اما در هر حال پراکندگی زمین لرزه ها و تعداد کم آنها، مانع نسبت دادن لرزه خیزی موجود به گسلی خاص است. تنها نکته با اهمیت در این شکل، دلالت آشکار آن بر لرزه خیزی بالای گستره مورد مطالعه است. از مهم ترین زمین لرزه های دستگاهی روی داده در گستره سد و نیرو گاه مسجد سلیمان می توان به زمین لرزه ۱۹۲۹/۰۷/۱۵ ایذه – اندیکا و زمین لرزه

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. (2000) Maggi et al نشان دادند که لرزه خیزی در زون زاگرس محدود به ۲۰ کیلومتر اول پوسته می شود.

جدیدترین مطالعات انجام شده در زاگرس، براساس بررسی دقیق خردزمین لرزه های ثبت شده در یک شبکه متراکم محلی ((Yamini-Fard et al., 2004) نشان می دهد که ژرفای کانونی چیره زمین لرزه ها در این زون، در ژرفای ۱۶–۸ کیلومتر واقع می شوند. مطالعات انجام شده همگی دلالت بر پی سنگی بودن زمین لرزه های بزرگ در زون زاگرس دارند.

سازوکار حاکم بر زمین لرزه های منطقه مسجد سلیمان (شکل ۱)، 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 می شود که موجب کوتاه شدگی این زون در راستای شمال خاور – جنوب باختر می شود. این کوتاه شدگی در سطح به صورت چین خوردگی رسوبات و در بخش بالایی پوسته بلورین به شکل گسلش های وارون خود را نشان می دهد.

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 زمین لرزههای القایی مخزن که آنها را از زمین لرزههای معمولی متمایز می کند توسط (Gupta et al. (1972 مورد بررسی قرار گرفته است. ایشان نشان دادند که به دنبال آبگیری دریاچهها، لرزش ها شروع می شوند، یا بسامد رخدادشان افزایش می یابد. رومرکز چنین زمین لرزههایی 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 از ۱۰۰ 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 زمین لرزههای القایی هستند.

وقوع زمین لرزه های القایی مخزن، یک احتمال تصادفی دارد و کمتر تحت تأثیر درجه فعالیت لرزه خیزی منطقه قرار می گیرد و بیشتر وابسته به ساختار زمین شناسی در محل مخزن و عامل هیدروژ ئولوژی آن است. در همه مخازنی که زمین لرزه های القایی داشته اند، به رغم وجود ساختارهای زمین شناسی متفاوت، یک ویژگی در همه آنها مشترک بوده است و آن داشتن قابلیت نفوذ پذیری بالای آب است. موارد گوناگون زمین لرزه های القایی در دنیا نشان می دهند که در مخازن با زمین لرزه های القایی قوی، به طور معمول گسل هایی فعال از زیر یا حاشیه مخزن عبور می کنند (Ma et al., 1976).

۴- روشهای شناسایی زمینلرزههای القایی ۴-۱. مطالعه ارتباط تغییرات سطح آب و لرزهخیزی منطقه

زمین لرزه های القایی را می توان به عنوان 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 لرزه خیزی منطقه می شود و این تغییر در نتیجه افزایش تنش الاستیک و افزایش فشار منفذی است که شرایط تنش منطقه را تغییر می دهد (1976 یا است چرا که همه افزایش ها در لرزه خیزی زمانی رخ می دهند که تراز آب نزدیک یا بالای سطح بیشینه خود باشد.

۲-۴. الگوی پیشلرزهها و پسلرزهها

Mogi (1963) الگوی پیش لرزمه و پس لرزمها را به سه دسته مطابق شکل ۲ طبقهبندی کرد و این الگوها را با زمین لرزمهای طبیعی مقایسه کرد. اختلاف میان این سه مدل در وضعیت ساختاری مواد و پر اکندگی فضایی تنش ها به صورت زیر است: نوع ۱- در حالتی که مواد همگن بوده و تنش ها به صورت یکنواخت اثر می کنند، زمین لرزه اصلی بدون هیچ پیش لرزهای رخ می دهد و با تعداد زیادی پس لرزه الاستیک همراه است.

نوع ۲- زمانی که مواد، ساختاری به نسبت ناهمگن باشند و یا تنش های اعمال شده یکنواخت نباشند، لرزههای الاستیکی کوچکی پیش از زمین لرزه اصلی رخ میدهد و پس از آن تعداد زیادی پس لرزه 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 زمین لرزه اصلی در ابتدا زیاد شده و پس از گذشت مدت زمانی کاهش می یابد.

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

4-3 . زوال پسلرزهها

بر مبنای مطالعات(Utsu (1965، پراکندگی پس لرزهها در زمان را می توان با رابطه زیر بیان کرد:



(1)

(٢)

که در آن (n(t) فراوانی پس لرزهها در واحد زمان، c و h ضرایب ثابت و t زمان سپری شده از زمین لرزه اصلی است. ضریب h بیانگر نرخ زوال فراوانی پس لرزهها است و می توان از آن برای موقعیت فیزیکی و وضعیت تنش ناحیه تحت تأثیر استفاده کرد(Mogi, 1963). بر مبنای مطالعات (Utsu (1965)، بخش آغازین نمودار فراوانی پس لرزهها به طور قابل قبولی تا زمانهایی حدود ۱۰۰ روز از رابطه (۱) پیروی می کند. پس از این زمان می توان از رابطه زیر استفاده کرد:

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

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

که در آن_اc و p ضرایب ثابت هستند.

Gupta et al. (1972) اشاره کردند که پراکندگی زمانی پس لرزهها در کاریبا، کرماستا و کوینا را می توان با رابطه (۱) بیان کرد. همچنین آنها متوجه شدند که مقادیر h برای زمین لرزههای القایی ناشی از آبگیری مخازن سدها در مقایسه با زمین لرزههای طبیعی کوچک تر هستند. جدول ۱ توسط (1976) Gupta & Rastogi تهیه شده است که در آن روابط زوال پس لرزهها برای زمین لرزههای القایی متفاوتی ارائه شده است.

3- زمینلرزههای القایی در گستره سد مسجد سلیمان 1-4. روش پژوهش

تعداد کل زمین لرزه های تعیین محل شده با دقت مطلوب در منطقه سد مسجد سلیمان در فاصله زمانی ۱۵ ماه از ژوئن ۲۰۰۶ تا آگوست ۲۰۰۷، ۳۶۰۹ زمین لرزه است که توسط ۵ ایستگاه محلی نصب شده در محدوده سد و نیروگاه مسجد سلیمان و نیز با بهره گیری از ۶ ایستگاه سد و نیروگاه گتوند و یک ایستگاه لرزهنگاری باند پهن پژوهشگاه بین المللی زلزله شناسی و مهندسی زلزله، جمعاً ۱۲ ایستگاه ثبت شدهاند.

برای انجام بررسی های دقیق تر روی زمین لرزه های القایی، از آنجایی که رومرکز چنین زمین لرزه هایی بیشتر تا فاصله ۳۰ کیلو تری از محل تاج سد قرار می گیرند و ژرفای کانونی آنها نیز میان ۲ تا ۲۰ کیلومتر است (Gupta et al.,1972)، زمین لرزه های خارج از محدوده ۳۰ کیلومتری تاج سد و زمین لرزه های بیشتر از ژرفای ۲۰ کیلومتر نیز حذف شدند و تعداد رویدادهای باقی مانده به ۱۹۲۴ زمین لرزه 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.

5-2. 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 کاتالو گهای داخلی و جهانی چون کاتالو گ پژوهشگاه بینالمللی زلزلهشناسی و مهندسی زلزله (IEES) و کاتالوگ اصلاح شده ISC بینالمللی زلزلهشناسی و مهندسی زلزله (Engdahl et al.,2006 EHB) آهنگ لرزه خیزی منطقه پرداخته شود (شکل ۵).

همان گونه که در شکل ۵ دیده می شود، به دنبال افزایش سطح تراز آب، شاهد افزایش لرزه خیزی 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 زمین لرزهای با بزرگی ۵/۶۰ سM در مجاورت سد مسجد سلیمان هستیم. اگر چه بودلیا محکو خطای زیاد در مکانیابی این زمین لرزه در کاتالوگ EHB، موقعیت دقیق آن مشخص نیست، اما پس لرزههای زمین لرزه ۵ ۲۰۰۲/۰۹/۲۰ 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 می گیرند(شکل ۶). بنابراین انتظار میرود که کانون سطحی زمین لرزه اصلی نیز در موقعیتی مشابه پس لرزه های روی داده و در زیر دریاچه سد مسجد سلیمان مکانیابی شود.

با توجه به مجاورت محل رخداد زمین لرزه ۲۰۰۲/۰۹/۲۵ مسجد سلیمان با دریاچه سد یاد شده، ارتباط بسیار نزدیک زمان رخداد این زمین لرزه با تکمیل آبگیری سد و رسیدن سطح آب دریاچه به بیشترین مقدار خود، افزایش آشکار لرزه خیزی ها در هنگام آبگیری مخزن در منطقه سد، احتمال القایی بودن زمین لرزه ۲۰۰۲/۰۹/۲۵ با بزرگی ۵/۹= Mw 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 لرزه خیزی شده، مشخص شده است. هر یک از افزایش های دیده شده در تعداد رویدادها، با رخداد یک زمین لرزه بزرگ همراه است که ویژگی های 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 ۲۷–ML، 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.

همان گونه 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.

همان گونه در شکل ۷ دیده می شود لرزه خیزی ها در هر سه مورد با افزایش سطح تراز آب افزایش یافته و پس از رسیدن به نقطه اوج سطح تراز آب بسامد رخداد زمین لرزه ها نیز افزایش می یابد. در زمین لرزه ۲۰۰۶/۱۱/۳۳ با افزایش سطح تراز آب، از ۳۶۸ متر تا ۲۰۷۵ متر، ۳۴ فوج لرزه در نقطه اوج سطح تراز آب از یک روز روی می دهد. در مورد زمین لرزه ۲۰۰۶/۰۶/۰۴ نیز تغییر سطح تراز آب از ۲۸۸/۵ متر تا ۳۷۲ متر باعث رخداد ۳۰ فوج لرزه می شود و در مورد آخر برای زمین لرزه ۲۰۰۶/۰۸/۱۰ نیز افزایش سطح تراز آب از ۲۰۶ متر تا ۳۷۰ متر، سبب رخداد ۵۵ فوج لرزه در این روز می شود. بنابراین با توجه به این مشاهدات می توان ار تباط روشنی را میان افزایش سطح تراز آب و افزایش تعداد رخداد زمین لرزه ها تصور کرد.

۵-۳. الگوی پیشلرزهها و پسلرزهها

همان گونه پیش تر توضیح داده شد، زمین لرزههای القایی مخزن الگوی پیش لرزهها و پس لرزهها از الگوی نوع ۲ (Mogi (1963) پیروی می کند. در شکل ۷ تعداد کل زمین لرزههای رخ داده از تاریخ ۲۰۰۶/۰۹/۲۲ تا تاریخ ۲۰۰۷/۰۸/۳۱ به صورت روزانه نمایش داده شده است.

همان گونه که از شکل۷ پیداست، ۴ افزایش شدید در فراوانی زمینلرزهها دیده می شود که از الگوی نوع ۲ (Mogi (1963) پیروی می کنند. البته افزایش اول همان طور که پیش تر نیز عنوان شد به دلیل پراکندگی رویدادها و دارا بودن بیشینه بزرگی کوچک (M_L= 1/۷)، دور از ذهن به نظر می رسد که مرتبط با تغییرات سطح تراز آب و از نوع القایی باشد. اما ۳ تغییر دیگر در فراوانی زمین لرزهها به روشنی همخوانی خوبی را با الگوی نوع ۲ (Mogi (1963) نشان می دهند. به عنوان

مثال الگوی پیش لرزهها و پس لرزهها برای رویداد زمین لرزه ۲۰۰۶/۱۱/۲۳ با بزرگی M_L= ۳/۹ در شکل ۸ نشان داده شده است. همان گونه که در شکل دیده می شود، پراکندگی فراوانی پیش لرزهها و روند کاهشی پس لرزهها به خوبی از الگوی ۲ (Mogi (1963) پیروی می کند که دلالت بر القایی بودن زمین لرزه یاد شده دارد. نمودارهای مشابه رسم شده برای دو زمین لرزه دیگر نیز تأیید کننده پیروی آنها از الگوی نوع ۲ (Mogi (1963) بوده است و نشان می دهند که رویدادهای یاد شده نیز القایی هستند.

5-4. 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 بر گزیده (جدول۲) اعمال شده، در جدول۳ آمده است.

مقادیر h برای زمین لرزه های القایی ناشی از آبگیری مخازن سدها در مقایسه با زمین لرزه های طبیعی کوچک تر است و این مقادیر در روزهای ابتدایی با ضریبی در حدود ^{4/4} (۲۰/۰۰هـ) کاهش می یابد و هر چه تعداد روزهای طولانی تری از زمین لرزه اصلی را سپری کنیم به سوی ¹⁻t(l=h) میل می کند. برای ۳ زمین لرزه بر گزیده نیز همان گونه که در جدول ۳ دیده می شود، مقدار h برای زمین لرزه های شماره ۱ و ۲، به تر تیب ۷/۰ و ۸/۰ با زمان کل ۱۶ و ۲۶ روز است و این مقدار برای زمین لرزه شماره ۳ به ۸/۰ با زمان کل ۱۶ روز افزایش می یابد. همان گونه که دیده می شود میزان ضریب h برای هر ۳ رویداد کمتر از ۱ است و با افزایش تعداد روزهای گذشته از رویداد اصلی، شاهد نزدیک تر شدن ضریب h به مقدار ۱ هستیم. نتایج به دست آمده بر روی این ۳ رویداد بر گزیده با نتایج ارائه شده در جدول ۱ برای نمونه های مختلف از زمین لرزه های القایی، همخوانی خوبی دارند.

6 - بحث و نتیجهگیری

در نوشتار حاضر، روش های مختلفی چون بررسی تغییرات سطح تراز آب با لرزه خیزی منطقه، مطالعه الگوی پیش لرزهها و پس لرزهها و تعیین آهنگ زوال پس لرزهها برای شناسایی زمین لرزههای القایی مخزن از زمین لرزههای زمین ساختی ارائه شدند.

بررسی پراکندگی فراوانی زمین لرزه های روی داده در گستره سد مسجد سلیمان نسبت به تغییرات سطح تراز آب دریاچه نشان می دهد هر زمان که سطح تراز آب افزایش قابل توجهی یافته است، فراوانی زمین لرزه ها نیز افزایش چشمگیری از خود نشان می دهند. یک وابستگی به طور کامل مشخص میان این دو، دست کم برای بزرگترین زمین لرزه های روی داده در گستره مخزن مسجد سلیمان دیده می شود. چنین گمان می شود که مهم ترین عامل افزایش لرزه خیزی در گستره مورد مطالعه، فشار وزنی مخزن بر روی پوسته و افزایش فشار آب منفذی باشد که باعث ایجاد تنش های ناه مگن در منطقه سد و رخداد فوج لرزه ها می شود. ارتباط مشخصی میان رخداد زمین لرزه های متعدد و تغییرات سطح تراز آب دیده می شود. فراوانی

زمین لرزههای دستگاهی، گزارش شده در کاتالو ک IIEES و EHB در گستره سد مسجد سلیمان، افزایش قابل توجهی را متناسب با افزایش سطح تراز آب دریاچه این سد نشان می دهد. افزون بر این، ۹۰ روز پس از پایان آبگیری مخزن، زمین لرزه ۲۰۰۲/۹/۲۵ با بزرگی ۵/۶= _سM در مجاورت این سد اتفاق افتاده است. بر اساس شکل ۶، پس لرزههای این زمین لرزه در پیرامون گسل باغ ملک واقع می شوند. افزایش آشکار لرزه خیزی ها در هنگام آبگیری مخزن در منطقه سد، و ارتباط بسیار نزدیک زمان رخداد زمین لرزه یاد شده با تکمیل آبگیری سد و رسیدن سطح آب دریاچه به بیشترین مقدار خود، دلالت بر القایی بودن زمین لرزه هر ۲۰۰۲/۰۹/۲ با بزرگی M= ₄M دارد.

مقایسه تغییرات سطح آب و لرزه خیزی منطقه پس از نصب شبکه لرزه نگاری محلی نیز به روشنی میزان افزایش لرزه خیزی ها و ارتباطش با سطح تراز آب را نمایش می دهد. این ارتباط نز دیک، دست کم برای ۴ تغییر مشخص در سطح تراز آب که سبب افزایش فعالیت لرزه خیزی شده اند، قابل مشاهده است. در تمامی موارد بالا، زمانی که سطح تراز آب به نز دیک یا بالای بیشترین مقدار پیشین خود رسیده، لرزه خیزی نیز با افزایش شدیدی همراه بوده است. بنابراین می توان ارتباط روشنی را میان افزایش سطح تراز آب و افزایش بسامد رخداد زمین لرزه ها در این موارد گمان کرد.

الگوی پیش لرزه ها و پس لرزه ها برای ۳ زمین لرزه محلی بزرگ روی داده در گستره سد مسجد سلیمان به خوبی با الگوی ۲ (Mogi (1963 برای زمین لرزه های القایی همخوانی دارد و آهنگ زوال پس لرزه های به دست آمده برای آنها (جدول ۳) نیز همخوانی خوبی با آهنگ زوال پس لرزه های زمین لرزه های القایی نشان می دهد (1>h). موارد عنوان شده به همراه فاصله مناسب رخداد این زمین لرزه ها از مخزن سد، بویژه دو زمین لرزه با بزرگای ۳/۹ = M و ۳/۶ = M که در حوالی گسل باغ ملک رخ داده اند به طور حتم نشان دهنده القایی بودن این زمین لرزه ها است. مجاورت محل رخداد دو زمین لرزه یا دشده و پس لرزه های رویداد ۲۰۰۲/۹/۲۵ مسجد سلیمان (۶/۵ = M) که همگی در بخش پایانی گسل باغ ملک واقع می شوند، حکایت از پتانسیل بالای مخزن سد مسجد سلیمان در ایجاد زمین لرزه های القائی دارد.

سپاسگزاری

این پژوهش نتیجه قرارداد پژوهشی بسته شده میان پژوهشگاه بینالمللی زلزله شناسی و مهندسی زلزله بهعنوان مشاور و شرکت آب نیرو طرح سد و نیروگاه مسجد سلیمان، و سازمان آب و برق خوزستان، معاونت بهره برداری سد و نیروگاه به عنوان کارفر ما است. بدین وسیله از همه مسئولینی که امکان انجام پژوهش حاضر را فراهم کردند حمیمانه سپاسگزاری می شود. از آقای مهندس محسن دزواره که با دقت فراوان زحمت خواندن فاز و تعیین محل اولیه رویدادهای ثبت شده در شبکه لرزه نگاری سد و نیروگاه مسجد سلیمان را به عهده داشتند و از آقای مهندس حمیدرضا محمد یوسف که در همه مراحل نوفه سنجی، نصب ایستگاهها و جمع آوری داده ها مشتاقانه ما را یاری کردند نیز تشکر می شود.





شکل ۱– زمین لرزههای دستگاهی در منطقه سد مسجد سلیمان بر اساس کاتالوگ زمین لرزههای پژوهشگاه بین المللی زلزلهشناسی و مهندسی زلزله (دایرههای سرخ) و کاتالوگ EHB (Engdahl et al., 2006) (دایرههای سفید)، به همراه سازوکارهای کانونی گزارش شده در منطقه سد و نیروگاه مسجد سلیمان براساس حل های ارائه شده توسط مرکز لرزهنگاری دانشگاه هاروارد.



شکل ۲- الگوهای مختلف پراکندگی پیش لرزهها و پس لرزهها همراه با زمان و رابطه آنها با نوع ساختار مواد تشکیل دهنده محیط و نحوه پراکندگی تنش های خارجی اعمالی (Mogi, 1963).



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





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 ۲۵-۲/۰۹/۲۵ با بزرگی ۵/۵= ۲۸ توسط تک ایستگاه مستقر در روستای امیرالمؤمنین (دایرههای سرخ). محل و سازوکار کانونی ارائه شده برای این زمینلرزه توسط CMT نیز در شکل دیده می شود که البته موقعیت مکانی آن با خطای قابل توجهی همراه است.







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 ML= ۳/۹.

Region	$n(t) = Ct^{-h}$	Unit of time	Total time	
Kariba	1301-1.0	1 day	60 days	
Kremasta	1341-0.78	1 day	200 days	
Koyna	1801-1.0	1 day	110 days	
Koyna	1,3421-0.77	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	1121-0.78	1 day	100 days	
Aswan	20t-1.0	1 day	100 days	
Bhatsa	300t-1.0	1 day	500 days	

.(Gupta & Rastogi,	يس لرز ەھا (1976	ېراي زوال فعاليت	ىدول ۱- روابط ارائه شده
(1 0)	/ // -		2 .22 -2

	زمان	طول جغرافیایی(درجه)	عرض جغرافیایی(درجه)	بزر گا(ML)	ژرفا(متر)
١	۲۰۰۶/۱۰/۱۳	49/411	37/08	١/٧	17/9
۲	٢٠٠۶/١١/٣٣	49/0.9	31/9.0	٣/٩	10/4
٣	YV/.9/.4	49/481	T1/ATT	۲/۱	٩
۴	۲۰۰۷/۰۸/۰۱	F9/FVA	81/944	۳/۶	۱۵/۷

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

جدول ٣- روابط بهدست آمده برای زوال فعالیت پس لرزه ها.

	تاريخ رخداد	$n(t) = ct^{-h}$	واحد زماني	زمان کل
١	2	$n(t) = 34t^{-0.7}$	۱ روز	۱۶ روز
۲	YV/.9/.4	$n(t) = 30t^{-0.8}$	۱ روز	۲۶ روز
٣	۲۰۰۷/۰۸/۰۱	$n(t) = 55t^{-0.9}$	ا 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.