

بِسْمِ اللّٰهِ الرَّحْمٰنِ الرَّحِیْمِ

د کف دست زمین کو ہر ناپیدانی است

کہ رسولان ہمہ از تابش آن خیرہ شدند

پی کو ہر باشیم...



پژوهشگاه بین المللی زلزله شناسی و مهندسی زلزله

پایان نامه کارشناسی ارشد

ژئوفیزیک - زلزله شناسی

موضوع

بررسی زمین لرزه های القایی ناشی از مخزن سد مسجد سلیمان

دانشجو

محمد رضا ابراهیمی

استاد راهنما:

دکتر محمد تاتار

شهریور ۱۳۸۸

اعضاء هيئت داوران:

دکتر محمد تاتار
امضاء

استاد راهنما

دکتر غلام جوان

داور داخلی

امضاء
حسین درویش

ب. ۸۸/۲
دکتر نصرالله کاملیان
امضاء

داور خارجی

دکتر حسن حسرو لو
امضاء

مدیر تحصیلات تکمیلی

تقدیم بہ پدر و مادرم کہ اندیشیدن را

بہ من آموختند

تقدیر و تشکر

حمد و سپاس خدای را که ما را بدین طریق هدایت فرمود، پروردگاری که کسب علم و دانش را بر انسان فرض نمود چرا که این راه تامل و سعادت است.

ابتداءً لازم می‌دانم از راهبانی‌های بی‌دریغ استاد ارجمندم جناب آقای دکتر محمد تانار در طول دوران تحصیل و همچنین در زمینه انتخاب موضوع پایان نامه و مراحل پژوهش آن کمال قدردانی و تشکر را داشته باشم.

بچنین شیوه است از تمامی اساتید محترم گروه زلزله‌شناسی و لرزه‌زین‌ساخت پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله که در طی دوران کارشناسی ارشد را افتخار حضور در کلاس‌های پر بارشان را داشته‌ام و زحمات زیادی را برای من و سایر دانشجویان ورودی ژانویه یک ۸۶ تحمّل شده اند، صمیمانه سپاس‌گزار می‌باشم و به‌منظور برخورد لازم می‌دانم از جناب آقایان دکتر جوان و دکتر کالیان نیز که زحمت‌های این پیمان نامه را به عهده گرفتند تشکر کنم.

تحقیق حاصل شده قرار داد پژوهشی منتهی در پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله بعنوان مشاور و شرکت آب نیرو - طرح سد و نیروگاه مسجد سلیمان و سازمان آب و برق خوزستان - معاونت بهره‌برداری سد و نیروگاه بعنوان کارفرما می‌باشد. بدین‌وسیله لازم می‌دانم از ریاست محترم پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله آقای دکتر تسنیمی، مجری محترم طرح سد و نیروگاه مسجد سلیمان آقای مهندس مشیری و معاونت محترم بهره‌برداری از سد و نیروگاه سازمان آب و برق خوزستان آقای مهندس جعفری که امکان استفاده از داده‌های ثبت شده در شبکه لرزه‌نگاری مسجد سلیمان را فراهم نمودند، سپاس‌گزار می‌باشم.

از آقای مهندس محسن ذواره که با دقت فراوان زحمت قرائت 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 محمدیوسف که در تمامی مراحل نوبت‌نویسی، نصب ایستگاه با جمع‌آوری داده‌ها مشتاقانه ما را یاری نمودند، تشکر می‌کنم.

محمد رضا ابراهیمی

تاسان ۱۳۸۸



چکیده

قرار گرفتن طرح سد و نیروگاه مسجد سلیمان در زون لرزه زمین ساختی زاگرس که یکی از فعالترین زون های لرزه زمین ساختی کشور می باشد، ضرورت انجام مطالعات گسترده و بویژه بررسی اثر دریاچه سد بر تغییرات آهنگ لرزه خیزی منطقه را بیش از پیش آشکار می سازد. سد مسجد سلیمان با ارتفاع از پی بالغ بر ۱۷۷ متر، عرض تاج ۱۵ متر، طول تاج برابر با ۴۹۷ متر و با دریاچه ای به حجم ۲۶۱ میلیون متر مکعب در سطح تراز نرمال، یکی از مرتفع ترین سدهای سنگریزه ای با هسته رسی قائم کشور محسوب می شود. بدیهی است که بدنه سد و حجم آب دریاچه آن در تغییر روند لرزه خیزی منطقه و بویژه در ایجاد زمین لرزه های القایی نقش بسزائی ایفا می کنند. به دنبال اتمام آبگیری مخزن (۲۰۰۲/۰۶/۲۵) با توجه به داده های شبکه های ملی و جهانی چون کاتالوگ پژوهشگاه بین المللی زلزله شناسی و مهندسی زلزله (IIIES) و کاتالوگ (EHB) شاهد افزایش لرزه خیزی ها در منطقه مخزن سد بودیم و ۹۰ روز پس از اتمام آبگیری در تاریخ ۲۰۰۲/۰۹/۲۵ زمین لرزه ای با بزرگی $M_w = 5/6$ در منطقه سد مسجد سلیمان رخ می دهد.

شبکه لرزه نگاری محلی در منطقه سد از ماه ژوئن سال ۲۰۰۶ نصب گردید و اطلاعات لرزه ای در فاصله زمانی ۱۵ ماهه تا ماه آگوست سال ۲۰۰۷ مورد بررسی قرار گرفت. موقعیت اکثر زمین لرزه ها پس از آبگیری در قسمت شرق دریاچه سد در منتهی الیه گسل باغ ملک و در محل زیر مخزن مکان یابی شدند. بزرگترین زمین لرزه های رخ داده در بازه زمانی نصب شبکه لرزه نگاری محلی دارای بزرگمایی معادل $M_L = 3/6$ و $M_L = 3/9$ بودند. مطالعات آماری صورت گرفته در منطقه سد با روش هایی چون محاسبه ضریب b در رابطه گوتنبرگ- ریشتر، مطالعه الگوی پیش لرزه ها و پس لرزه ها، آهنگ زوال پس لرزه ها، مطالعه ارتباط تغییرات سطح تراز آب با لرزه خیزی و مطالعه توزیع فرکتالی زمین لرزه ها، همگی دلالت بر القایی بودن زمین لرزه های رخ داده در قسمت شرق دریاچه سد و به خصوص در منتهی الیه گسل باغ ملک دارند.

علی رغم نداشتن یک شبکه محلی در هنگام وقوع زمین لرزه ۲۰۰۲/۰۹/۲۵ ($M_w = 5/6$) به روشنی می توان القایی بودن این زمین لرزه 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 پس لرزه های مکان یابی شده این زمین لرزه توسط تک ایستگاه نصب شده در محل مخزن پس از وقوع زمین لرزه، اثبات نمود. زمین لرزه ۲۰۰۲/۰۹/۲۵ مسجد سلیمان با بزرگی $M_w = 5/6$ در واقع اولین و بزرگترین زمین لرزه القایی است که در ایران شناسایی و رویداده است.



فهرست مطالب

عنوان	صفحه
فصل اول : معرفی انواع زمین لرزه های القایی	۱
۱-۱- مقدمه	۲
۲-۱- زمین لرزه های القایی معدنکاری	۳
۳-۱- زمین لرزه های القایی انفجارات هسته ای	۵
۴-۱- زمین لرزه های القایی مربوط به هیدروکربورها	۶
۱-۴-۱- لرزه خیزی ناشی از تزریق سیال	۶
۲-۴-۱- لرزه خیزی ناشی از بهره برداری	۷
۵-۱- زمین لرزه های القایی مخزن (RIS)	۹
فصل دوم : زمین لرزه های القایی مخزن	۱۰
۱-۲- تاریخچه زمین لرزه های القایی مخزن	۱۱
۲-۲- تقسیم بندی زمین لرزه های القایی مخزن بر اساس فاکتورهای ایجاد کننده آنها	۱۶
۱-۲-۲- مقدمه	۱۶
۲-۲-۲- فاکتورهای وابسته به زمین لرزه های القایی مخزن	۱۷
۳-۲-۲- نمونه ای از یک لرزه خیزی اولیه	۲۲
۴-۲-۲- نمونه ای از یک لرزه خیزی تأخیری	۲۵
۳-۲- ویژگی های کلی زمین لرزه های القایی مخزن	۳۱
۱-۳-۲- نحوه طبقه بندی زمین لرزه های تحریکی در مخازن سدها	۳۳
۲-۳-۲- ارتباط بین حجم مخزن و بزرگای زمین لرزه ها	۳۴
۱-۲-۳-۲- تخمین انرژی آزاد شده بعد از آنگیری مخزن	۳۶
۱-۱-۲-۳-۲- محاسبه لختی دورانی آب در مخزن	۳۶
۲-۱-۲-۳-۲- محاسبه انرژی جنبشی آزاد شده بعد از آنگیری	۳۷
۳-۱-۲-۳-۲- محاسبه انرژی لرزه ای آزاد شده بوسیله مخزن بعد از آنگیری	۳۸
۴-۱-۲-۳-۲- پیش بینی بزرگا	۳۸
۴-۲- موارد مهم از زمین لرزه های القایی مخزن رخ داده	۳۹
۱-۴-۲- مخزن کوینا در هندوستان	۳۹
۲-۴-۲- مخزن سینگ فنگ کیانگ در چین	۴۱
۳-۴-۲- مخزن کرماستا در یونان	۴۲



فصل سوم: نقش ساختار زمین شناسی در ایجاد زمین لرزه های القایی..... ۴۴

- ۱-۳- شکست سنگ و تغییرات تنش القایی..... ۴۵
- ۲-۳- ویژگی های زمین شناسی در زمین لرزه های القایی مخزن..... ۴۸
- ۳-۳- نحوه تاثیر گسل ها بر روی زمین لرزه های القایی مخزن..... ۴۹
- ۴-۳- وضعیت زمین شناسی منطقه..... ۵۹

فصل چهارم: روش های شناسایی زمین لرزه های القایی..... ۶۱

- ۱-۴- رابطه بزرگا و فراوانی زمین لرزه ها (محاسبه ضریب b)..... ۶۲
- ۲-۴- الگوی پیش لرزه ها و پس لرزه ها..... ۶۴
- ۳-۴- زوال پس لرزه ها..... ۶۷
- ۴-۴- مطالعه ارتباط تغییرات سطح آب و لرزه خیزی منطقه..... ۶۸
- ۵-۴- مطالعه ارتباط توزیع فرکتالی و رابطه بزرگا و فراوانی (ضریب b) زمین لرزه ها..... ۷۰

فصل پنجم: زمین لرزه های القایی در گستره سد مسجد سلیمان..... ۷۳

- ۱-۵- لرزه خیزی منطقه سد و نیروگاه مسجد سلیمان..... ۷۴
- ۱-۱-۵- مقدمه..... ۷۴
- ۲-۱-۵- لرزه خیزی تاریخی..... ۷۶
- ۳-۱-۵- لرزه خیزی دستگاهی..... ۷۷
- ۴-۱-۵- توزیع عمق کانونی زمین لرزه ها..... ۸۰
- ۵-۱-۵- ساز و کار کانونی زمین لرزه های حاکم در منطقه مسجد سلیمان..... ۸۲
- ۲-۵- محاسبات آماری انجام شده و مشاهدات بدست آمده..... ۸۶
- ۱-۲-۵- نحوه اعمال روش ها روی داده ها..... ۸۶
- ۲-۲-۵- رابطه بزرگا و فراوانی زمین لرزه ها (محاسبه ضریب b)..... ۸۹
- ۱-۲-۲-۵- محاسبه ضریب b در سطح..... ۹۰
- ۲-۲-۲-۵- محاسبه ضریب b در عمق..... ۹۵
- ۳-۲-۵- الگوی پیش لرزه ها و پس لرزه ها..... ۱۰۶
- ۴-۲-۵- زوال پس لرزه ها..... ۱۱۰
- ۵-۲-۵- مطالعه ارتباط تغییرات سطح آب و لرزه خیزی منطقه..... ۱۱۲
- ۶-۲-۵- مطالعه ارتباط توزیع فرکتالی و رابطه بزرگا و فراوانی (ضریب b) زمین لرزه ها..... ۱۱۷



فصل ششم : بحث و نتیجه گیری ۱۲۱

۱-۶- نتیجه گیری..... ۱۲۲

۲-۶- پیشنهادات..... ۱۲۷

مراجع ۱۲۸



فهرست اشکال

صفحه

عنوان

فصل اول

- شکل (۱-۱): شش مدل ژئومکانیکی ممکن برای وقوع زلزله زمین لرزه های القای معدنکاری..... ۴
- شکل (۲-۱): الگوی شکستگی ایجاد شده بوسیله یک انفجار هسته ای در نوادا..... ۵
- شکل (۳-۱): مقطع شماتیکی از ساز و کارهای تغییر شکل های سطحی و گسلش همراه استخراج سیال..... ۸
- شکل (۴-۱): شکست پوسته در اثر تنش های فشاری افقی ناشی از استخراج هیدروکربور..... ۸

فصل دوم

- شکل (۱-۲): مهمترین رویدادهای لرزه خیزی القایی مخازن در جهان..... ۱۱
- شکل (۲-۲): فراوانی زمین لرزه های القایی مخزن..... ۱۲
- شکل (۳-۲): شکل شماتیک فرایند مشاهده شده در لرزه خیزی اولیه..... ۱۸
- شکل (۴-۲): سطح آب در مخزن مونتیسلو (خط تیره) که با لرزه خیزی ماهیانه برای دوره ای از ۱۹۷۷ تا ۱۹۹۱ مقایسه شده است..... ۲۲
- شکل (۵-۲): لرزه خیزی مشاهده شده نزدیک مخزن مونتیسلو در ۱۹۷۸..... ۲۳
- شکل (۶-۲): لرزه خیزی ماهیانه ($M > 4/0$) در مخزن کوینا که با تغییرات سطح آب دریاچه برای دوره زمانی ۱۹۶۱ تا ۱۹۹۵ مقایسه شده است..... ۲۵
- شکل (۷-۲): مقایسه دامنه چرخه ای تغییرات سطح آب (H_2) با حداقل میزان سطح تراز آب (H_1). برای لرزه خیزی اولیه $H_1 \ll H_2$ و برای لرزه خیزی ادامه دار H_2 قابل قیاس با H_1 می باشد..... ۲۶
- شکل (۸-۲): زمین لرزه های بزرگ ($4/0 \leq M \leq 5/0$) در دریاچه مید که با سطح تراز آب دریاچه برای دوره زمانی ۱۹۳۵-۱۹۹۲ مقایسه شده است..... ۲۶
- شکل (۹-۲): رومرکز زمین لرزه های منطقه کوینا در فاصله زمانی دسامبر ۱۹۶۳ تا دسامبر ۱۹۷۱..... ۳۹
- شکل (۱۰-۲): نمودار بارش، تغییرات سطح آب و فعالیت لرزه خیزی در کوینا..... ۴۰
- شکل (۱۱-۲): رومرکز زمین لرزه های با بزرگای بزرگتر از ۴/۰ از ۱۹۷۳ تا ۱۹۷۶..... ۴۰
- شکل (۱۲-۲): گسل های اصلی در منطقه مخزن سینگ فنگ کیانگ. گسل هایی که به سطح زمین رسیده اند با خطوط تک خطی و گسل های مدفون با خطوط دو خطی مشخص شده اند..... ۴۱
- شکل (۱۳-۲): ارتباط بین سطح تراز آب و فرکانس وقوع زمین لرزه ها در مخزن سینگ فنگ کیانگ..... ۴۲
- شکل (۱۴-۲): تغییرات سطح آب و فرکانس لرزش ها در منطقه کرماستا..... ۴۳



فصل سوم

- شکل (۱-۳): الف) قانون کلمب برای شکست در سنگ خشک..... ۴۵
- شکل (۲-۳): جا به جایی دایره مور به سمت چپ بر اثر افزایش فشار منفذی..... ۴۶
- شکل (۳-۳): مثال هایی از تغییرات القایی تنش که ممکن است باعث ایجاد شکست در نواحی مختلف گسلی گردد..... ۴۷
- شکل (۴-۳): تغییرات پایداری گسل ها برای عمق های مختلف در زیر مخزن، با فرض صفر بودن فشار منفذی..... ۵۱
- شکل (۵-۳): همه موارد مشابه با شکل (۴-۳) می باشد، به جز اینکه فشار منفذی نیز در نظر گرفته شده است..... ۵۲
- شکل (۶-۳): شکل شماتیک برای نشان دادن اثر یک مخزن در حال نوسان بر روی بلوک های گسلی..... ۵۳
- شکل (۷-۳): ماکزیمم تغییرات مقاومت (با واحد بار) در یک چرخه کامل تغییر سطح آب دریاچه. یک گسل دقیقاً به صورت عمود بر مخزن فرض شده است (گسل امتداد لغز)..... ۵۵
- شکل (۸-۳): ماکزیمم تغییرات مقاومت (با واحد بار) در یک چرخه کامل تغییر سطح آب دریاچه. یک گسل معکوس زیر مخزن با شیب ۶۰ درجه به سمت چپ قرار دارد..... ۵۶
- شکل (۹-۳): تغییرات موقتی مربوط به نصف چرخه تغییرات سطح آب مخزن..... ۵۷
- شکل (۱۰-۳): نقشه زمین شناسی منطقه مورد مطالعه..... ۶۰

فصل چهارم

- شکل (۱-۴): الگوی پیش لرزه و پس لرزه ارائه شده توسط موگی (۱۹۶۳) و رابطه آنها با ساختار مواد و تنش ها..... ۶۴
- شکل (۲-۴): الگوی پیش لرزه ها و پس لرزه های زمین لرزه ۱۳ سپتامبر سال ۱۹۶۷ کوینا..... ۶۵
- شکل (۴-۴): الگوی پیش لرزه ها و پس لرزه های زمین لرزه ۱۳ آوریل سال ۱۹۶۹ شبه جزیره هند..... ۶۶
- شکل (۳-۴): الگوی پیش لرزه ها و پس لرزه های زمین لرزه ۱۱ دسامبر سال ۱۹۶۷ کوینا..... ۶۶
- شکل (۵-۴): تعداد زمین لرزه های رخ داده و سطح آب دریاچه کاریبا از ۱۹۵۹ تا ۱۹۶۸..... ۶۹
- شکل (۶-۴): نمونه ای از تخمین D از انتگرال همبستگی. نمودار لگاریتمی-لگاریتمی از $C(r)$ و r ۷۳

فصل پنجم

- شکل (۱-۵): توزیع زمین لرزه های دستگاهی در کمربند چین خورده-رورانده زاگرس، براساس کاتالوگ اصلاح شده ISC..... ۷۶
- شکل (۲-۵): توزیع زمین لرزه های دستگاهی براساس کاتالوگ EHB (انگدال و همکاران ۲۰۰۶) و زمین لرزه های تاریخی (دایره های سفید) براساس آمبرسیز و ملویل (۱۹۸۲) در منطقه سد و نیروگاه مسجد سلیمان..... ۷۸
- شکل (۳-۵): توزیع زمین لرزه های دستگاهی در منطقه سد مسجد سلیمان براساس کاتالوگ زمین لرزه های پژوهشگاه بین المللی زلزله شناسی و مهندسی زلزله..... ۷۹



- شکل (۴-۵): عمق کانونی زمین لرزه ها در زاگرس مرکزی براساس تحلیل خرد زمینلرزه های ثبت شده در یک شبکه لرزه نگاری محلی..... ۸۱
- شکل (۵-۵): سازوکار کانونی حاکم بر زمین لرزه های ایران براساس حل های CMT ارائه شده توسط مرکز زلزله شناسی هاروارد..... ۸۳
- شکل (۶-۵): سازوکارهای کانونی حل شده براساس حل های CMT ارائه شده توسط مرکز زلزله شناسی هاروارد برای زمین لرزه های متوسط و بزرگ در کمربند چین خورده- رورانده زاگرس..... ۸۴
- شکل (۷-۵): توزیع سازوکارهای کانونی گزارش شده در منطقه سد و نیروگاه مسجد سلیمان براساس حل های ارائه شده توسط مرکز لرزه نگاری دانشگاه هاروارد..... ۸۵
- شکل (۸-۵): تعداد کل زمین لرزه های ثبت شده در منطقه سد مسجد سلیمان به همراه موقعیت ایستگاه ها و گسل های منطقه..... ۸۷
- شکل (۹-۵): زمین لرزه های ثبت شده در منطقه سد مسجد سلیمان تا شعاع ۳۰ کیلومتری تاج سد و تا عمق ۲۰ کیلومتر به همراه موقعیت ایستگاه ها و گسل های منطقه..... ۸۸
- شکل (۱۰-۵): ضریب b محاسبه شده برای گستره به شعاع ۳۰ کیلومتری از مخزن سد مسجد سلیمان..... ۸۹
- شکل (۱۱-۵): ضریب b محاسبه شده برای خارج از منطقه سد..... ۸۹
- شکل (۱۲-۵): الف) ضریب b کلی منطقه در سطح b نقشه تفکیک پذیری..... ۹۱
- شکل (۱۳-۵): الف) ضریب b سطحی در سه ماهه اول (ژوئن، جولای و آگوست ۲۰۰۶) در محدوده سد مسجد سلیمان ب) نقشه تفکیک پذیری..... ۹۱
- شکل (۱۴-۵): الف) ضریب b سطحی در سه ماهه دوم (سپتامبر، اکتبر و نوامبر ۲۰۰۶) در محدوده سد مسجد سلیمان ب) نقشه تفکیک پذیری..... ۹۲
- شکل (۱۵-۵): الف) ضریب b سطحی در سه ماهه سوم (دسامبر ۲۰۰۶، ژانویه و فوریه ۲۰۰۷) در محدوده سد مسجد سلیمان ب) نقشه تفکیک پذیری..... ۹۳
- شکل (۱۶-۵): الف) ضریب b سطحی در سه ماهه چهارم (مارس، آوریل و می ۲۰۰۷) در محدوده سد مسجد سلیمان ب) نقشه تفکیک پذیری..... ۹۳
- شکل (۱۷-۵): الف) ضریب b سطحی در سه ماهه پنجم (ژوئن، جولای و آگوست ۲۰۰۷) در محدوده سد مسجد سلیمان ب) نقشه تفکیک پذیری..... ۹۴
- شکل (۱۸-۵): مقاطع عرضی موازی به پهنای ۲۵ کیلومتر که به صورت عمود بر روند کلی لرزه خیزی منطقه رسم شدند..... ۹۵
- شکل (۱۹-۵): توزیع و نحوه به خط شدگی زمین لرزه ها در امتداد مقطع AA' ۹۸
- شکل (۲۰-۵): الف) تغییرات عمقی ضریب b در امتداد مقطع AA' ب) نقشه تفکیک پذیری..... ۹۸
- شکل (۲۱-۵): توزیع و نحوه به خط شدگی زمین لرزه ها در امتداد مقطع BB' ۹۹
- شکل (۲۲-۵): الف) تغییرات عمقی ضریب b در امتداد مقطع BB' ب) نقشه تفکیک پذیری..... ۱۰۰
- شکل (۲۳-۵): توزیع و نحوه به خط شدگی زمین لرزه ها در امتداد مقطع CC' ۱۰۰
- شکل (۲۴-۵): الف) تغییرات عمقی ضریب b در امتداد مقطع CC' ب) نقشه تفکیک پذیری..... ۱۰۱
- شکل (۲۵-۵): توزیع زمین لرزه ها در امتداد مقطع DD' ۱۰۲



- شکل (۵-۲۶): الف) تغییرات عمقی ضریب b در امتداد مقطع DD' (ب) نقشه تفکیک پذیری..... ۱۰۲
- شکل (۵-۲۷): مقاطع عرضی موازی به پهنای ۲۵ کیلومتر که به صورت عمود بر روند کلی لرزه خیزی منطقه رسم شدند
- مقاطع عرضی نشان داده شده در این شکل نسبت به مقاطع شکل (۵-۲۴) تمایل بیشتری به سمت شرق دارند..... ۱۰۳
- شکل (۵-۲۸): توزیع و نحوه به خط شدگی زمین لرزه ها در امتداد مقطع DD' ۱۰۳
- شکل (۵-۲۹): الف) تغییرات عمقی ضریب b در امتداد مقطع EE' (ب) نقشه تفکیک پذیری..... ۱۰۴
- شکل (۵-۳۰): توزیع و نحوه به خط شدگی زمین لرزه ها در امتداد مقطع FF' ۱۰۵
- شکل (۵-۳۱): الف) تغییرات عمقی ضریب b در امتداد مقطع FF' (ب) نقشه تفکیک پذیری..... ۱۰۵
- شکل (۵-۳۲): توزیع و نحوه به خط شدگی زمین لرزه ها در امتداد مقطع GG' ۱۰۶
- شکل (۵-۳۳): الف) تغییرات عمقی ضریب b در امتداد مقطع GG' (ب) نقشه تفکیک پذیری..... ۱۰۷
- شکل (۵-۳۴): زمین لرزه های رخ داده از تاریخ ۲۰۰۶/۰۹/۲۲ تا تاریخ ۲۰۰۷/۰۸/۳۱ به صورت روزانه..... ۱۰۸
- شکل (۵-۳۵): الگوی پیش لرزه ها و پس لرزه های زمین لرزه ۲۰۰۶/۱۱/۲۳ با بزرگی $M_L=3/9$ ۱۰۹
- شکل (۵-۳۶): الگوی پیش لرزه ها و پس لرزه های زمین لرزه ۲۰۰۷/۰۶/۰۴ با بزرگی $M_L=2/1$ ۱۰۹
- شکل (۵-۳۷): الگوی پیش لرزه ها و پس لرزه های زمین لرزه ۲۰۰۷/۰۸/۰۱ با بزرگی $M_L=3/6$ ۱۱۰
- شکل (۵-۳۸): موقعیت مکانی و بزرگای زمین لرزه های القایی منتخب..... ۱۱۱
- شکل (۵-۳۹): نحوه زوال پس لرزه ها برای زمین لرزه ۲۰۰۶/۱۱/۲۳ با بزرگی $M_L=3/9$ ۱۱۲
- شکل (۵-۴۰): نحوه زوال پس لرزه ها برای زمین لرزه ۲۰۰۷/۰۶/۰۴ با بزرگی $M_L=2/1$ ۱۱۱
- شکل (۵-۴۱): نحوه زوال پس لرزه ها برای زمین لرزه ۲۰۰۷/۰۸/۰۱ با بزرگی $M_L=3/6$ ۱۱۱
- شکل (۵-۴۲): نمایش کلی تغییرات سطح تراز آب و لرزه خیزی دستگاهی ثبت شده توسط کاتالوگ پژوهشگاه بین المللی زلزله شناسی و مهندسی زلزله (IIIES) و کاتالوگ اصلاح شده ISC (EHB) در گستره سد مسجد سلیمان..... ۱۱۲
- شکل (۵-۴۳): پس لرزه های مکانیابی شده زمین لرزه ۲۰۰۲/۰۹/۲۵ (۸۱/۰۷/۰۳) با بزرگی $M_w=5/6$ ، توسط تک ایستگاه مستقر در روستای امیرالمومنین. محل و مکانیزم کانونی ارائه شده برای این زمین لرزه توسط CMT نیز در شکل مشاهده می گردد که البته دارای خطا می باشد..... ۱۱۳
- شکل (۵-۴۴): نمایش کلی تغییرات سطح تراز آب و لرزه خیزی..... ۱۱۴
- شکل (۵-۴۵): منحنی تغییرات سطح تراز آب و لرزه خیزی برای زمین لرزه ۲۰۰۶/۱۱/۲۳ با بزرگی $M_L=3/9$ ۱۱۵
- شکل (۵-۴۶): منحنی تغییرات سطح تراز آب و لرزه خیزی برای زمین لرزه ۲۰۰۷/۰۶/۰۴ با بزرگی $M_L=2/1$ ۱۱۵
- شکل (۵-۴۷): منحنی تغییرات سطح تراز آب و لرزه خیزی برای زمین لرزه ۲۰۰۷/۰۸/۰۱ با بزرگی $M_L=3/6$ ۱۱۶
- شکل (۵-۴۸): نحوه شبکه بندی به کار رفته در منطقه مورد مطالعه برای محاسبه تغییرات مکانی بعد فرکتالی..... ۱۱۷
- شکل (۵-۴۹): نمونه ای از تخمین بعد فرکتالی D از روش انتگرال همبستگی، نمودار لگاریتمی-لگاریتمی از $C(r)$ و r ۱۱۸
- شکل (۵-۵۰): الف) نقشه کانتوری از ضریب b ؛ ب) نقشه کانتوری از بعد فرکتالی D ۱۱۸
- شکل (۵-۵۱): منحنی تغییرات ضریب b و بعد فرکتالی D در شبکه های مختلف..... ۱۲۰
- شکل (۵-۵۲): مناطق هاشور خورده نشان دهنده شبکه هایی هستند که دارای ضریب b بالاتر از ۰/۸ و ضریب D پایین تر از ۰/۶ می باشند و ساختاری ناهمگن دارند و بیشتر مستعد بروز زمین لرزه های القایی هستند..... ۱۲۰



فصل ششم

- شکل (۶-۱): مقایسه حالت گسل معکوس با شیب ۶۰ درجه که در بخش جلویی سد باعث ایجاد ناپایداری های شدید می شود با فعالیت های لرزه خیزی در قسمت شرقی و جلوی دریاچه سد مسجد سلیمان..... ۱۲۲
- شکل (۶-۲): الف) نقشه کانتوری محدوده تغییرات کم ضریب D ب) موقعیت مکانی محدوده تغییرات کم ضریب D بر روی نقشه جغرافیایی منطقه سد مسجد سلیمان..... ۱۲۵

فهرست جداول

صفحه

عنوان

فصل دوم

- جدول (۲-۱): گزارشات رویدادهای لرزه خیزی القایی مخازن در جهان..... ۱۳
- جدول (۲-۲): درجه بندی زلزله های القایی مخزن (RIS)..... ۱۵
- جدول (۲-۳): موارد مهم زمین لرزه های القایی گزارش شده..... ۲۷
- جدول (۲-۴): حجم ها و سطوح آب در مخزن دان جیانگ کو..... ۳۶
- جدول (۲-۵): انرژی جنبشی آزاد شده بعد از آنگیری مخزن دان جیانگ کو..... ۳۸

فصل سوم

- جدول (۳-۱): Z^* برای ضریب پخش و دوره تناوب های متفاوت..... ۵۴

فصل چهارم

- جدول (۴-۱): مقادیر ضریب b برای زمین لرزه های القایی ناشی از سدها و زمین لرزه های طبیعی..... ۶۳
- جدول (۴-۲): روابط ارائه شده برای زوال فعالیت پس لرزه ها..... ۶۸

فصل پنجم

- جدول (۵-۱): ایستگاه های لرزه نگاری محلی نصب شده در محدوده سد و نیروگاه مسجد سلیمان..... ۸۶
- جدول (۵-۲): ایستگاه های لرزه نگاری نصب شده در محدوده سد و نیروگاه گتوند و یک ایستگاه لرزه نگاری باند پهن پژوهشگاه بین المللی زلزله شناسی و مهندسی زلزله..... ۸۷
- جدول (۵-۳): زمان، موقعیت مکانی، بزرگای و عمق زمین لرزه های القایی منتخب..... ۱۱۱
- جدول (۵-۴): روابط بدست آمده برای زوال فعالیت پس لرزه ها..... ۱۱۲



پیشگفتار

با روند پیشرفت تکنولوژی در دهه‌های گذشته، فعالیت‌های انسانی موجب تحریک پوسته زمین و ایجاد پاسخ‌های اغلب ناخواسته در آن گشته است. پدیده زمین‌لرزه‌های القایی یک مثال از چنین موارد ناخواسته ایجاد شده توسط بشر می‌باشد. این زمین‌لرزه‌ها می‌توانند در نتیجه تغییرات تنش ناشی از فشار منفذی، تغییر حجم، بارگذاری یا باربرداری در یک جرم سنگی یا ترکیبی از چنین مواردی به وجود آید. یکی از مهمترین انواع زمین‌لرزه‌های القایی در مخازن سدها رخ می‌دهد، چرا که انباشته شدن حجم عظیمی از آب در پشت سدها موجب برهم زدن موازنه طبیعی منطقه، افزایش تنش‌های الاستیکی و افزایش ناهمگنی در پوسته و بروز زمین‌لرزه‌های القایی می‌گردد، بعضی از این نوع زمین‌لرزه‌ها بزرگ‌گانه‌هایی حتی بیشتر از ۶ ریشتر نیز داشته‌اند، از این رو و با توجه به اهمیت اجتماعی، اقتصادی سدها، یونسکو گروهی را در رابطه با پدیده لرزه‌خیزی مرتبط با مخازن بزرگ در سال ۱۹۷۰ تشکیل داد. نتیجه جلسه این گروه در پاریس، انتشار مقاله‌ای در رابطه با زمین‌لرزه‌های القایی مخزن توسط آکادمی علوم آمریکا^۱ در سال ۱۹۷۲ بود. در این رابطه دو کنفرانس توسط یونسکو پیرامون زمین‌لرزه‌های القایی در انگلستان و کانادا تشکیل شد و متخصصان شاخه‌های مختلف علوم زمین را دور هم گرد آورد تا جنبه‌های گوناگون لرزه‌خیزی القایی را مورد آزمایش قرار دهند.

از آنجاییکه پایدار ی سدهای بزرگ در هنگام رویداد زمین‌لرزه‌ها از اهمیت بالایی برخوردار است، شبکه‌های محلی برای رفتارنگاری لرزه‌ای، تعیین رومرکز و ژرفای کانونی، بزرگا و سازوکار زمین‌لرزه‌های القایی گستره سد و نیز گاهی بررسی لرزه‌خیزی و لرزه‌زمینساخت در گستره‌ای وسیع‌تر، نصب می‌گردند. طراحی این شبکه‌ها به نحوی صورت می‌گیرد که اطلاعات صحیحی با توجه به اهداف آن بدست آید.

کشور ایران در کمربند آلپ-همالیا که یکی از لرزه‌خیزترین قسمت‌های جهان است واقع شده است. ایران در مرز همگرایی بین صفحات عربی و اوراسیا قرار دارد و توسط این دو صفحه تحت فشار می‌باشد، از این رو شاهد چین‌خوردگی‌های فراوان در این منطقه و بروز زمین‌لرزه‌های متعدد در طی سالیان دراز در کشورمان بوده‌ایم. منطقه لرزه‌زمینساختی زاگرس را می‌توان به نوعی لرزه‌خیزترین قسمت فلات ایران در نظر گرفت. وقوع زمین‌لرزه‌های متعدد، با بزرگی متوسط تا نسبتاً

¹ U.S. National Academy of Sciences



قابل توجه، از ویژگی های زون فعال زاگرس می باشد. سد مسجد سلیمان با ارتفاع از پی بالغ بر ۱۷۷ متر، عرض تاج ۱۵ متر، طول تاج برابر با ۴۹۷ متر و با دریاچه ای به حجم ۲۶۱ میلیون متر مکعب در سطح تراز نرمال، یکی از مرتفع ترین سدهای سنگریزه ای با هسته رسی قائم کشور محسوب می شود. قرار گرفتن طرح سد و نیروگاه مسجد سلیمان در زون لرزه زمین ساختی زاگرس که یکی از فعال ترین زون های لرزه زمین ساختی کشور محسوب می شود، ضرورت انجام مطالعات گسترده و بویژه بررسی اثر دریاچه سد بر تغییرات آهنگ لرزه خیزی منطقه را بیش از پیش آشکار می سازد.

در این مجموعه زمین لرزه های ثبت شده توسط شبکه لرزه نگاری محلی نصب شده در اطراف سد مخزنی مسجد سلیمان پس از احداث این سد، در طول ۱۵ ماه پایش این مخزن از ژوئن ۲۰۰۶ تا آگوست ۲۰۰۷ مورد بررسی قرار می گیرد. بحث بر روی القایی بودن این زمین لرزه ها مهمترین هدف این تحقیق تعیین شده است. از این رو در فصل نخست یک معرفی کلی از انواع زمین لرزه های القایی به منظور آشنایی بیشتر با آنها ارائه می گردد، سپس در فصل دوم به شکلی مفصل به زمین لرزه های القایی مخزن می پردازیم و در سومین فصل این تحقیق نقش ساختار زمین شناسی را در ایجاد زمین لرزه های القایی توضیح داده می شود. روشهای شناسایی زمین لرزه های القایی در فصل چهارم ارائه می گردد و در فصل پنجم القایی بودن زمین لرزه های رخ داده در گستره سد مسجد سلیمان را بررسی خواهیم کرد. در نهایت در فصل ششم به بحث و نتیجه گیری در مورد القایی بودن زمین لرزه های این منطقه پرداخته و نشان خواهیم داد که بخش قابل توجهی از لرزه خیزی مشاهده ای در زیر مخزن سد مسجد سلیمان از نوع القایی می باشند.



فصل اول

معرفی انواع زمین لرزه های القایی



۱-۱- مقدمه

در سالهای اخیر زمین لرزه هایی ثبت شده اند که منشاء آنها پدیده های طبیعی از قبیل آتشفشان، تکتونیک صفحه ای و یا نظایر آن نبوده بلکه فعالیت بشر و عملکرد آن به صورتهای مختلف باعث بهم خوردگی تنش های منطقه ای، تغییر شکل پوسته و رویداد زمین لرزه شده است. بزرگی این زمین لرزه ها اغلب متوسط بوده ولی در چند مورد حتی از ۶ ریشتر نیز فراتر رفته، که صدمات مالی و جانی فراوانی را به همراه داشته است. اصولاً 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. این حرکات معمولاً با آشفستگی و بر هم زدن موازنه طبیعت همراه بوده است و نسبت مستقیمی بین تعداد زمین لرزه های القایی و فعالیت های انسانی وجود دارد.

زمین لرزه های القایی را می توان به چهار دسته کلی تقسیم کرد:

(۱) زمین لرزه های القایی معدنکاری^۱

(۲) زمین لرزه های القایی انفجارهای هسته ای^۲

(۳) زمین لرزه های القایی مربوط به هیدروکربورها^۳

(۴) زمین لرزه های القایی مخزن (RIS)^۴

در هر یک از موارد فوق سطح لرزه خیزی ناحیه ای 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 هسته ای، افزایش می یابد. در این حالتها با توجه به جمع شدن انرژی در گسلهای ناحیه، عملیات انسانی موجب تحریک گسل ها شده و به صورت تسریع کننده رویدادهای لرزه ای عمل می کند.

¹ Mining Induced Seismicity

² Nuclear Explosion Induced Seismicity

³ Hydrocarbon Related Induced Seismicity

⁴ Reservoir Induced Seismicity



۱-۲- زمین لرزه های القایی معدنکاری

فعالتهای معدنی باعث انفجار سنگها، سقوط سنگها و دیگر شکل های خطرپذیر در سنگ می شود. انفجارات سنگی بزرگ ($M=5/0$) که مخصوصاً در معادن طلای عمیق در آفریقای جنوبی و هند اتفاق می افتند حتی در شبکه های لرزه ای منطقه ای با فاصله زیاد نیز ثبت شده اند.

این نوع زمین لرزه ها کم عمق تر از زمین لرزه های معمولی هستند و اثراتشان بسیار موضعی و شدید می باشد. از این رو، بعضی از انفجارات سنگی بزرگ، خسارات بسیار شدیدی را هم به ساختارهای سطحی و هم به ساختارهای زیر زمینی وارد می کنند. انفجارات سنگی بزرگ عموماً در معادن عمیق که در آن انرژی و تنش آزاد شده در واحد طول از تونل معدنکاری، با عمق افزایش پیدا می کند، رایج تر هستند.

لرزه خیزی در معادن، عموماً وابسته به عمق، آهنگ معدنکاری، هندسه معدن، میدان تنش تکتونیکی منطقه در مجاورت محل استخراجشان و ناپیوستگی های زمین شناسی مثل دایک ها، گسلها و غیره می باشد، به طوری که انرژی آزاد شده در اثر انفجار وابسته به آهنگ معدنکاری است و معدنکاری در نزدیکی هر گسلی می تواند منجر به فعال شدن آن در اثر انفجارات بزرگ شود. در مجموع، یک یا ترکیبی از فاکتورهای بالا می تواند در هر مورد سبب ایجاد زمین لرزه های القایی در معادن گردد (هولوب و همکاران^۱، ۱۹۹۵).

دو عامل اصلی برای تشخیص مناطق احتمالی برای وقوع زمین لرزه های ناشی از معدنکاری ثبت رویدادهای لرزه ای در معادن عمیق و آگاهی داشتن از جزئیات شرایط زمین شناسی منطقه می باشند (لنهارت^۲، ۱۹۸۹). افزایش ناگهانی در تعداد و انرژی رویدادهای لرزه ای در معادن به عنوان پیش نشانگرهایی برای وقوع شکستگی و لغزش سنگها می باشند و مکان این رویدادهای لرزه ای می تواند در شناسایی مناطق تحت تنش در منطقه به ما کمک کند تا در مقابل خطر تخریب معدن از آن استفاده کنیم (شاه و لابوز^۳، ۱۹۹۵).

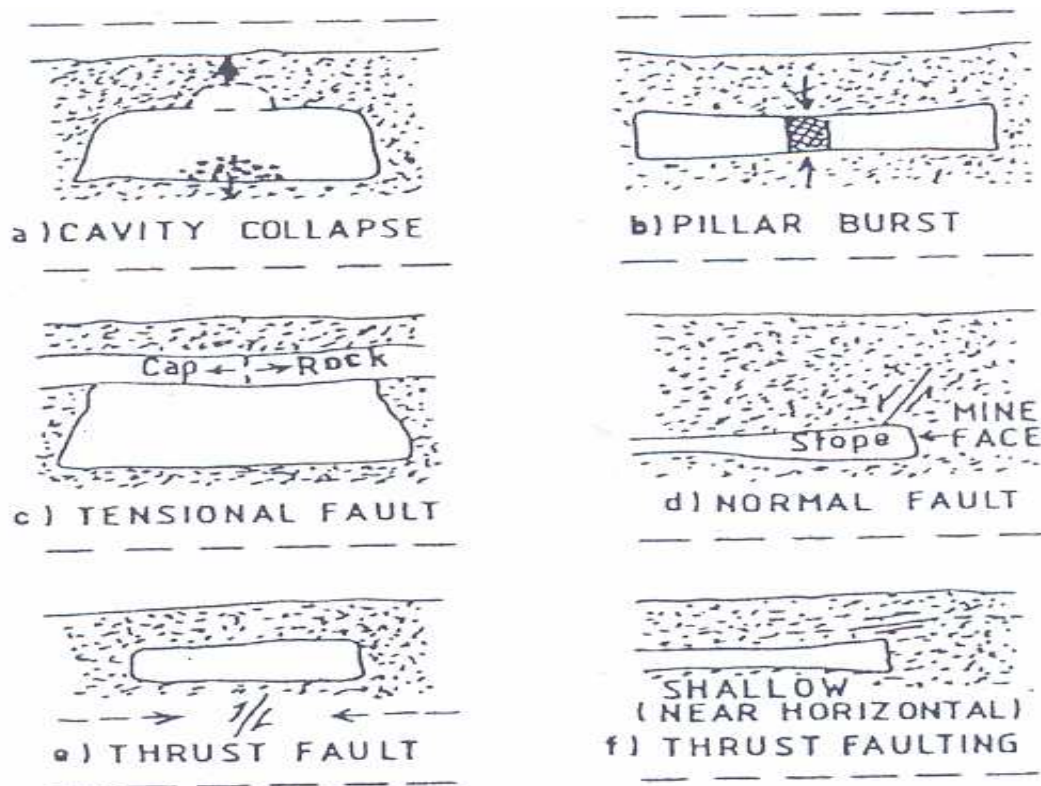
¹ Holub et al.

² Lenhardt

³ Shah and Labuz



هاسگاوا و همکاران^۱ (۱۹۸۹) ۶ مدل ژئومکانیکی را برای فروریزش سنگ‌ها با جهت‌های اعمال نیروی مختلف ارائه دادند. همانطوری که در شکل (۱-۱) مشاهده می‌شود، این مدل‌ها شامل فروریزش سنگ‌ها در تونل (a)، شکست ستون‌ها (b)، گسل‌های کششی (c)، گسل‌های نرمال (d)، گسل‌های تراستی (e) و گسل‌های تراستی کم عمق نزدیک به حالت افقی (f) می‌شوند؛ و هر کدام از این موارد می‌تواند سبب بروز زمین‌لرزه‌های القایی در معادن گردند.



شکل (۱-۱): شش مدل ژئومکانیکی ممکن برای وقوع زمین‌لرزه‌های القای معدنکاری، فلش‌های توپر و توخالی به ترتیب نمایش‌دهنده جهت نیروی القایی و جهت تنش تکتونیکی می‌باشند (هاسگاوا و همکاران، ۱۹۸۹).

به‌طور کلی، هر چه معدن عمیق‌تر باشد، لرزه‌خیزی القا شده توسط معدن نیز شدیدتر خواهد بود، در حالی که برای معادن دارای عمق کم اثرات و خرابی‌ها در نتیجه شکست تنش‌های القایی بسیار منطقه‌ای می‌باشد و تنها محدود به منطقه معدنکاری می‌گردد (شاه و لابوز، ۱۹۹۵).

¹ Hasegawa et al.